Министерство образования и науки Российской Федерации Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»



ISSN 1684-8519

# ИЗВЕСТИЯ томского политехнического университета

Том 326, № 3, 2015



г. Томск

## ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

#### Редакционная коллегия

Дьяченко А.Н., гл. редактор, д-р тех. наук (Россия) Кирьянова Л.Г., выпуск. редактор, канд. филос. наук (Россия) Глазырин А.С., выпуск. редактор, канд. техн. наук (Россия) Савичев О.Г., д-р геогр. наук (Россия) Покровский О.С., канд. геол.-минерал. наук (Франция) Старостенко В.И., д-р физ.-мат. наук (Украина) Конторович А.Э., д-р геол.-минерал. наук (Россия) Шварцев С.Л., д-р геол.-минерал. наук (Россия) Никитенков Н.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия) Силкин В.М., д-р физ.-мат. наук (Испания) Коротеев Ю.М., д-р физ.-мат. наук (Россия) Уленеков О.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия) Борисов А.М., д-р физ.-мат. наук (Россия) Коробочкин В.В., д-р техн. наук (Россия) Коршунов А.В., д-р хим. наук (Россия) Пестряков А.Н., д-р хим. наук (Россия) Тойпель У., Dsc (Германия) Джин-Чун Ким, Dsc (Южная Корея) Ильин А.П., д-р физ.-мат. наук (Россия) Заворин А.С., д-р техн. наук (Россия) Ханьялич К., Dsc (Нидерланды) Маркович Д.М., д-р физ.-мат. наук (Россия) Алексеенко С.В., д-р физ.-мат. наук (Россия) Воропай Н.И., д-р техн. наук (Россия) Кочегуров А.И., канд. техн. наук (Россия) Руи Д., PhD (Португалия) Зиатдинов Р.А., канд. физ.-мат. наук (Турция) Спицын В.Г., д-р техн. наук (Россия) Муравьев С.В., д-р техн. наук (Россия)

Входит в Перечень ВАК РФ – ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

> Подписной индекс по каталогу агенства «Роспечать» – 18054

> > © ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2015

#### УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Журнал «Известия Томского политехнического университета» (Известия ТПУ) — рецензируемый научный журнал, издающийся с 1903 года.

Учредителем является Томский политехнический университет.

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций – Свидетельство ПИ № 77-16615 от 24 октября 2003 г.

#### ISSN 1684-8519

Импакт-фактор РИНЦ 2013 - 0,217

«Известия Томского политехнического университета» публикует оригинальные работы, обзорные статьи, очерки и обсуждения, охватывающие последние достижения в области геологии, разведки и добычи полезных ископаемых, технологии транспортировки и глубокой переработки природных ресурсов, энергоэффективного производства и преобразования энергии на основе полезных ископаемых, а также безопасной утилизации геоактивов.

Журнал представляет интерес для геологов, химиков, технологов, физиков, экологов, энергетиков, специалистов по хранению и транспортировке энергоресурсов, ИТ-специалистов, а также ученых других смежных областей. Тематические направления журнала «Известия ТПУ»:

- Прогнозирование и разведка георесурсов
- Добыча георесурсов
- Транспортировка георесурсов
- Глубокая переработка георесурсов
- Энергоэффективное производство и преобразование энергии на основе георесурсов
- Безопасная утилизация георесурсов
- Прикладные задачи технологий георесурсов.

К публикации принимаются статьи, ранее нигде не опубликованные и не представленные к печати в других изданиях.

Статьи, отбираемые для публикации в журнале, проходят закрытое (слепое) рецензирование.

Автор статьи имеет право предложить двух рецензентов по научному направлению своего исследования.

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале «Известия ТПУ» на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

Полнотекстовый доступ к электронной версии журнала возможен на сайтах www.elibrary.ru, scholar.google.com

Ministry of Education and Science of the Russian Federation National Research Tomsk Polytechnic University



ISSN 1684-8519

# BULLETIN OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY

Volume 326, № 3, 2015



## BULLETIN OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY

### **Editorial Board**

Dyachenko A.N., editor in chief, Dr. Sc. (Russia)

Kiryanova L.G., managing editor, Cand. Sc. (Russia) Glazyrin A.S., managing editor, Cand. Sc. (Russia) Savichev O.G., Dr. Sc. (Russia) Pokrovsky O.S., Cand. Sc. (France) Starostenko V.I., Dr. Sc. (Ukraine) Kontorovich A.E., Dr. Sc. (Russia) Shvartsev S.L., Dr. Sc. (Russia) Nikitenkov N.N., Dr. Sc. (Russia) Silkin V.M., PhD (Spain) Koroteev Yu.M., Dr. Sc. (Russia) Ulenekov O.N., Dr. Sc. (Russia) Borisov A.M., Dr. Sc. (Russia) Korobochkin V.V., Dr. Sc. (Russia) Korshunov A.V., Dr. Sc. (Russia) Pestryakov A.N., Dr. Sc. (Russia) Teipel U., Dsc (Germany) Jin-Chun Kim, Dsc (South Korea) Ilyin A.P., Dr. Sc. (Russia) Zavorin A.S., Dr. Sc. (Russia) Hanjalic K., Dsc (Nitherlands) Markovich D.M., Dr. Sc. (Russia) Alekseenko S.V., Dr. Sc. (Russia) Voropai N.I., Dr. Sc. (Russia) Kochegurov A.I., Cand. Sc. (Russia) Rui D., PhD (Portugal) Ziatdinov R.A., Cand. Sc. (Turkey) Muravyov S.V., Dr. Sc. (Russia) Spitsyn V.G., Dr. Sc. (Russia)

© Tomsk Polytechnic University, 2015

#### AIMS AND SCOPES

Bulletin of the Tomsk Polytechnic University (TPU Bulletin) is peer-reviewed journal owned by Tomsk Polytechnic University. The journal was founded in 1903.

The journal is registered internationally (ISSN 1684-8519) and nationally (Certificate PE № 77-166615, October 24, 2003 from the RF Ministry of Press, Broadcasting and Mass Communications).

The journal publishes research papers in the field defined as "life cycle of georesources". It presents original papers, reviews articles, rapid communications and discussions covering recent advances in geology, exploration and extraction of mineral resources, transportation technologies and deep processing of natural resources, energy-efficient production and energy conversion based on mineral resources as well as on safe disposal of geo assets.

The journal will be of interest to geologists, chemists, engineers, physicists, ecologists, power engineers, specialists in storage and transportation of energy resources, IT specialists as well as to other specialists in the related fields.

Scope of the journal issue "Bulletin of the Tomsk Polytechnic University" in accordance with Geo Assets (GA) strategy includes:

- Geo Assets Exploration and Refining;
- Geo Assets Mining;
- Geo Assets Transportation;
- Geo Assets Deep processing;
- Energy-efficient production and conversion of energy based on Geo Assets;
- Safe disposal of Geo Assets;
- Applied Aspects of Geo Assets technologies.

TPU Bulletin publishes only original research articles. All articles are peer reviewed by international experts. Both general and technical aspects of the submitted paper are reviewed before publication. Authors are advised to suggest 2 potential reviewers who are familiar with the research focus of the article. Final decision on any paper is made by the Editor in Chief.

The Bulletin of the Tomsk Polytechnic University is published monthly.

The publication of manuscripts is free of charge.

The journal is on open access on www.elibrary.ru, scholar.go-ogle.com.

6

70

76

## СОДЕРЖАНИЕ

- Проблемы гидродинамических способов бурения скважин и основные направления их решения Ковалев А.В., Рябчиков С.Я., Алиев Ф.Р., Якушев Д.А., Горбенко В.М.
- Проблемные вопросы расчёта газовыделения в выемочный участок с учётом геомеханических и газодинамических процессов и методы их решения Шубина Е.А., Лукьянов В.Г.
- Влияние высокомолекулярных эластомеров на турбулентное течение углеводородных жидкостей Манжай В.Н., Абдусалямов А.В., Носикова Ю.Р.
  - 3D-тектонический анализ полей сейсмичности в южных районах Дальнего Востока России Петрищевский А.М., Васильева М.А.
- Технология получения корундовой бронекерамики, модифицированной сложными добавками Плетнев П.М., Непочатов Ю.К., Маликова Е.В., Богаев А.А.
  - **Двухзонный газогенератор на воздушном дутье** с псевдоожиженным слоем Дубинин А.М., Тупоногов В.Г., Рыжков А.Ф., Каграманов Ю.А., Лабинцев Е.С.
  - Энергетическая эффективность работы солнечных батарей в реальных режимах эксплуатации Дубинин Д.В., Лаевский В.Е. (V. Geringer)
    - Электропривод подъемников комплексов геофизического исследования скважин Чернышев А.Ю., Журиков С.А., Чернышев И.А.
- Эффективность информационной поддержки оператора при управлении объектом энергетики Павлов В.И., Аксенова Т.В., Аксенов В.В.
- К вопросу мониторинга качества электрической энергии Волошко А.В., Харчук А.Л.
  - Методы исследования электромагнитных процессов в обмотках трансформаторов при действии на них перенапряжений со стороны сети Никонец А.Л., Венгер В.П., Венгер В.П.
    - Коэффициенты Пуассона щелочно-галоидных кристаллов. Ч. III. Галогениды калия Беломестных В.Н., Соболева Э.Г.
      - Исследование повреждаемости металлов термодинамическим способом Куриленко Г.А.
        - Диагностика процесса разрушения сварных соединений при сварке Апасов А.М.
    - Модель принятия решений на основе линейной
       122

       регрессии для планирования повторного
       ГРП объекта ЮВ, Нивагальского месторождения

       Сабитов Р.Р., Швечиков Е.Д.

## CONTENTS

- Problems of hydrodynamic methods of wells drilling and the main directions in their solution Kovalyov A.V., Ryabchikov S.Ya., Aliev F.R., Yakushev D.A., Gorbenko V.M.
- 13 Problems in calculating gas-make in the operating panels in view of geomechanical and gas-dynamic processes, and methods to resolve them Shubina E.A., Lukyanov V.G.
- 19 Influence of high molecular elastomers on a turbulent flow of hydrocarbon liquids Manzhay V.N., Abdusalyamov A.V., Nosikova Yu.R.
- 25 3D-tectonic analysis of seismicity fields in the south regions of Russian Far East Petrishchevsky A.M., Vasileva M.A.
- 40 Technology of producing corundum armor ceramics modified with complex additives Pletnev P.M., Nepochatov Yu.K., Malikova E.V., Bogaev A.A.
- 50 Two-zone air blow gas generator with fluidized bed Dubinin A.A., Tuponogov V.G., Ryzhkov A.F., Kagramanov Yu.A., Labintsev E.S.
- 58 Energy efficiency of solar batteries under real operating conditions Dubinin D.V., Geringer V.
- 63 Electric drive of elevators for borehole geophysical survey complex Chernishev A.Yu., Zhurikov S.A., Chernishev I.A.
  - Efficiency of information support of operator when controlling power engineering facilities Pavlov V.I., Aksenova T.V., Aksenov V.V.
  - **On the issue of monitoring power quality** Voloshko A.V., Kharchuk A.L.
- 86 Methods of researching electromagnetic processes in transformer windings influenced by power system overvoltage Nykonets A.L., Venger V.P., Venger V.P.
- 99 Poisson ratios of alkali-haloid crystals. P. III. Potassium halogenide Belomestnykh V.N., Soboleva E.G.
- 105 Investigation of metal damage by thermodynamic method Kurilenko G.A.
- 111 Diagnostics of welded joints failure while welding Apasov A.M.
  - 2 Decision-making model based on linear regression for planning a re-fracturing at the UV, formation of Nivagalskoe oilfield Sabitov R.R., Shvechikov E.D.

УДК 622.243.95

## ПРОБЛЕМЫ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ СПОСОБОВ БУРЕНИЯ СКВАЖИН И ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИХ РЕШЕНИЯ

#### Ковалев Артем Владимирович,

ассистент каф. бурения скважин Института природных ресурсов ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: arteka011287@mail.ru

#### Рябчиков Сергей Яковлевич,

д-р техн. наук, профессор каф. бурения скважин Института природных ресурсов ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: kafedrabs@mail.ru

#### Алиев Фарух Рамизович,

студент каф. бурения скважин Института природных ресурсов ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: faruh\_aliev@mail.ru

#### Якушев Денис Андреевич,

студент каф. теоретической и прикладной механики Института физики высоких технологий ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: joe7319@tpu.ru

#### Горбенко Вячеслав Михайлович,

студент каф. бурения скважин Института природных ресурсов ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: gorbenkovm@mail.ru

**Цель работы:** выявить наиболее перспективный способ бурения скважин в интервалах крепких горных пород и перспективные направления дальнейших исследований.

**Методы исследований:** анализ и обобщение результатов ранее проведенных теоретических и экспериментальных исследований.

**Результаты.** Доказана перспективность гидродинамических способов разрушения горных пород. Разработана классификация гидродинамических способов разрушения горных пород по признаку характера силового воздействия на забой. По данной классификации все гидродинамические способы разделяются на 3 группы: эрозионные, абразивные и комбинированные. Анализ гидродинамических способов показал, что применительно к бурению скважин в крепких горных породах наиболее перспективным является гидромониторно-абразивный способ, реализуемый с помощью шароструйного бурения, который реализуется с помощью специального инжекторного аппарата, осуществляющий непрерывную циркуляцию шаров в призабойной зоне до их полного изнашивания. Проанализирован принцип работы шароструйного аппарата, а также основные результаты теоретических и экспериментальных исследований шароструйного сособа бурения скважин. Сформулированы достоинства способа, а также недостатки, сдерживающие его внедрение на производстве. На основании этого выявлены перспективные направления дальнейших исследований. К ним относятся: совершенствование конструкций шароструйных снарядов; поиск путей увеличения механической скорости бурения и снижение затрат энергии на разрушение горной породы на забое скважины; разработка технических средств шароструйного бурения, обеспечивающих увеличение рейсовой скорости бурения; разработка гидравлической программы промывки скважины; исследование влияния типа и свойств промывочной жидкости на эффективность шароструйного бурения; анализ гранулометрического состава шлама.

#### Ключевые слова:

Разрушение горных пород, гидродинамические способы разрушения горных пород, породоразрушающий инструмент, шароструйное бурение, шароструйный снаряд, крепкие горные породы.

#### Анализ гидродинамических способов разрушения горных пород

Разрушение горных пород (РГП) при бурении скважин осуществляется двумя основными способами [1]: механическим, который получил наибольшее распространение, и физическими, которые находятся в стадии изучения или применяются в ограниченных объемах. По мнению ряда авторов одним из наиболее перспективных является гидродинамический способ РГП, осуществляемый высокоскоростной струей жидкости. Данным способом на забой скважины можно передавать значительные мощности. Этот способ легко вписывается в существующую технологию бурения механическими способами, при которой для промывки скважины на забой подается промывочная жидкость.

Авторами предложена классификация (рис. 1) гидродинамических способов разрушения горных пород (РГП) по признаку характера силового воздействия на забой. По данному признаку все гидромеханические способы РГП можно разделить на 3 группы: эрозионные, абразивные и комбинированные.

Разрушение горных пород при реализации эрозионных способов осуществляется высоконапорной струей жидкости. Взаимодействуя с разрушаемым материалом, струя создает нормальные давления за счет гидравлического удара и касательные напряжения, вызываемые радиальным течением жидкости (эрозия). Данному способу присуще также разрушение горных пород путем их растворения в промывочной жидкости. При высоких скоростях жидкости процесс разрушения может интенсифицироваться за счет кавитационной эрозии.

Наиболее полно изученным в группе эрозионных способов является *гидромониторный* способ РГП, при котором разрушение осуществляется непрерывной высоконапорной струей жидкости, движущейся с большой скоростью. Основные исследования гидромониторного способа бурения проводились в 70–80 гг. прошлого столетия в США, СССР, Голландии и Японии. Подробные результаты исследований приводятся в работах [2–4]. Установлено, что на забой можно передавать большую гидравлическую мощность, при этом скорость проходки возрастает в 5–8 раз по сравнению с шарошечными долотами.

Основными преимуществами гидромониторного бурения являются:

- простота конструкции породоразрушающего инструмента (ПРИ), отсутствие быстроизнашивающихся элементов;
- отсутствие необходимости в создании высоких осевых нагрузок на ПРИ;
- возможность бурения с малой частотой вращения ПРИ (а также без вращения).

Однако данный способ является очень энергоемким, так для эффективного разрушения забоя эрозионным способом необходимы высокие скорости жидкости (200–1000 м/с), а также, соответственно, высокие давления – не ниже 80–400 МПа. Таким образом, для его реализации необходим целый комплекс высоконапорного оборудования (насосов, вертлюгов, бурильных труб, уплотнений и др.).

При *гидроимпульсном* способе разрушение осуществляется за счет кратковременных импульсных нагрузках струи жидкости, которая обладает лучшей компактностью и дальнобойностью, большей разрушающей способностью по сравнению с непрерывной. Однако применение данного способа разрушения для бурения скважин сдерживается нерешенностью вопроса канализации энергии и рабочих компонентов на значительные расстояния.



**Рис. 1.** Классификация гидродинамических способов разрушения горных пород

#### Fig. 1. Classification of hydrodynamic methods of rock failure

Гидроударный способ заключается в разрушении горных пород гидравлическим ударом жидкости большой силы (реализация с помощью взрыва, электрического разряда в жидкости, создания вакуумных кавитационных полостей).

Разрушение электрогидравлическим способом происходит за счет электрического разряда в жидкости, сопровождающегося мощными гидравлическими и кавитационными ударами (эффект П.А. Юткина). Достоинствами данного способа являются малая энергоемкость и высокая выходная мощность. Однако способ малоэффективен при разрушении крепких горных пород (выше VI–VII категории по буримости).

Кавитационный способ осуществляется действием гидравлических ударных волн, возникающих в жидкости в момент удара ее и взвешенных в ней герметически закрытых капсул, из которых предварительно удален воздух. Способ обладает высоким разрушающим эффектом и имеет важную особенность: при одних и тех же параметрах вакуумной полости запас энергии и импульс давления в жидкости при ее смыкании увеличивается с ростом гидростатического давления, т. е. по мере углубления скважины при бурении. Однако серьезным препятствием для широкого применения способа являются малая выходная мощность и высокая стоимость капсул.

Сущность *абразивных* способов заключается в разрушении пород высоконапорной струей жидкости, содержащей во взвешенном состоянии абразивные частицы. При этом, помимо воздействия жидкости, разрушение горных пород происходит за счет многократного ударного действия абразивных частиц, что сопровождается и хрупкой, и пластической деформацией породы.

Основным представителем абразивного способа РГП является *гидромониторно-абразивный*, при котором разрушение осуществляется жидкостью, несущей абразивные частицы. По результатам обширных исследований способа применительно к бурению скважин [2–4] установлено, что гидромониторно-эрозионный способ весьма эффективен при бурении в абразивных породах, где стойкость обычного ПРИ мала. Он сохраняет преимущества, присущие гидромониторному способу. Однако для эффективного разрушения забоя скважины необходимы меньшие скорости жидкости (100–200 м/с). Существенными недостатками способа являются:

- повышенный износ насосного оборудования, циркуляционной системы и сопловых насадок ПРИ;
- необходимость в большом количестве абразивных частиц (до 200 т для бурения глубокой скважины);
- большая вероятность прихвата бурильной колонны при внезапной остановке циркуляции промывочной жидкости;
- невозможность бурения в пластичных несцементированных горных породах.

Одним из направлений реализации гидромониторно-эрозионного способа РГП является так называемое шароструйное бурение, предложенное в 1955 г. американской нефтяной компанией «Картер Ойл К°». Данный способ реализуется с помощью специального инжекторного аппарата, который осуществляет непрерывную циркуляцию шаров в призабойной зоне до их полного изнашивания. При этом нет необходимости в большом количестве шаров, модернизации циркуляционной системы.

Гидроударно-эрозионный способ РГП представляет собой комбинацию гидроударного и эрозионного способов. При этом разрушение осуществляется под действием гидравлических ударов жидкости большой частоты и ударами твердых частиц, насыщающих эту жидкость. Однако низкая выходная мощность и КПД делают гидроударно-эрозионный способ неперспективным для бурения скважин.

Каждый из рассмотренных выше способов РГП наряду с достоинствами имеет недостатки, которые снижают показатели его работы в определенных условиях. Поэтому в практике бурения намеренно прибегают к комбинации различных способов РГП, что обычно повышает их эффективность, расширяет область применения. При этом один из способов является основным (ведущим). Можно выделить группу комбинированных способов РГП, в которых сочетается механический способ с эрозионным или абразивным, что обеспечивает рост эффективности разрушения горных пород без увеличения мощности бурового оборудования и расхода жидкости.

Механоэрозионный и механоабразивный способы реализуются в распространенном сегодня гидромониторно-вращательном способе РГП. При бурении механоэрозионным способом, который реализуется в гидромониторных долотах, разрушение струей воды носит вспомогательный характер и эффективно лишь в мягких горных породах. Примером реализации *механоабразивного* способа является бурение гидромониторными долотами с использованием жидкости с абразивом либо шламом для интенсификации процесса разрушения.

Эрозионномеханический и абразивномеханический способы РГП реализуются в конструкциях долот для гидромониторного и гидромониторноэрозионного бурения. Существенным недостатком долот, реализующих эрозионный и абразивный способы РГП, является формирование криволинейной формы забоя скважины, в связи с чем снижается механическая скорость бурения или останавливается процесс углубки скважины. Поэтому использование породоразрушающих элементов долота, реализирующих механическое воздействие, повышает их эффективность.

Анализ гидродинамических способов РГП показал, что применительно к бурению скважин в крепких горных породах (выше VII–VIII категории по буримости) ни один из способов первой группы (эрозионные способы) не может быть успешно реализован на практике из-за большой энергоемкости.

Комбинированные способы РГП не представляют большого практического интереса для бурения скважин из-за значительной сложности технологии и технических средств для их реализации, а также высокой аварийности породоразрушающего инструмента.

Из группы абразивных способов РГП наиболее перспективным является гидромониторно-абразивный способ, реализуемый с помощью шароструйных аппаратов (рис. 2), осуществляющих непрерывную циркуляцию шаров в призабойной зоне. Принцип действия шароструйного аппарата следующий: рабочая жидкость, подводимая к аппарату с большой скоростью, проходит камеру подвода рабочей жидкости – 1, ускоряется в сопле – 2 и на выходе из него истекает с большой скоростью в камеру смешения – 3. При этом в пространстве, окружающем выход сопла с внешней стороны, образуется зона разряжения. В корпусе аппарата выполнены впускные окна -4, через которые благодаря разряжению происходит всасывание рабочей жидкости со взвешенными шарами – 6 и частицами шлама – 7 из затрубного пространства. Далее двухфазная смесь проходит через камеру смешения, поступает в диффузор -5 и ударяется о горную породу -8, осуществляя разрушение.

В процессе исследований [5–7] было установлено, что наибольшая механическая скорость проходки наблюдается в случае использования шаров максимально возможного диаметра, не заклинивающихся в камере смешения струйного насоса. Использование глинистого раствора обусловило падение скорости бурения на 25 %, а воздуха – на 75 % по сравнению с использованием воды.



- Рис. 2. Схема работы шароструйного аппарата: 1) камера подвода рабочей жидкости; 2) сопло; 3) камера смешения; 4) впускные окна; 5) диффузор; 6) шары; 7) частицы шлама; 8) горная порода
- Fig. 2. Diagram of impact apparatus functioning: 1) chamber of working fluid input; 2) injection head; 3) mixing chamber; 4) admission ports; 5) diffuser; 6) balls; 7) sludge particles; 8) rock

# Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований шароструйного способа бурения скважин

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований было сделано заключение о возможности «производить разрушение горных пород с заметной скоростью, что показывает принципиальную возможность бурения скважин ударами шаров» [5]. Однако уже через пять лет (в 1961 г.) один из участников этих исследований Л.У. Леджервуд отмечал: «Импульсное шариковое бурение не имеет практического применения. На достигнутом уровне с его помощью можно разрушать горные породы, но с экономической точки зрения этот процесс значительно менее выгоден, чем обычное вращательное бурение» [6. С. 240].

Анализируя результаты американских ученых, А.Б. Уваков указывал на их не совсем объективные выводы [8], так как они делали акцент на выявление физической сущности работы шароструйных аппаратов, а вопросам разрушения горных пород уделялось неоправданно мало внимания. Так, например, при бурении различных по крепости горных пород скорость вылета шаров из аппарата была неизменной.

Крупномасштабные исследования данного способа бурения были продолжены в 1963 г. в Казахстане. В результате проведенных исследований [8-10] были решены следующие вопросы, имеющие важное научное и практическое значение для совершенствования шароструйного способа бурения скважин:

- сформулирована версия механизма разрушения горных пород ударами шаров;
- выявлены основные аналитические зависимости, характеризующие процесс разрушения горных пород ударами шаров;
- выявлены основные факторы, влияющие на скорость шароструйного бурения;
- разработана методика выбора и расчета основных геометрических параметров шароструйного аппарата;
- разработана методика расчета процессов шароструйного бурения;
- разработаны и испытаны различные конструкции шароструйных снарядов;
- разработана методика направленного бурения скважин и изучены основные закономерности искусственного искривления шароструйными отклонителями.

Авторами установлено, что при разрушении той ли иной горной породы существует оптимальная скорость соударения шаров с забоем (40-180 м/с), которая зависит от упругих свойств материала шаров и горной породы, диаметра и плотности шаров, динамической твердости горной породы. Скорость шароструйного бурения в режиме усталостного разрушения с увеличением твердости горных пород уменьшается, а в режиме оптимального разрушения - увеличивается. Эта зависимость является одной из самых важных, несвойственных ни одному из существующих механических способов РГП. В оптимальном режиме износ шаров и шароструйного аппарата будет минимальным вследствие исключения отскока шаров от забоя. Скорость проходки при этом может быть достигать 20 м/ч в породах VII-XI категорий по буримости.

Результаты исследований С.А. Заурбекова [11] сводятся к следующему:

- получена количественная оценка рациональных параметров призабойных процессов при шароструйном бурении;
- разработан шароструйный снаряд с первичным и вторичным соплами кольцевой (щелевидной) формы и опорой по центру;
- установлены рациональные параметры натурного шароструйного снаряда и уточнены условия, обеспечивающие эффективность его работы;
- разработана методика расчета и конструирования шароструйных снарядов.

Промышленные испытания показали превышение механической скорости бурения на 20 % и проходки на долото на 43 % по сравнению с серийными долотами. Бурение осуществлялось в интервале 500–1100 м по породам средней крепости при следующих параметрах режима бурения: расход жидкости – 30 л/с, осевая нагрузка – 10 кН, частота вращения – 90 об/мин, плотность бурового раствора – 1060 кг/м<sup>3</sup>. На основании вышеизложенного можно отметить ряд преимуществ шароструйного бурения:

- возможность реализации на забое скважины большой мощности;
- значительная продолжительность рейса, которая будет ограничиваться лишь износостойкостью шароструйного аппарата, т. к. заменять износившиеся шары можно подсыпанием их в скважину;
- простота конструкции шароструйного аппарата;
- отсутствие необходимости в создании высоких осевых нагрузок на ПРИ;
- возможность бурения с малой частотой вращения ПРИ (а также без вращения), что позволяет уменьшить износ бурильных труб, упростить условия для проходки направленных скважин.

#### Выбор и обоснование перспективных направлений дальнейших исследований

Достоинства шароструйного бурения указывают на принципиальную возможность и экономическую целесообразность его использования для проходки крепких и очень крепких горных пород. Однако при разработке данного способа РГП не решено ряд проблем, сдерживающих его внедрение на производстве.

Не умаляя важности остальных звеньев комплекса буровой техники для шароструйного бурения, можно утверждать, что ключевым звеном является ПРИ, т. к. именно он реализует поступающую на забой скважины энергию в процесс взаимодействия шаров с породой. В процессе исследований был проведен большой объем поисковых работ, в результате которых созданы различные конструкции шароструйных снарядов [12–19]. На наш взгляд, они имеют ряд существенных недостатков. Дальнейшее совершенствование снарядов возможно за счет решения следующих задач:

- создания снарядов, обеспечивающих формирование плоской формы периферийной части забоя и достаточную разработку стенок скважины;
- создания систем управления циркуляцией шаров в призабойной зоне;
- обеспечения возможности регулирования расстояния между струйным аппаратом и забоем;
- корректировки работы струйного аппарата без подъема колонны бурильных труб.

Одной из основных задач дальнейшего совершенствования шароструйного способа РГП является поиск путей повышения скорости бурения и снижения затрат энергии на разрушение породы на забое. Известно, что при работе струйного аппарата в камере смешения образуется турбулентный режим течения, связанный с течением рабочего и инжектируемого потоков, что приводит к износу камеры смешения и уменьшению дальнобойности струи. Судя по открытию Ю.П. Конюшей, при высокочастотном звуковом облучении струи жидкости в диапазоне числа Струхаля s=2-5 вблизи сопла в приосевой части струи наблюдается уменьшение нормальных и сдвиговых рейнольдсовых напряжений, что приводит к увеличению длины начального участка и вследствие этого к возрастанию дальнобойности струи [20]. Для реализации этого эффекта возможно использование измененной геометрии струйного течения, которое обуславливает возникновение самовозбуждения струи [21]. При этом будет иметь место интенсификация процессов разрушения горных пород за счет эффекта кавитации.

Известно [8], что процесс проходки скважин при шароструйном бурении складывается из ряда последовательных операций: а) доставка на забой порции шаров; б) спуск шароструйного снаряда в скважину; в) бурение; г) подъем снаряда; д) извлечение шаров. Поэтому совершенствование технологии шароструйного бурения возможно за счет разработки технических средств для доставки и извлечения шаров, разработки средств автоматизации и контроля за процессом углубки, оптимизации всех перечисленных операций.

Ряд американских авторов [5, 7], основываясь на результатах исследований по изучению распределения гидравлической энергии бурового насоса при шароструйном бурении, пришли к выводу о низком значении его КПД, не превышающем 3  $\,\%$  , что связано с низким значением КПД струйных аппаратов (30-40 %). Основываясь на этих результатах, в отечественной литературе некоторые исследователи [4] характеризовали «ударно-дробовой способ бурения» как малоперспективный для бурения глубоких скважин. В.В. Штрассер опровергнул это мнение, доказав, что на разрушение породы затрачивается около 6-8 % поверхностной энергии [10]. Однако ни одним из исследователей не была разработана методика гидравлического расчета промывки скважины при шароструйном бурении, в которую входит выбор параметров и расхода жидкости, расчет давлений, выбор типа и числа насосов и режимов их работ. Кроме того, в рамках этих исследований можно провести оценку применимости способа для бурения глубоких скважин с использованием современной серийно выпускаемой буровой техники.

Проведенные исследования показали, что наибольшие механические скорости бурения наблюдаются при использовании в качестве промывочной жидкости воды [5]. Однако при шароструйном бурении к промывочным жидкостям предъявляют целый ряд дополнительных требований, которым не отвечает вода. Известно, что при ударах шаров забой покрывается сетью трещин, в связи с чем возможно эффективное использование понизителей твердости [9]. Поэтому актуально исследование и разработка различных рецептур промывочных жидкостей для шароструйного бурения.

Энергетическая картина процесса шароструйного бурения является очень важной для обоснованного выбора параметров долот, породоразрушающих частиц и режимов бурения, обеспечивающих максимальную эффективность бурения. В работе [9] приведены зависимости энергоемкости разрушения от твердости горных пород и размеров шаров. Однако энергоемкость разрушения не была увязана со шламовыми характеристиками. Детальный анализ гранулометрического состава шлама позволит с высокой точностью исследовать

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Сулакшин С.С., Чубик П.С. Разрушение горных пород при проведении геологоразведочных работ. – Томск ТПУ, 2011. – 367 с.
- Кожевников А.А., Давиденко А.Н. Гидромеханический и эрозионный способы разрушения горных пород при бурении скважин – М.: ВИЭМС, 1987. – 45 с.
- 3. Маковей Н. Гидравлика бурения. М.: Недра, 1986. 536 с.
- Максимов В.И. Новые способы бурения скважин М.: ВИ-ЭМС, 1971. – 55 с.
- Eckel I.E., Deily F.H., Ledgerwood L.W. Development and testing of jet pump pellet impact drill bits // Transaction AIME. – 1956. – V. 207. – P. 135–150.
- Леджервуд Л.У. Обзор работ по созданию усовершенствованных способов бурения нефтяных скважин / пер. с англ. – М.: ГОСИНТИ, 1961. – 258 с.
- Маккрей Л.У., Коле Ф.У. Технология бурения нефтяных скважин. – М.: Гостоптехиздат, 1963. – 417 с.
- Уваков А.Б. Шароструйное бурение. М.: Недра, 1969. 207 с.
- Уваков А.Б. Исследование и разработка шароструйного способа бурения направленных геологоразведочных скважин: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1965. – 120 с.
- Штрассер В.В. Исследование процессов разрушения горных пород ударами шаров (к теории шароструйного бурения): дис. ... канд. техн. наук. – Алма-Ата, 1966. – 217 с.
- Заурбеков С.А. Повышение эффективности призабойных гидродинамических процессов при шароструйном бурении скважин: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Алматы, 1995. – 18 с.
- Hydraulic standoff control for pellet impact drilling: пат. 2724574 США. № 268883; заявл. 29.01.1952; опубл. 22.11.1955, Бюл. № 8. - 6 с.

зависимость энергоемкости разрушения горных пород от различных технологических факторов и разработать методику выбора рациональных режимных параметров бурения скважин в различных горных породах.

- Шароструйный снаряд для бурения скважин: пат. 417599 Рос. Федерация. № 1451266; заявл. 15.06.1970; опубл. 28.02.1974, Бюл. № 8. – 2 с.
- Способ эрозионного бурения скважин и устройство для его осуществления: пат. 870705 Рос. Федерация. № 2798122/22-03; заявл. 18.07.1979; опубл. 07.10.1981, Бюл. № 37. 3 с.
- Устройство для шароструйного бурения скважин: пат. 1120733 Рос. Федерация. № 3597561; заявл. 31.05.1983; опубл. 15.08.1986, Бюл. № 30. – 4 с.
- Устройство для шароструйного бурения скважин: пат. 2124620 Рос. Федерация. № 97100372/03; заявл. 14.01.1997; опубл. 10.01.1999, Бюл. № 16. – 3 с.
- 17. Пристрій для буріння: пат. 81068 № u201212576 Україна, МПК Е 21 В 7/00; заявл. 05.11.2012; опубл. 25.06.2013; Бюл. № 12.
- Кулькоструминний прилад: пат. 68322 № u201109643 Україна, МПК Е 21 В 7/18; заявл. 02.08.2011; опубл. 26.03.2012; Бюл. № 6.
- Давиденко А.Н., Игнатов А.А. Абразивно-механическое ударное бурение скважин: монография. – Днепропетровск: НГУ, 2013. – 110 с.
- Конюшая Ю.П. Открытия советских учёных. Ч. 1: Физикотехнические науки / предисл. И.С. Наяшкова. – 3-е изд., доп. – М.: Изд-во МГУ, 1988. – 478 с.
- Гиневский А.С, Власов Е.В., Каравосов Р.К. Акустическое управление турбулентными струями. – М.: ФИЗМАТ ЛИТ, 2001. – 240 с.

Поступила 14.06.2013 г.

#### UDC 622.243.95

## PROBLEMS OF HYDRODYNAMIC METHODS OF WELLS DRILLING AND THE MAIN DIRECTIONS IN THEIR SOLUTION

#### Artyom V. Kovalyov,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: arteka011287@mail.ru

#### Sergey Ya. Ryabchikov,

Dr. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: kafedrabs@mail.ru

#### Farukh R. Aliev,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: faruh aliev@mail.ru

#### Denis A. Yakushev,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: joe7319@tpu.ru

#### Vyacheslav M. Gorbenko,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: gorbenkovm@mail.ru

The main aim of the study is to find out the most effective drilling method in hard rocks and perspective directions of future researches.

The methods used in the study: the analysis and generalization of theoretical and experimental results.

**The results.** The research proves the perceptivity of hydrodynamic methods of rock destruction. The authors developed the classification of hydrodynamic rock destruction methods based on the character of impact on the bottom hole. In accordance with the developed classification, all hydrodynamic methods are divided into 3 groups: erosive, abrasive and combined cutting. The analysis of hydrodynamic methods revealed that jetting-abrasive method provided by pellet impact drilling is the most effective while drilling hard rocks. This method is realized by implementation of ejector that realizes continuous circulation of pellets in bottom hole zone up to their full deterioration. The authors analyzed the operation mode of pellet impact drill bit, as well as theoretical and experimental researches. The pellet impact drilling advantages and disadvantages that limit its implementation were determined. As a result, the study provided a new trend for current researches, namely: perfection of pellet impact drill bit construction, search for drilling rate increase and reduction of development of well flushing-out program, research of drilling fluid influence for effectiveness of this method of drilling, study of slime grain size.

#### Key words:

Rock failure, hydrodynamic methods of rock failure, rock destruction tool, pellet impact drilling, pellet impact apparatus, hard rock.

#### REFERENCES

- Sulakshin S.S., Chubik P.S. Razrushenie gornykh porod pri provedenii geologorazvedochnykh rabot [Rock destruction on geologic prospecting works]. Tomsk, TPU Publ. house, 2011. 367 p.
- Kozhevnikov A.A., Davidenko A.N. Gidromekhanichesky i erozionny sposoby razrusheniya gornykh porod pri burenii skvazhin [Hydromechanical and erosional methods of rock destruction while drilling]. Moscow, VIEMS publ., 1987. 45 p.
- Makovey N. Gidravlika bureniya [Hydraulic of drilling]. Moscow, Nedra Publ., 1986. 536 p.
- 4. Maksimov V.I. *Novye sposoby bureniya skvazhin* [New methods of well drilling]. Moscow, VIEMS Publ., 1971. 55 p.
- Eckel I.E., Deily F.H., Ledgerwood L.W. Development and testing of jet pump pellet impact drill bits. *Transaction AIME*, 1956, vol. 207, pp. 135–150.
- Ledzhervud L.U. Obzor rabot po sozdaniyu usovershenstvovannykh sposobov bureniya neftyanykh skvazhin [Review of works on developing the improved methods for oil drilling]. Moscow, GOS-INTI publ., 1961. 258 p.
- Makkrey L.U., Kole F.U. Tekhnologiya bureniya neftyanykh skvazhin [Technology of drilling oil wells]. Moscow, Gostoptekhizdat Publ., 1963. 417 p.
- Uvakov A.B. Sharostruynoe burenie [Pellet impact drilling]. Moscow, Nedra Publ., 1969. 207 p.
- Uvakov A.B. Issledovanie i razrabotka sharostruynogo sposoba bureniya napravlennykh geologorazvedochnykh skvazhin. Dis. Kand. nauk [Investigation and developing pellet impact drilling directional and exploration wells. Cand. Diss.]. Moscow, 1965. 120 p.
- Shtrasser V.V. Issledovanie protsessov razrusheniya gornykh porod udarami sharov (k teorii sharostruynogo bureniya). Dis. Kand. nauk [Investigation of rock destruction by ball hits (to the theory of pellet impact drilling). Cand. Diss.]. Alma-Ata, 1966. 217 p.

- Zaurbekov S.A. Povyshenie effektivnosti prizaboynykh gidrodinamicheskikh protsessov pri sharostruynom burenii skvazhin. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Improving the efficiency of hydrodynamic bottomhole processes in the pellet impact drilling. Cand. Diss. Abstract]. Almaty, 1995. 18 p.
- 12. Ledgerwood L.W. Hydraulic standoff control for pellet impact drilling. Patent USA, no. 268883, 1955.
- Uvakov A.B. Sharostruyny snaryad dlya bureniya skvazhin [Pellet impact apparatus for well drilling]. Patent RF, no. 1451266, 1974.
- Derbenev L.S. Sposob erozionnogo bureniya skvazhin i ustroystvo dlya ego osushestvleniya [Erosion well drilling method and device for its implementation]. Patent RF, no. 2798122/22-03, 1981.
- Dugartsyrenov A.V. Ustroystvo dlya sharostruynogo bureniya skvazhin [Device for pellet impact drilling]. Patent RF, no. 3597561, 1986.
- Zubkova T.N. Ustroystvo dlya sharostruynogo bureniya skvazhin [Device for pellet impact drilling]. Patent RF, no. 97100372/03, 1997.
- Ignatov A.O. Ustroystvo dlya bureniya [Device for drilling]. Patent Uk, no. u201212576, 2013.
- Ignatov A.O. Sharostruyny snaryad [Pellet impact apparatus]. Patent Uk, no. u201109643, 2012.
- Davidenko A.N., Ignatov A.A. Abrazivno-mehanisheskoe udarnoe burenie skvazhin [Abrasive-mechanical percussion drilling wells]. Dnepropetrovsk, NGU Press, 2013. 110 p.
- Konyushaya Yu.P. Otkrytiya sovetskikh uchenykh. Fizikotekhnicheskie nauki [Discoveries of soviet scientists. Engineering sciences]. Moscow, MGU Press, 1988. 478 p.
- Ginevskiy A.S., Vlasov E.V., Karavosov R.K. Akusticheskoe upravlenie turbulentnymi struyami [Sound control of turbulent jets]. Moscow, FIZMAT LIT Publ., 2001. 240 p.

Received: 14 June 2013.

УДК 622.831.325

## ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ РАСЧЁТА ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ В ВЫЕМОЧНЫЙ УЧАСТОК С УЧЁТОМ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И МЕТОДЫ ИХ РЕШЕНИЯ

#### Шубина Елена Андреевна,

аспирант кафедры транспорта и хранения нефти и газа Института природных ресурсов Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30; зам. директора по геологическому обеспечению ЗАО «Сибгеопроект», Россия, 650066, г. Кемерово, пр. Октябрьский, д. 286. E-mail: Lena shubina@mail.ru

#### Лукьянов Виктор Григорьевич,

д-р техн. наук, профессор-консультант кафедры транспорта и хранения нефти и газа Института природных ресурсов Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: lev@tpu.ru

Актуальность работы вызвана сложностью прогнозирования газодинамических процессов и их влияния на газовыделение в выемочный участок при отработке газоносных угольных месторождений, а также необходимостью использования горношахтного оборудования в соответствии с заявленной производительностью, исключая простои оборудования по газовому фактору в процессе добычи угля.

**Цель работы:** изучение процесса сдвижения углепородной толщи пологого падения, формирование газодинамических явлений и выявление проблемных вопросов расчёта газовыделения при отработке угольных месторождений с целью обеспечения безопасности добычи угля и метана в промышленных масштабах.

Авторы изучили геомеханические и газодинамические процессы, возникающие во время ведения горных работ при отработке газоносных угольных месторождений. Рассмотрены проблемные вопросы расчёта газовыделения в выемочный участок. Предложены методы снижения природной газоносности к моменту начала ведения горных работ, в части комплексного подхода к схеме размещения геологоразведочных скважин на стадии составления проекта разведочных работ, и использование данных скважин для различных видов дегазации угольных пластов и добычи метана в промышленных масштабах. Выполнение предложенных методов позволит исключить возможность внезапного загазирования горных выработок и обеспечит безопасность ведения горных работ на угольных шахтах.

**Результаты.** Заблаговременная дегазация рабочих пластов и пластов спутников с помощью геологоразведочных скважин до начала отработки месторождения подземным способом позволит существенно снизить газовыделение в подготовительный забой и выемочный участок, обеспечивая безопасную добычу газа и угля. Использование геологоразведочных скважин в качестве дегазационных снижает затраты на проведение мероприятий по снижению природной газоносности, а также позволяет вести самостоятельную добычу метана в промышленных масштабах.

#### Ключевые слова:

Метан, природная газоносность, скважина, дегазация, безопасность горных работ, выделение газа, газодинамические процессы, угольный пласт, выемочный (очистной) участок.

В связи с развитием угледобывающей промышленности неизбежно происходит увеличение глубины ведения горных работ, следовательно, и увеличение природной газоносности разрабатываемых угольных пластов, что существенно влияет на безопасность ведения работ, объёмы добычи угля, попутно добытого газа и загрязнение окружающей среды.

Высокая природная газоносность создаёт настолько повышенное метановыделение в выработанное пространство и горные выработки, что её снижение возможно только с применением комплексной дегазации угольных пластов, т. е. совмещения различных способов или схем дегазации одного или нескольких источников газовыделения.

К методам дегазации, позволяющим снижать природную газоносность до начала ведения очистных работ, относятся: барьерная и предварительная дегазация. Также к данным методам относится недостаточно применяемая в России заблаговременная дегазация [1]. Проблемы горнодобывающих предприятий, связанных с газоносностью угольных месторождений, изучаются многими научными институтами России, но сложность горно-геологических условий и процесса добычи угля, сопровождающегося обильным газовыделением, обязывает нас ещё более тщательно заниматься данными проблемами.

На сегодняшний день подтверждена необходимость системного решения проблем угольного метана (энергетической, экологической и промышленной безопасности) для обеспечения возможности включения шахтного метана в топливноэнергетический баланс; прогноз и проектирование добычи метана из шахтных полей должны проводиться с учетом особенностей его извлечения на разных стадиях освоения месторождений.

Энергетической стратегией России до 2030 г. предусматривается сокращение доли природного газа как топлива в большой электроэнергетике и замещение его углём, указывается на необходимость создания экологически чистых, высокоэффективных газопаротцурбинных установок комбинированного цикла с внутрицикловой углегазификацией. Газификация угля – технологическая основа концепции и является одним из возможных технологических решений [2].

При подземной газификации угля сырой газ обладает теплотворной способностью 10–11 МДж/м<sup>3</sup>, на базе такого газа возможно получение заменителя природного газа [3].

Однако анализ текущего состояния и перспектив российского топливно-энергетического комплекса указывает на угрожающе надвигающееся истощение «газовой манны» и необходимость в ближайшее десятилетие перехода от газовой стратегии к газовоугольной, а в дальнейшем и к углегазовой [4]. В данной ситуации не малая роль будет отведена добыче метана из угольных пластов путём их дегазации.

На сегодняшний день в России уже появились компании активно и успешно занимающиеся энергетическими проблемами, их работы отмечены высокими наградами в США 20 ноября 2013 г. на конференции Total Energy USA, что говорит о том, что инновационные российские разработки по целому ряду показателей – результативности, экономичности, экологической безупречности – превосходят известные зарубежные аналоги [5–7].

Процесс увеличения интенсивности добычи угля влечёт возрастание объемов выделения газа, что делает попутную добычу метана экономически целесообразной при промышленном его использовании.

Важнейшими объектами дегазации в период ведения горных работ и после их окончания являются выработанные пространства, аккумулирующие значительные объемы метана в свободном состоянии. Основная особенность этого источника выделения газа в вентиляционно-дегазационные системы шахт – наличие аэродинамической связи с горными выработками, оконтуривающими зоны обрушения, что позволяет управлять метановоздушными потоками путем перераспределения аэродинамических параметров в вентиляционной сети.

На основе исследований распределения параметров фильтрационных потоков в выработанных пространствах предложены аэродинамические критерии эффективности извлечения метана, определяющие условия извлечения кондиционных метановоздушных смесей из выработанных пространств действующих газообильных угольных шахт [8].

Перспективными участками для производства заблаговременной дегазации на основе гидрорасчленения пласта являются участки с природной газоносностью более 8 м<sup>3</sup>/т сухой беззольной массы (с.б.м.) и при их залегании в водонепроницаемых породах не ниже средней устойчивости [9–13].

Разработаны технологии ВАГИДЭС и ЛАВО-ПОР, которые являются уникальными и позволяют заблаговременно провести дегазацию массива или его разгрузку от повышенных напряжений, т. е. привести в безопасное состояние массив горных пород на значительных площадях – до 200 тыс. м<sup>2</sup> (R~500 м) через скважины с поверхности; а через скважины, пробуренные из подземных горных выработок, – до 30 тыс. м<sup>2</sup> (R~200 м). Принцип работы заключается в следующем: возбуждая в пласте на заданном удалении от скважины упругие волны напряжений, амплитуда которых превышает предельные напряжения сжатия или предельные напряжения упругости, или ведя акустическое возбуждение литологического разреза в пределах упругих напряжений, в результате можно получить пространственные зоны различных его состояний или регулировать механические свойства горной породы по необходимости [14]. Современные технологии заблаговременной дегазации скважинами с поверхности позволяют извлекать 70...90 % общего содержания метана. Имеются случаи извлечения метана со средней природной газоносностью 3...4 м<sup>3</sup>/т (с.б.м.) [15].

Правительство РФ постановлением № 315 от 25.04.2011 г. установило обязательное проведение дегазации угольных пластов при превышении природной газоносности 13 м<sup>3</sup>/т с.б.м. В странах с более развитой угольной промышленностью в целях обеспечения безопасных условий труда данный порог уже снижен до 9 м<sup>3</sup>/т с.б.м. В связи с многочисленными взрывами на угольных шахтах вопрос о снижении порога до 9 м<sup>3</sup>/т уже рассматривается и в РФ, но пока всё остается без изменений.

Следовательно, в будущем при отработке участков с природной газоносностью 13...30 м<sup>3</sup>/т с.б.м. заблаговременная дегазация неизбежно перейдёт в разряд необходимых мероприятий.

Кроме того, в зависимости от величины относительной метанообильности производится установление категории шахты по метану. Таким образом, согласно п. 267 «ПБ в угольных шахтах», при относительной метанообильности 15 м<sup>3</sup>/т и более шахту относят к категории «сверхкатегорной» [16].

В таких странах, как Польша, Чехия, Великобритания, уже пересмотрено отношение к выбросам метана в атмосферу и решение данного вопроса направлено в сторону утилизации и использования метана в промышленности.

Существенные изменения в проектировании, разработке и финансировании проектов, выборе оптимальной технологии качества и количества добываемого газа имеются в Германии. Ранее газ из нетронутых пластов в Германии не использовался из-за неблагоприятных условий его извлечения; извлечение метана из действующих шахт диктовалось необходимостью обеспечить безопасность труда шахтеров. На сегодняшний день разработаны технологии добычи и использования метановой смеси из заброшенных шахт [17].

Таким образом, дренаж метана должен обеспечить предотвращение взрывов метана и эффективное использование добытого газа. Рассматривая теоретические возможности данной задачи и в первую очередь в отношении расположения скважин, необходимо руководствоваться нормативными документами, регламентирующими их количество и глубину [14].

Применяя разведочную сеть в соответствии с «Методическими рекомендациями...» [18] помимо решения задач, поставленных геологическим заданием в соответствии со стадией геологоразведочных работ, можно предусмотреть возможность проведения в дальнейшем и заблаговременной дегазации проектируемого участка с использованием планируемых скважин. Данные скважины необходимо временно консервировать на период составления геологического отчёта, выделения запасов метана и их утверждения.

Количество скважин, их глубина и расположение, конечно же, зависят от многих факторов, которые рассматриваются индивидуально по каждому участку, так же как и направление бурения. Но цель бурения данных скважин не сводится только к геологическому изучению месторождения, она также направлена на дальнейшее использование проектируемых скважин для борьбы с повышенным газовыделением и его источниками.

Основными источниками газывыделения при ведении горных работ являются: угольный пласт, породы кровли, почвы, отбитый уголь, пласты спутники, отщепившиеся угольные пачки и т. д. Учитывая природную газоносность участка недр, согласно «Руководству по проектированию вентиляции угольных шахт» производится расчёт газообильности в горные выработки и выемочные участки [19].

В нетронутом массиве горные породы находятся в состоянии напряженного равновесия. При ведении очистных работ равновесие в массиве нарушается и происходит сложное многообразие не в полной мере изученных процессов. На сегодняшний день имеется несколько гипотез (научных предположений) о проявлениях горного давления в зонах очистных работ.

Горное давление – это силы (напряжения), возникающие в массиве пород, окружающих горную выработку. Оно проявляется в виде прогиба кровли, вспучивания почвы, растрескивания, сдвижения, деформации и разрушения пород вокруг выработки, раздавливания и отжима целиков угля, увеличения нагрузки на крепь, внезапных выбросах угля и газа, горных ударов и пр.

Горное давление зависит от глубины расположения выработки, физико-механических свойств горных пород (трещиноватости, крепости, управляемости, обрушаемости и т. д.), мощности, угла залегания пластов, размера поперечного сечения выработки, способов выемки угля, механической характеристики крепи и многих других параметров.

Проявление процесса сдвижения и деформирования горных пород над очистными выработками происходит более интенсивно в лавах большой длины со значительной мощностью разрабатываемого пласта при управлении кровлей с полным обрушением. Условная схема процесса сдвижения углепородной толщи пологого падения при очистных работах представлена на рисунке.

В результате изучения горного давления и механики сдвижения горных пород над очистной выработкой установлено, что перемещение напластований горных пород кровли пласта начинается с прогиба, расслоений и появления зон повышенных деформаций – растяжений, сжатий. Когда деформации достигают предельных значений, слои кровли обрушаются, заполняя выработанное пространство. Вместе с тем метан, находящийся в сорбированном состоянии в углепородном массиве, высвобождается и заполняет возникшие пустоты и трещины.

Самое опасное динамическое воздействие оказывает зона активного горного давления от действующих очистных забоев в радиусе не менее 250 м от забоя во всех направлениях. Свободный



**Рисунок.** Условная схема процесса сдвижения углепородной толщи пологого падения при очистных работах **Figure.** Diagram of coal-rock flat pitch strata shift at broken working

газ, находящийся под высоким давлением в замкнутом пространстве, является основным источником энергии, вызывающим возникновение внезапных выбросов угля и газа в шахтах.

Внезапные выбросы при приближении забоя к опасным зонам происходят в результате совокупного разрушающего действия на призабойную часть пласта газового и переменного во времени повышенного горного давления, максимум которого приходится на момент обрушения основной кровли. Чем больше давление газа и мощность пласта, тем больше должно быть расстояние от забоя до границы опасной зоны.

Процессы обрушения основной кровли, сдвижение горных пород и сопутствующие им объёмы газовыделения имеют периодический характер с общим, единым периодом, который определяется шагами обрушения основной кровли [20]. В некоторых случаях, когда в кровле разрабатываемого пласта залегают пласты спутники или отщепившиеся угольные пачки, газовыделение становится настолько обильным, что концентрация метана мгновенно повышается до взрывоопасных значений, что приводит к остановке ведения очистных работ в связи с загазированием горных выработок.

При дальнейшем развитии процесса разгрузки обрушившиеся породы становятся опорой для вышележащих прогибающихся пород. По мере удаления от выработанного пространства вверх по нормали сдвижение пород приобретает более плавный характер деформаций-растяжений, сжатий, трещиноватость исчезает, сменяясь прогибом пород без разрыва сплошности и расслоений.

Для расчета шага обрушенния основной кровли на сегодняшний день разработаны различные методики. Но в связи с тем, что в расчётах используется сочетание ряда геолого-технологических составляющих, таких как: крепость пород, объёмный вес, мощность пород кровли, вынимаемая мощность, скорость подвигания очистного забоя и т. д., при получении фактических данных о посадке кровли возникают некоторые расхождения с расчётными показателями.

Причиной этого могут служить в первую очередь производственные нюансы, влияющие на скорость подвигания очистного забоя, а также изменение физико-механических свойств горных пород и мощности пород кровли в теле лавы, особенно в очистных забоях, имеющих большую длину. Так как формирование опасных зон, представленных на рисунке, напрямую зависит от технологии и

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Шубина Е.А., Брылин В.И., Лукьянов В.Г. Проведение заблаговременной дегазации угольных пластов с использованием геологоразведочных скважин // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 1. – С. 167–173.
- Воробьёв Б.М., Васючков Ю.Ф., Быкова М.Ю. Инновационная синэнергетическая высокоадаптивная и глубоко конверсионная концепция развития углегазовой энергетики России // Уголь. – 2012. – № 2. – С. 62–66.

скорости подвигания очистного забоя, то и их расчёт может стать достоверным только при стабильном плановом подвигании очистного забоя, которое учитывалось при расчёте газовыделения.

Из геологических факторов на увеличение газовыделения в выработанное пространство в первую очередь влияет газовыделение от отщепившихся угольных пластов и пластов-спутников, залегающих в кровле разрабатываемого пласта на расстоянии 35–40 вынимаемых мощностей, а также угольных пластов, залегающих в почве разрабатываемого пласта до глубины 35 м от почвы разрабатываемого пласта. Особенно сложно рассчитать газовыделение с таких пластов и пропластков, если в границах тела лавы значительно изменяется расстояние от разрабатываемого пласта до источника газовыделения.

#### Заключение

Таким образом, изменение геологических условий, технических возможностей в части стабильности подвигания очистного забоя и периодическая посадка основной кровли являются причинами, создающими погрешность в расчете общего газовыделения в выемочный участок. То есть геомеханические и газодинамические процессы, возникающие в результате ведения горных работ, являются взаимосвязанными процессами и представляют собой сложно прогнозируемую систему.

Увеличение природной газоносности угольных пластов и пропластков, низкий коэффициент эффективности предварительной дегазации и обильное газовыделение в выемочный участок обязывают научные и проектные институты уделять особое внимание обеспечению безопасности угледобычи.

Для решения проблемы снижения высокой природной газоносности к моменту начала ведения горных работ по пласту предлагается внедрение заблаговременной дегазации участка с применением геологоразведочных скважин, намеченных к бурению при производстве разведочных работ по проектируемому участку. Используя разведочные скважины в сочетании с различными схемами заблаговременной дегазации и методами воздействия на углепородный массив с целью повышения газоотдачи, можно существенно снизить природную газоносность, а также обеспечить безопасные условия труда, так как возникает возможность дегазировать не только угольные пласты, имеющие рабочую мощность, но и пласт-спутники, пропластки и отщепивщиеся угольные пачки.

- Зоря А.Ю., Крейнин Е.В., Лазаренко С.Н. Новые возможности // Уголь Кузбасса. – 2009. – № 4. – С. 74–77.
- Vasyuchkov Yu., Vorobjev B., Vasyuchkov K. Unconventional mining technologies for clean and efficient power generation // Mining Engineering. - 1998. - April. - P. 65-69.
- Агеев П.Г., Стрельченко В.В., Агеев Н.П. Инновационная российская нанотехнология дает вторую жизнь бездействующим нефтяным и метаноугольным скважинам в США, Китае и России // Недропользование. – 2014. – № 1. – С. 26–31.

- Нефть, Газ и Бизнес 9'2013. Бездействующие скважины и метаноугольные пласты объекты применения инновационной российской технологии в США и Китае // Novas Energy Service. 2009. URL: http://novas-energy.ru/content/articles/index.php? article=3315 (дата обращения: 09.04.2014).
- Агеев П.Г., Стрельченко В.В. Казанцев О.Е. Интенсификация потока метана из угольных пластов методом плазменно-импульсного воздействия // Газовая промышленность. – 2013. – Сентябрь. – № 696. – С. 95–98.
- Каледина Н.О., Аношина И.М. Аэродинамические критерии эффективности извлечения метана из выработанных пространств действующих шахт // Научные школы Московского государственного горного университета. – 2008. – Т. 1. – С. 150–154.
- Пучков Л.А., Сластунов С.В., Федунец Б.И. Перспективы добычи метана в Печорском угольном бассейне. – М.: Изд-во МГГУ, 2004. – 557 с.
- Пучков Л.А., Сластунов С.В., Презент Г.М. Перспективы промышленного извлечения угольного метана // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2002. – № 6. – С. 6–10.
- Пучков Л.А., Сластунов С.В., Коликов К.С. Проблемы реализации концепции метанобезопасности на угольных шахтах России // Уголь. – 2009. – № 1. – С. 28–30.
- Проблемы разработки метаноносных пластов в Кузнецком угольном бассейне / Ю.Н. Малышев, Ю.Л. Худин, М.П. Васильчук и др. – М.: Изд-во Академии горных наук, 1997. – 463 с.

- Сластунов С.В. Заблаговременная дегазация и добыча метана из угольных месторождений. – М.: Изд-во МГГУ, 1996. – 441 с.
- Верниго В.М., Кульчицкий В.Б. Предупреждение горных ударов и внезапных выбросов в горнодобывающей промышленности // Горная Промышленность. – 2006. – № 4. – С. 6–7.
- Особенности заблаговременной дегазации угольных пластов методом бурения скважин с поверхности / П. Сикора, Д. Смыслов и др. // Глюкауф. – 2008. – № 1. – С. 38–45.
- 16. Правила безопасности в угольных шахтах (ПБ 05-618-03). Сер. 05. Вып. 11. – М.: Государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2003. – 296 с.
- 17. Willenbrink B. CBM Review: degassing development // World Coal. 2003. T. 12. № 3. C. 51-54.
- Методические рекомендации по применению классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Угли и горючие сланцы. Утв. МПР России от 5.06.2007 г. N 37-р. – М.: Изд-во ФГУ ГКЗ, 2007. – 34 с.
- Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. Утв. Мин. угольной промышленности СССР 15.08.1989 г. – Макеевка-Домбасс: Научно-исследовательский институт по безопасности работ в горной промышленности, 1989. – 315 с.
- Пак Г.А., Дрижд Н.А., Долгоносов В.Н. Взаимосвязь обрушений основной кровли с газодинамическими явлениями на угольных шахтах // Уголь. 2014. № 1. С. 56–58.

Поступила 11.04.2014 г.

#### UDC 622.831.325

## PROBLEMS IN CALCULATING GAS-MAKE IN THE OPERATING PANELS IN VIEW OF GEOMECHANICAL AND GAS-DYNAMIC PROCESSES, AND METHODS TO RESOLVE THEM

#### Elena A. Shubina,

Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. Email: Lena shubina@mail.ru

#### Viktor G. Lukyanov,

Dr. Sc., Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. Email: lev@tpu.ru

The relevance of the research is caused by the complexity in predicting gas-dynamic processes and their influence on gas-make in the operating panels when mining gas bearing coal deposits; as well as the need to utilise mining equipment in accordance with its specified capability, except the equipment downtime due to the gas factor at coal mining.

**The aim of the research** is to study the extraction of in-situ coal mass in small dip angles; to form gas-dynamic events and to identify the problems in calculating gas-make when mining coal deposits in order to ensure safety standards at coal and methane production on industrial scale.

The authors have studied geomechanical and gasodynamic processes which occur while mining at development of gas-bearing coal fields. The paper considers the problem issues of calculating gas release into an extraction district. The paper introduces the methods for decreasing natural gas content by the mining start relating to a complex approach to the scheme of exploration wells distribution at the stage of exploration works planning. The authors proposed to use these wells for different kinds of coal bed degasification and methane production in industrial scale. Application of the methods allows excluding the possibility of unexpected massive gas-make in mining heading and ensures safety regulations for mining in coal mines.

**Results.** Pre-production gas drainage of working and adjacent seams using exploratory boreholes prior to commencing mining of the deposit via underground method, will significantly reduce gas-make into development headings and production area, ensuring safe coal mining and gas extraction. Use of exploratory boreholes for gas drainage reduces the costs of implementing measures to reduce the natural gas content; it allows automated methane extraction on industrial scale.

#### Key words:

Methane, natural gas-bearing, hole, degassing, safety of mining operations, gas emission, gas-dynamic processes, coal seam, production block.

#### REFERENCES

- Shubina E.A., Brylin V.I., Lukyanov V.G. Provedenie zablagovremennoy degazatsii ugolnykh plastov s ispolzovaniem geologorazvedochnykh skvazhin [Design of geological exploration considering multifunctional use of wells to reduce natural gas content of coal beds]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2008, vol. 324, no. 1, pp. 167–173.
- Vorobev B.M., Vasyuchkov Yu.F., Bykova M.Yu. Innovatsionnaya sinenergeticheskaya vysokoadaptivnaya i gluboko konversionnaya kontseptsiya razvitiya uglegazovoy energetiki Rossii [Innovative synergetic high adaptive and deep conversion concept of Coal and Gas Energy of USSR]. Ugol, 2012, no. 2, pp. 62–66.
- Zorya A.Yu., Kreynin E.V., Lazarenko S.N. Novye vozmozhnosti [New possibilities]. Ugol Kuzbassa, 2009, no. 4, pp.74–77.
- Vasyuchkov Yu., Vorobev B., Vasyuchkov K. Unconventional mining technologies for clean and efficient power degeration. *Mining Engineering*, 1998, April, pp. 65–69.
- Ageev P.G., Strelchenko V.V., Ageev N.P. Innovatsionnaya rossiyskaya nanotekhnologiya daet vtoruyu zhizn bezdeystvuyushchim neftyanym i metanougolnym skvazhinam v SShA, Kitae i Rossii [Innovative Russian nanotechnology gives the second life to dormant oil and coalbed methane wells in the United States, China and Russia]. Nedropolzovanie, 2014, no. 1, pp. 26–31.
- Neft, Gaz i Biznes 9'2013. Bezdeystvuyushchie skvazhiny i metanougolnye plasty – obekty primeneniya innovatsionnoy rossiyskoy tekhnologii v SShA i Kitae [Oil, Gas and Business 9'2013. Idle wells and coal-methanol layers are the objects of applying innovative Russian technique in the USA and China]. Novas Energy Service. 2009. Available at: http://novas-energy.ru/content/articles/index.php?article=3315 (accessed 09 April 2014).
- Ageev P.G., Strelchenko V.V., Kazantsev O.E. Intensifikatsiya potoka metana iz ugolnykh plastov metodom plazmenno-impulsnogo vozdeystviya [Intensification of methane flow from coal bed by plasma-pulse action]. *Gazovaya promyshlennost*, 2013, September, no. 696, pp. 95–98.
- Kaledina N.O. Aerodinamicheskie kriterii effektivnosti izvlecheniya metana iz vyrabotannykh prostranstv deystvuyushchikh shakht [Aerodynamic performance criteria of methane extraction from coal operating mines] Nauchnyye shkoly Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta, 2008, vol. 1, pp. 150–154.
- Puchkov L.A., Slastunov S.V., Fedunets B.I. Perspektivy dobychi metana v Pechorskom ugolnom basseyne [Prospects of methane production in the Pechora coal basin]. Moscow, MGGU Press, 2004. 557 p.
- Puchkov L.A., Slastunov S.V., Prezent G.M. Perspektivy promyshlennogo izvlecheniya ugolnogo metana [Prospects of industrial extraction of coal methane]. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2002, no. 6, pp. 6–10.

- Puchkov L.A., Slastunov S.V., Kolikov K.S. Problemy realizatsii kontseptsii metanobezopasnosti na ugolnykh shakhtakh Rossii [Problems of implementation of the concept of a methane safety on coal mines of Russia]. Ugol, 2009, no. 1, pp. 5–9.
- Malyshev Yu.N., Khudin Yu.L., Vasilchuk M.P. Problemy razrabotki metanonosnykh plastov v Kuznetskom ugolnom basseyne [Problems of development of methane-bearing layers in Kuznetsk coal basin]. Moscow, Academy of mining sciences Press, 1997. 463 p.
- Slastunov S.V. Zablagovremennaya degazatsiya i dobycha metana iz ugolnykh mestorozhdeniy [Preliminary decontamination and methane production from coal fields]. Moscow, MGGU Press, 1996. 441 p.
- Vernigo V.M., Kulchitskiy V.B. Preduprezhdenie gornykh udarov i vnezapnykh vybrosov v gornodobyvayushshey promyshlennosti [Prevention of mountain blows and sudden emissions in mining industry]. *Gornaya Promyshlennost*, 2006, no. 4, pp. 6–7.
- 15. Sikora P., Smyslov D. Osobennosti zablagovremennoy degazatsii ugolnykh plastov metodom bureniya skvazhin s poverkhnosti [Features of preliminary decontamination of coal layers by the method of wells drilling from surface]. *Glyukauf*, 2008, no. 1, pp. 38–45.
- Pravila bezopasnosti v ugolnykh shakhtakh (PB 05-618-03) [Safety rules for coal mines]. Moscow, Gosudarstvennoe unitarnoe predpriyatie «Nauchno-tekhnicheskiy tsentr po bezopasnosti v promyshlennosti Gosgortekhnadzora Rossii». 2003, Ser. 05, Iss. 11, 296 p.
- Willenbrink B. CBM Review: degassing development. World Coal, 2003, vol. 12, no. 3, pp. 51-54.
- Metodicheskie rekomendatsii po primeneniyu klassifikatsii zapasov mestorozhdeniy i prognoznykh resursov tverdykh poleznykh iskopaemykh. Ugli i goryuchie slantsy [Methodical recommendations on application of Classification of stocks of fields and expected resources of firm minerals. Coals and combustible slates]. Moscow, FGU GKZ Publ., 2007. 34 p.
- Rukovodstvo po proektirovaniyu ventilyatsii ugolnykh shakht. Makeevka-Dombass. Nauchno-issledovatelskiy institut po bezopasnosti rabot v gornoy promyshlennosti [Design Guide ventilation of coal mines]. 1989. 315 p.
- Pak G.A., Drizhd N.A., Dolgonosov V.N. Vzaimosvyaz obrusheniy osnovnoy krovli s gazodinamicheskimi yavleniyami na ugolnykh shakhtakh [Relationship of main roof collapses with gas-dynamic phenomena in coal mines]. Ugol, 2014, no. 1, pp. 56–58.

Received: 11 April 2014.

УДК 541.64:532.135

## ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ НА ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

#### Манжай Владимир Николаевич,

д-р хим. наук, профессор каф. геологии и разработки нефтяных месторождений Института природных ресурсов ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: mang@ipc.tsc.ru

#### Абдусалямов Артем Вячеславович,

аспирант кафедры высокомолекулярных соединений и нефтехимии Томского Государственного университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 36. E-mail: mang@ipc.tsc.ru

#### Носикова Юлия Рифкатовна,

аспирант Института химии нефти Сибирского Отделения Российской Академии Наук, Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 4. E-mail: mang@ipc.tsc.ru

Для увеличения пропускной способности нефтепроводов и снижения энергетических затрат на перемещение единицы объема жидкости используют традиционные пути уменьшения вязкости: подогрев, разбавление маловязким растворителем и введение депрессорных присадок. Вышеперечисленные методы требуют больших энергетических и материальных затрат, и они эффективны только для ламинарного режима течения, при котором объемный расход обратно пропорционален вязкости. Но в подавляющем большинстве случаев при перекачке нефти и нефтепродуктов по трубопроводам реализуется турбулентный режим течения, объемный расход при котором слабо зависит от вязкости. Поэтому в последнее время все чаще применяются энергосберегающие технологии трубопроводного транспорта с использованием противотурбулентных присадок. Дозирование в поток нефти очень малых доз полимерных добавок (несколько грамм на тонну) приводит к увеличению скорости её течения на 20–30 %. Актуальность работы обусловлена необходимостью снижения энергетических затрат на транспортировку нефти и нефтепродуктов (бензин, керосин и т. д.) по магистральным трубопроводам.

**Цель работы:** оценить возможность применения натуральных и синтетических каучуков в качестве агентов снижения гидродинамического сопротивления на магистральных нефтепроводах.

**Методы исследования.** Проведены исследования структуры макромолекул образцов натурального и синтетического каучука, а также бутадиенового и бутадиен-стирольного каучуков методами ИК-спектроскопии, вискозиметрии и гель-проникающей хроматографии. Турбореометрическим методом проведено исследование антитурбулентной эффективности данных образцов в различных растворителях.

**Результаты.** Установлен наиболее эффективный эластомер, способный снижать гидравлическое сопротивление. Определена оптимальная концентрация эластомера, необходимая для достижения максимального эффекта Томса. Рассчитаны объемы макромолекулярных клубков в различных растворителях, показано влияние растворителей на их размер, а также на величину снижения гидродинамического сопротивления эластомеров. Рассчитаны молярные массы образцов различными методами.

#### Ключевые слова:

Эластомер, макромолекула, полимер, турбулентность, реология, вязкость.

#### Введение

Каучуки в подавляющем большинстве случаев используют в качестве базовых материалов для формирования резинотехнических изделий, но они могут также применяться в энергосберегающих технологиях в качестве эффективного агента для снижения гидродинамического сопротивления при турбулентном течении углеводородных жидкостей в цилиндрическом канале. Известно, что скорость турбулентного течения разбавленных растворов полимеров выше по сравнению со скоростью течения исходного маловязкого растворителя. Этот эффект, впервые описанный Томсом [1] и получивший его имя, в настоящее время широко применяется в судоходстве для увеличения быстроходности судов, повышения дальнобойности струй при пожаротушении, в трубопроводном транспорте для интенсификации течения жидкостей и в некоторых других областях практической деятельности. Экспериментально установленные особенности явления снижения гидродинамического сопротивления и его практическое применение достаточно подробно описаны в многочисленных статьях и обзорах [2–6]. Но следует отметить, что большинство публикаций посвящено исследованиям эффекта Томса в водных растворах полимеров. В то же время количество статей, описывающих гидродинамические (антитурбулентные) свойства полимеров, растворимых в углеводородных жидкостях различной полярности, явно недостаточно. Классическими представителями таких полимеров являются каучуки.

Величину эффекта Томса или эффекта снижения гидродинамического сопротивления в трубе (DR, %), характеризующую уменьшение энергетических затрат на перемещение единицы объёма жидкости с полимерной добавкой по сравнению с затратами на перекачку чистого растворителя, принято рассчитывать по формуле

$$DR,\% = \left[\frac{\lambda_s - \lambda_p}{\lambda_s}\right] \cdot 100 \%, \tag{1}$$

в которой  $\lambda_s$  и  $\lambda_p$  – коэффициенты гидродинамического сопротивления чистого растворителя и полимерного раствора соответственно. Численные значения коэффициентов  $\lambda_s$  и  $\lambda_p$  рассчитывают после проведения экспериментов по уравнению Дар-

си-Вейсбаха [7–11] 
$$\Delta P = \lambda \frac{L}{4\pi^2 R^5} \rho Q^2$$
, в котором

 $Q=\pi R^2 U$  – объёмная скорость жидкости (объёмный расход); U – среднерасходная (линейная) скорость жидкости в трубе;  $\Delta P=(P_{\rm Hav}-P_{\rm KOB})$  – потери давления на трение в трубе длины L и радиуса R;  $\rho$  – плотность жидкости.

В многочисленных публикациях разных авторов отмечается [2, 3, 5, 12–16], что величина эффекта Томса зависит от большого числа гидродинамических параметров течения и физико-химических характеристик полимерных растворов, т. е. от напряжения сдвига и числа Рейнольдса, концентрации полимера и его молекулярной массы, вязкости, химической природы и компонентного состава растворителя, температуры и т. д. Но формула (1) в явном виде не показывает зависимость величины DR от вышеназванных параметров, поэтому для количественного описания и теоретического объяснения эффекта Томса целесообразно пользоваться уравнением (2), предложенным и обоснованным в работах [5, 6]

$$\Delta Q = \pi R^2 \Psi \tau_w \left(\frac{V_k}{\rho kT}\right)^{1/2} \left[1 - \left(\frac{kT}{\tau_w V_k}\right)^{1/2}\right], \qquad (2)$$

где  $\Delta Q = Q_p - Q_s$  – приращение объемной скорости полимерного раствора ( $Q_p$ ) по сравнению с объёмной скоростью растворителя ( $Q_s$ ) в одинаковых гидро-

динамических условиях; 
$$\psi = \frac{[\eta]C}{1 + [\eta]C}$$
 – объемная

доля макромолекулярных клубков в растворе, зависящая от характеристической вязкости  $[\eta]$  и концентрации полимерного раствора (C);

 $\tau_w = \frac{\Delta PR}{2L}$  – напряжение сдвига на стенке трубы

радиуса (R) и длины (L) при заданном в ней перепа-

де давления ( $\Delta P$ );  $V_k = \frac{M[\eta]}{N_A}$  – объем макромоле-

кулярного клубка с иммобилизованным растворителем, зависящий от молярной массы полимерного образца (M) и характеристической вязкости его растворов [ $\eta$ ];  $\rho$  – плотность растворителя; k – постоянная Больцмана; T – температура.

#### Экспериментальная часть

Для изучения гидродинамических свойств растворителей и полимерных растворов различных концентраций использовали турбулентный реометр, который конструктивно прост и подобен капиллярному вискозиметру. Реометр позволяет проводить измерения текучести жидкостей в ламинарном (при Re<2300) и турбулентном режимах (при Re>2300). В экспериментах прокачиваемой жидкости задавали различные напряжения сдвига на стенке цилиндрического канала ( $\tau_w$ ) и измеряли объёмные скорости течения растворителя ( $Q_s$ ) и полимерных растворов ( $Q_p$ ), а затем по формулам (1) и (2) проводили необходимые расчеты. Более подробное описание турбореометра приведено в работах [4, 5, 7].

На рис. 1, 2 представлены экспериментально полученные зависимости величины антитурбулентной эффективности (DR, %) от напряжения сдвига на стенке цилиндрического канала ( $\tau_w$ ) и от концентрации (С) двух полимерных образцов в бензине (натурального каучука SVR-3L и синтетического каучука SKI-3S). Анализ ИК-спектров исследованных образцов показал, что они имеют схожую природу, т. е. являются полиизопреновыми каучуками с преимущественным (99,5 %) содержанием 1.4-пис-звеньев. Это подтверждается наличием в спектрах данных образцов интенсивной полосы поглощения 842 см<sup>-1</sup> (деформационные колебания С-Н при двойной связи в 1,4-цис-изопреновом звене). По литературным данным в натуральном каучуке содержится 2-4 % белков и аминокислот, 1,5-4 % ацетонового экстракта (олеиновая, стеариновая, линолевая кислоты, каротин и т. д.) и некоторые другие примеси [17-19]. Эти вещества являются природными ПАВ, которые стабилизируют коллоидную субстанцию (латекс) сока гевеи, из которого получают натуральный каучук. Для очистки натурального каучука от сопутствующих веществ провели его переосаждение этанолом из раствора полимера в гептане. В спектре образца SVR-3L после переосаждения заметно изменяется область спектра 1700-1650 см<sup>-1</sup>, которая соответствует валентным колебаниям карбонильной группы. В частности, пропадает полоса 1629 см<sup>-1</sup>, вероятно относящаяся к деформационным колебаниям N-Н в амидной группе. Однако в ИК-спектре даже переосажденного натурального каучука, в отличие от синтетического каучука SKI-3S, по-прежнему присутствуют полосы поглощения 3289 и 1520 см<sup>-1</sup>. Они могут характеризовать наличие гидроксильных групп.

Таким образом, хотя образцы SVR-3L и SKI-3S имеют близкую химическую природу, но, как видно из рис. 1, 2, они обладают различной антитурбулентной эффективностью. На рис. 1 концентрация обоих образцов в бензине одинакова и составляет 0,5 кг/м<sup>3</sup> (~0,05 мас. %). Гидродинамические исследования растворов проводили при варьировании напряжения сдвига в интервале от 4 до 18 Па. Результаты экспериментов, представленные на рис. 2, получены для растворов разных концентраций этих же образцов полимеров, которые пропускались через турбулентный реометр при постоянном напряжении сдвига на стенке канала  $\tau_{w}=18$  Па.



Рис. 1. Зависимость величины эффекта Томса от напряжения сдвига растворов образцов SKI-3S (1) и SVR-3L (2) в бензине

Fig. 1.

Fig. 2.

Dependence of Toms effect value on shearing stress of

SKI-3S (1) and SVR-3L (2) samples solutions in gasoline



створов образцов SKI-3S (1) и SVR-3L (2) в бензине

Dependence of the effect value on concentration of SKI-3S (1) and SVR-3L (2) samples solutions in gasoline

#### Обсуждение результатов

Для выяснения причины такого различия в антитурбулентной эффективности этих образцов полимеров следует обратиться к уравнению (2). Из выражения (2) следует, что величина эффекта Томса тем больше, чем больше объём макромолекулярного клубка (V<sub>k</sub>) и, следовательно, в соответствии с преобразованной формулой Флори-Фокса

 $V_k = \frac{M \cdot [\eta]}{N_A}$ , наиболее эффективные полимерные

образцы должны обладать достаточно большой молярной массой (М).

Методом гель-проникающей хроматографии на приборе Agilent 1200 были получены следующие значения среднемассовой (М<sub>и</sub>) и среднечисленной  $(M_n)$  молярных масс (рис. 3):

- а) для натурального каучука SVR-3L:  $M_{w}=2,04\cdot10^{6}$ и *M*<sub>n</sub>=7,22·10<sup>5</sup> г/моль;
- б) для синтетического полиизопрена SKI-3S:  $M_{w}=1,51\cdot10^{6}$  и  $M_{n}=3,14\cdot10^{5}$  г/моль.

Аналитическое выражение (2) предсказывает, что полимерный раствор будет течь быстрее исходного растворителя ( $\Delta Q > 0$ ) только при выполнении условия  $[1-(kT/\tau_wV_k)^{1/2}]>0$ , т. е. при реализации неравенства  $\tau_wV_k>kT$ . Таким образом, чем больше объем макромолекулярных клубков с иммобилизованным растворителем ( $V_{k}$ ), тем при меньших значениях напряжения сдвига ( $\tau_w$ ) будет наблюдаться эффект.

Наряду с образцами полимеров SVR-3L и SKI-3S, имеющих молекулярные массы более одного миллиона (рис. 3), турбореометрическому тестированию подвергались и относительно низкомолекулярные полимеры другой природы: полибутадиен SB-24 (*M*<sub>w</sub>=3,28·10<sup>5</sup> и *M*<sub>n</sub>=1,31·10<sup>5</sup> г/моль) и сополимер бутадиена и стирола NS-116 ( $M_w = 2,19 \cdot 10^5$  и



Рис. 3. Молекулярно-массовое распределение образцов SKI-3S (1) и SVR-3L (2)

Molecular weight distribution of SKI-3S (1) and SVR-3L (2) samples Fig. 3.

 $M_n$ =1,53·10<sup>5</sup> г/моль). Растворы этих образцов в бензине не снижают гидродинамическое сопротивление турбулентного течения в исследованном интервале напряжений сдвига от 1 до 20 Па. Отсутствие эффекта Томса у растворов этих образцов является следствием малых размеров макромолекулярных клубков ( $V_k$ ), и для них не выполняется необходимое условие  $\tau_w V_k > kT$ .

Транспортируемые по магистральным трубопроводам нефть и нефтепродукты (бензин, керосин и т. д.) являются сложной смесью молекул углеводородов (алканов и циклоалканов, ароматических соединений и т. д.) различного строения и различной полярности. Растворимость полиизопрена в таких смесях зависит от их компонентного состава. Поэтому представляет несомненный интерес исследование гидродинамических свойств полимерных образцов в индивидуальных углеводородных жидкостях. Проведенными вискозиметрическими измерениями (ламинарный режим течения) определено, что характеристическая вязкость [ $\eta$ ] растворов натурального каучука SVR-3L в циклогексане имеет наибольшую величину, несколько меньше она в толуоле и наименьшее значение характеристической вязкости этого образца в гептане (таблица). Турбореометрическим методом установлено, что приращение объёмного расхода ( $\Delta Q$ ) образца натурального каучука SVR-3L также максимально в циклогексане и далее по эффективности следуют толуол и гептан. После проведения экспериментальных измерений на турбулентном реометре с целью определения величины  $\Delta Q$  при помощи уравнения (2) можно рассчитывать объёмы макромолекулярных клубков (V<sub>k</sub>) с иммобилизованным растворителем. Затем по преобразованной формуле Флори-Фокса  $M=N_AV_k/[\eta]$  имеется возможность вычислять значения молярной массы (М) полимерного образца. Результаты вискозиметрических и турбореометрических измерений растворов образца SVR-3L, а также выполненных расчетов представлены в таблице.

Анализ результатов таблицы показывает, что при использовании жидкостей разной химической природы заметно меняются размеры  $(V_k)$  набухших макромолекулярных клубков. Это свидетельствует о том, что использованные растворители обладают различным термодинамическим качеством и поэтому иммобилизация молекул этих растворителей во внутренний объём полимерных клубков неодинакова. Но при этом величина молярной массы образца полимера SVR-3L, определенная методом турбулентной реометрии в различных растворителях, имеет в них практически постоянную величину ( $M_w \approx 2, 1 \cdot 10^6$  г/моль). Полученный результат является закономерным потому, что в процессе замены растворителей и сопутствующих конформационных переходах с изменением объёмов клубков длина самой полимерной цепи не изменяется, т. е. не происходит изменения числа атомов в макромолекуле. Результат, полученный турбореометрическим методом, практически совпадает со значением среднемассовой молекулярной массы ( $M_w = 2,04 \cdot 10^6 \, \text{г/моль}$ ), определенной методом гель-проникающей хроматографии (рис. 3). Это соответствие результатов измерения молярных масс различными методами исследования подтверждает вывод, сделанный в работе [20], о том, что турбореометрия может использоваться для определения молекулярных характеристик полимерных образцов.

Таблица.	Физико-химические характеристики растворов
	образца натурального каучука SVR-3L в раствори-
	телях разной химической природы

**Table.** Physico-chemical characteristics of natural rubber SVR-3L sample solutions in solvents with different chemical nature

Растворитель Solvent	[η], м³/кг (m³/kg)	<i>V<sub>k</sub></i> •10 <sup>21</sup> , м³(m³)	<i>М</i> •10⁻6, г/моль (g/mole)
Гептан Heptane	0,31	1,1	2,13
Толуол Toluene	0,42	1,5	2,14
Циклогексан Cyclohexane	0,49	1,7	2,08

По результатам работы можно сделать ещё один вывод. В соответствии с условием  $\tau_w V_k > kT$ , являющимся следствием уравнения (2), и результатами, приведенными в таблице, начало проявления эффекта Томса при турбулентном режиме течения раствора образца эластомера (натуральный каучук SVR-3L) в циклогексане и толуоле будет наблюдаться при напряжении сдвига  $\tau_w \sim 3$  Па, а растворов этого же образца в гептане – при более высоком напряжении, превышающем  $\tau_w \sim 4$  Па. Дальнейшее увеличение напряжения сдвига в цилиндрическом канале сопровождается ростом величины эффекта Томса (рис. 1), независимо от химической природы растворителя, на основе которого приготовлен полимерный раствор.

Работа выполнена в рамках проекта «Использование противотурбулентных присадок для трубопроводного транспорта углеводородов в арктических условиях», входящего в программу Фундаментальных исследований Президиума РАН «Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктический зоны Российской Федерации».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Toms B.A. Some Observations on the Flow of Linear Polymer Solutions through Straight Tubes at Large Reynolds Numbers // Proceeding International Congress on Rheology. – Amsterdam: North Holland Publishing Co, 1949. – V. 2. – P. 135–141.
- Хойт Д.У. Влияние добавок на сопротивление трения в жидкости // Теоретические основы инженерных расчетов. – 1972. – № 2. – С. 1–31
- Virk P.S. Drag Reduction Fundamentals // AJChE Journal. 1975. – V. 21. – № 4. – P. 625–656.
- Механизм действия, оценка эффективности и особенности получения полимерных антитурбулентных присадок для транспорта углеводородных жидкостей / Г.В. Несын, В.Н. Манжай, Ю.В. Сулейманова, В.С. Станкевич, К.Б. Коновалов // Высокомолекулярные соединения. – 2012. – Т. 54. – № 1. – С. 65–72.
- Противотурбулентные присадки для снижения гидравлического сопротивления трубопроводо / М.М. Гареев, Ю.В. Лисин, В.Н. Манжай, А.М. Шаммазов. – СПб.: Недра, 2013. – 228 с.
- Physico-chemical concept of drag reduction nature in dilute polymer solutions (the Toms effect) / V.N. Manzhai, Yu.R. Nasibulina, A.S. Kuchevskaya, A.G. Filimoshkin // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. 2014. № 80. P. 38-42.
- Новый метод реокинетических исследований, основанный на использовании эффекта Томса / А.Я. Малкин, Г.В. Несын, В.Н. Манжай, А.В. Илюшников // Высокомолекулярные соединения. – 2000. – Т. 42. – № 2. – С. 377–384.
- Романков П.Г., Курочкина М.И. Гидромеханические процессы химической технологии. 3 изд. – Л.: Химия, 1982. – 288 с.

- Кутепов А.М. и др. Химическая гидродинамика: справочное пособие. – М.: Квантум, 1996. – 336 с.
- 10. Рабинович Е.З. Гидравлика. М.: Недра, 1980. 278 с.
- Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: ГХИ, 1961. – 831 с.
- Review on Drag Reduction and its Heat Transfer by Additives / Yi Wang, Bo Yu, J.L. Zakin, Haifeng Shi // Advance in Mechanical Engineering. - 2011. - V. 17. - P. 35-48.
- Ge W. Studies on the nanostructure, rheology and drag reduction characteristics of drag reducing cationic surfactant solutions: Ph.D. thesis. - Ohio, 2008. - 455 p.
- Hellsten M., Oskarsson H. A drag-reducing agent for use in injection water at oil recovery, application. Patent USA, no. W0/2004/007630, 2004.
- Morgan S.E., McCormick C.L. Macromolecular drag reduction. A review of predictive theories and the effects of polymer structure // Prog. Polym. Sci. – 1990. – V. 15. – № 3. – P. 507–549.
- Кленин В.И. Федусенко И.В. Высокомолекулярные соединения. – СПб.: Изд-во «Лань», 2013. – 512 с.
- Энциклопедия полимеров: в 12 т. / гл. ред. В.А. Каргин. М.: Советская энциклопедия, 1972. – Т. 1: Каучук натуральный. – 1001 с.
- Семчиков Ю.Д. Высокомолекулярные соединения. М.: Изд-во «Академия», 2010. – 368 с.
- 19. Тагер А.А. Физико-химия полимеров. М.: Научный мир, 2007. 576 с.
- Манжай В.Н., Климова Н.Л. Новые возможности турбореометрического метода исследования разбавленных растворов полимеров // Известия ТПУ. – 2006. – Т. 309. – № 6. – С. 85–88.

Поступила 24.10.2014 г.

UDC 541.64:532.135

## INFLUENCE OF HIGH MOLECULAR ELASTOMERS ON A TURBULENT FLOW OF HYDROCARBON LIQUIDS

#### Vladimir N. Manzhay,

Dr. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: mang@ipc.tsc.ru

#### Artem V. Abdusalyamov,

National Research Tomsk State University, 36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: mang@ipc.tsc.ru

#### Yulia R. Nosikova,

Institute of Petroleum Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 4, Akademichesky Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: mang@ipc.tsc.ru

To increase the capacity of pipelines and reduce energy costs for movement of fluid volume unit the traditional ways of reducing viscosity are used. They are heating, dilution and add of low-viscosity solvent depressants. The above techniques require high energy and material costs, and they are effective only for the laminar flow regime, in which the volumetric flow rate is inversely proportional to viscosity. However, in most cases when pumping oil and petroleum products by pipeline the turbulent flow mode is implemented. In this case the volumetric flow rate weakly depends on viscosity. Therefore, in recent years the energy-saving technologies of pipelines with application of anti-turbulent additives are widely used. Dosing very low portions of polymer additives (a few grams per ton) into oil flow increases its flow rate by 20–30 %. Relevance of the research is caused by the need to reduce energy costs for oil and petroleum products (gasoline, kerosene, etc.) transportation through pipelines.

**The main aim of the study** is to evaluate the possibility of applying natural and synthetic rubbers as agents reducing hydrodynamic drag on the main oil pipelines.

**The methods used in the study.** The authors have studied the structure of macromolecules samples of natural and synthetic rubber, and butadiene and styrene butadiene rubber by IR-spectroscopy, viscosity method and gel-permeation chromatography. Turboreometry method was used to investigate anti-turbulent effectiveness of the samples in a variety of solvents.

**The results.** The authors determined the most effective elastomer capable of reducing flow resistance; defined optimum concentration of elastomer required for maximum Toms effect; calculated the volume of macromolecular coils in various solvents. The paper demonstrates the effect of solvents on their size and on amount of reduction of hydrodynamic resistance of elastomers. Molar mass of the samples were calculated by different methods.

#### Key words:

Elastomer, macromolecule, polymer, turbulence, rheology, viscosity.

The research was carried out within the project «Use of anti-turbulence additives for hydrocarbon pipeline transportation in arctic conditions», included into the program of the Fundamental researches of the RAS Presidium «Exploratory fundamental scientific researches for development of the RF Arctic zone».

#### REFERENCES

- Toms B. A. Some Observations on the Flow of Linear Polymer Solutions through Straight Tubes at Large Reynolds Numbers. *Proceeding International Congress on Rheology*. Amsterdam, North Holland Publishing Co., 1949. Vol. 2, pp. 135–141.
- Hoyt D.U. Vliyanie dobavok na soprotivlenie treniya v zhidkosti [Effect of additives on frictional resistance in liquid]. *Journal of* engineering for industry, 1972, no. 2, pp. 1–31.
- Virk P.S. Drag Reduction Fundamentals. AJChE Journal, 1975, vol. 21, no. 4, pp. 625–656.
- Nesyn G.V., Manzhay V.N., Suleymanova Yu.V., Stankevich V.S., Konovalov K.B. Mekhanizm deystviya, otsenka effektivnosti i osobennosti polucheniya polimernykh antiturbulentnykh prisadok dlya transporta uglevodorodnykh zhidkostey [The mechanism of action, assessment of efficiency and features of preparation of polymeric antiturbulent additives for transporting hydrocarbon liquids]. *Polymer*, 2012, vol. 54, no. 1, pp. 65–72.
- Gareev M.M., Lisin Yu.V., Manzhay V.N., Shammazov A.M. Protivoturbulentnye prisadki dlya snizheniya gidravlicheskogo soprotivleniya truboprovodov [Anti-turbulent additives to reduce the flow resistance of pipelines]. St. Petersburg, Nedra Publ., 2013. 228 p.
- Manzhai V.N., Nasibulina Yu.R., Kuchevskaya A.S., Filimoshkin A.G. Physico-chemical concept of drag reduction nature in dilute polymer solutions (the Toms effect). *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2014. No. 80, pp. 38-42.
- Malkin A.Ya., Nesyn G.V., Manzhay V.N., Ilyushnikov A.V. Novy metod reokineticheskikh issledovaniy, osnovanny na ispolzovanii effekta Tomsa [A new method of reo-kinetic studies based on the effect of Toms]. *Polymer*, 2000, vol. 42, no. 2, pp. 377–384.
- Romankov P.G., Kurochkina M.I. *Gidromekhanicheskie protsesy* khimicheskoy tekhnologiy [Hydromechanical processes of chemical technology]. 3<sup>rd</sup> ed. Leningrad, Khimiya Publ., 1982. 228 p.
- Kutepov A.M. Khimicheskaya gidrodinamika: spravochnoe posobie [Chemical Hydrodynamics: a Reference Guide]. Moscow, Kvantum Publ., 1996. 336 p.

- Rabinovich E.Z. Gidravlika [Hydraulics]. Moscow, Nedra Publ., 1980. 278 p.
- Kasatkin A.G. Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii [Basic processes and devices of chemical technologies]. Moscow, GKhI Publ., 1961. 831 p.
- Yi Wang, Bo Yu, Zakin J.L., Haifeng Shi. Review on Drag Reduction and Its Heat Transfer by Additives. Advance in Mechanical Engineering, 2011, vol. 17, pp. 35–48.
- Ge W. Studies on the nanostructure, rheology and drag reduction characteristics of drag reducing cationic surfactant solutions. Ph.D. thesis. Ohio, 2008. 455 p.
- Hellsten M., Oskarsson H. A drag-reducing agent for use in injection water at oil recovery, application. Patent USA, no: W0/2004/007630, 2004.
- Morgan S.E., McCormick C.L. Macromolecular drag reduction. A review of predictive theories and the effects of polymer structure. *Prog. Polym. Sci.*, 1990. vol. 15, no. 3, pp. 507–549.
- Klenin V.I., Fedusenko I.V. Vysokomolekylyarnye soedineniya [Macromolecular compounds]. St. Petersburg, Lan Publ., 2013. 512 p.
- Entsiklopediya polimerov [Encyclopedia of Polymers]. Ed. by V.A. Kargin. Vol. 1. Kauchuk naturalny [Natural rubber]. Moscow, Soviet Encyclopedia Press, 1972. 1001 p.
- Semchikov Yu.D. Vysokomolekylyarnye soedineniya [Macromolecular compounds]. Moscow, Academiya Publ., 2010. 368 p.
- Tager A.A. Fiziko-khimiya polimerov [Physical chemistry of polymers]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2007. 576 p.
- Manzhay V.N., Klimov N.L. Novye vozmozhnosti turboreometricheskogo metoda issledovaniya razdavlennykh rastvorov polimerov [New opportunities of turbo-reometric research method of dilute polymer solutions]. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2006, vol. 309, no. 6, pp. 85–88.

Received: 24 October 2014.

УДК 550.34 + 551.24 (571.6)

## ЗD-ТЕКТОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОЛЕЙ СЕЙСМИЧНОСТИ В ЮЖНЫХ РАЙОНАХ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА РОССИИ

#### Петрищевский Александр Митрофанович,

д-р геол.-минерал. наук, проф. каф. геофизики Института природных ресурсов ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский политехнический университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; зав. лабораторией моделирования геологических структур Института комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, Россия, 679016, г. Биробиджан, ул. Шолом Алейхема, 4. E-mail: petris2010@mail.ru

#### Васильева Мария Александровна,

аспирант Института комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, Россия, 679016, г. Биробиджан, ул. Шолом Алейхема, 4.

E-mail: mahaonn2008@mail.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью выяснения тектонических причин землетрясений в Дальневосточном регионе России и анализом связи интенсивности сейсмических событий с реологическим состоянием тектонических сред.

**Цель работы:** обоснование связи распределений гипоцентров и магнитуд землетрясений с глубинным строением и реологическим состоянием тектонических сред в земной коре и верхней мантии Северо-Восточной Азии.

**Методика исследований:** построение 3D-моделей распределений гипоцентров и магнитуд землетрясений и на этой основе – послойных схем и разрезов распределений средних магнитуд.

Результаты. В распределениях гипоцентров и магнитуд землетрясений обнаружена вертикальная дискретность, связанная с реологической неоднородностью тектонических сред в земной коре и верхней мантии. Районы, характеризуемые повышенными магнитудами землетрясений (М=3,5-6) в верхнем слое земной коры до глубины 10-15 км, пространственно коррелируются с древними метаморфическими комплексами, обнажающимися в Алдано-Становом блоке Северо-Азиатского и северном фланге Северо-Китайского кратонов. В пределах Амурской плиты максимумы магнитуд приурочены к блокам кратонного типа: Аргуно-Мамынскому, Дягдагачинскому и Цзямусы-Буренинскому. По глубине залегания и форме верхнего сейсмического слоя в этих блоках можно судить о глубине залегания, вертикальной мощности и поведении кровли кристаллического слоя земной коры, а также о степени нарушенности коры, обусловленной дизъюнктивными и вулканическими процессами. В частности, установлено погружение гранитно-метаморфического слоя земной коры Северо-Китайского кратона под Цзямусы-Буренинский террейн и кристаллических комплексов Алдано-Станового щита под Монголо-Охотскую и Сихотэ-Алинскую складчато-надвиговые системы. В акваториях окраинных морей максимумами магнитуд отображаются островные дуги (Сахалинская, Курильская), в фундаменте которых присутствуют высокоплотные океанические ультрабазиты. Пониженными и низкими магнитудами землетрясений (M=2,5-3,2) отмечаются зоны пониженной вязкости в нижнем слое земной коры, подкоровом слое верхней мантии и астеносфере, где они коррелируются с низкими удельными электрическими сопротивлениями и пониженной скоростью распространения сейсмических волн. Обнаружены три геометрических типа таких зон: вертикальные линейные, слоисто-горизонтальные и локальные изометричные. Первые совпадают со структурами растяжения литосферы и магмопроницаемыми зонами глубинных разломов, вторые – с границами раздела структурно-вещественных комплексов в разрезах, а третьи – с центрами тектоно-магматических структур плюмовой природы. Во всех случаях зоны низкой сейсмичности сопровождаются комплексом геолого-геофизических признаков, указывающих на флюидную, магматическую или тектоническую проработку соответствующих им геологических структур. Охарактеризована вертикальная прерывистость и продольная неоднородность сейсмофокальных зон в Охотоморском регионе. Пододвигание (субдукция) тихоокеанской литосферы под Охотоморскую плиту читается в разрезах M(x,y,z)-модели, однако это пододвигание уверенно прослеживается только до глубины 100 км.

#### Ключевые слова:

Магнитуды землетрясений, реология, глубинное строение земной коры и верхней мантии, Северо-Восточная Азия.

#### Постановка задачи

Применяемые на Дальнем Востоке России методы тектонического анализа причин землетрясений сводятся в основном к изучению связи сейсмических событий с разрывной тектоникой [1, 2] и новейшими тектоническими движениями [3, 4], реже – с орографией земной поверхности [4] и геологическим строением земной коры [5–7]. В последнее время здесь [6, 8] и в других районах [9, 10] появляется интерес к исследованию связи землетрясений с зонами пониженной вязкости в земной коре и подкоровом слое верхней мантии, диагностируемыми по аномалиям высокой электрической проводимости, низким скоростям сейсмических волн и аномалиям теплового потока. Однако чаще всего протяженные пояса сейсмичности увязываются с глубинными разломами на границах литосферных плит, а более мелкие линейные зоны концентрации землетрясений – с разломами более высоких порядков.

Отображения следов сейсмических процессов в разрезах тектоносферы обычно ограничиваются группированием гипоцентров землетрясений в сейсмофокальных зонах на границах литосферных плит с целью обоснования субдукции последних [1, 11], реже – корреляцией гипоцентров со скоростными границами раздела земной коры [7, 8].



Рис. 1. Схема расположения районов исследований. 1 – границы литосферных плит; 2 – районы исследований. Обозначения плит: ЕАП – Евразиатская, САП – Северо-Американская, БП – Беринговоморская, ОП – Охотоморская, АП – Амурская, ТП – Тихоокеанская, Беринговоморская. Регионы исследований: 1 – Средне-Амурский, 2 – Верхне-Амурский, 3 – Охотоморский

**Fig. 1.** Map of regions. 1 – boundaries of tectonic plates; 2 – study areas. Plates: ΕΑΠ – Euro-Asia, CΑΠ – Northen American, БΠ – Bering, ΟΠ – Okhotsk sea, ΑΠ – Amur, ΤΠ – Pacific, Bering. Study regions: 1 – Middle-Amur, 2 – Upper-Amur, 3 – Okhotsk sea

Реализуемый нами подход к изучению тектонических причин и закономерностей пространственного распределения землетрясений основывается на анализе 3D-моделей полей сейсмичности, которые дают возможность проследить связь сейсмических событий с объемным геологическим строением исследуемой территории в непрерывном пространстве. Такой подход учитывает не только положение гипоцентров землетрясений, но и их магнитуды. Последние опосредованно связаны с вязкостью (реологическим состоянием) и, как следствие, прочностью (жесткостью) и хрупкостью тектонических сред, а также величинами тектонических напряжений, обеспечивающих условия для накопления сейсмической энергии.

Описываемые ниже статические модели распределений магнитуд иллюстрируют связь землетрясений с тектоническими средами разной степени вязкости, оцениваемой по средним значениями магнитуд. Подразумевается, что не только жесткие кристаллические, но и менее вязкие среды способны передавать сейсмогенные тектонические напряжения, однако в последнем случае более вероятными представляются реактивные перемещения геологических масс, ослабляющие накопление упругих напряжений. Более вязкие (жесткие) блоки способны накапливать бо́льшие сейсмогенные напряжения. Полученный эмпирический материал в трех изученных авторами районах (рис. 1) доказывает справедливость такого предположения.

## Методика построения пространственных моделей распределений магнитуд землетрясений

Исходными данными для рассматриваемых ниже моделей являются оперативные и ежегодные сейсмические каталоги Геофизической Службы РАН (г. Обнинск) и КНР [12]. По этим данным были сформированы цифровые 3D-массивы M(x,y,z), где М – магнитуды землетрясений; *x*, *y*, *z* – координаты гипоцентров. С помощью стандартных средств перевода цифровой информации в графические образы (Surfer-8) и вспомогательного интерфейса Глаголева-Петрищевского [13] был составлен комплект послойных карт-срезов и разрезов распределений средних магнитуд землетрясений. При использовании стандартного пакета Surfer-8 авторы применяли двумерную (в пространствах координат: x, y; и x, z) крайгинг-интерполяцию для получения гладкой функции, описывающей распределения магнитуд землетрясений по их дискретным значениям в заданных интервалах глубин.

При изучении верхнего слоя земной коры интервалы глубин условных слоев обычно составляли: 0-4, 4-6, 6-8, 8-12, 12-16, 16-20 и 20-24 км. В зависимости от количества землетрясений в разных районах слои увеличивались либо уменьшались по мощности с тем, чтобы число учитываемых землетрясений обеспечивало статистический минимум и относительную равномерность заполнения модели. Для изучения распределений магнитуд в корово-мантийном диапазоне слои ограничивались поверхностями на глубинах: 5, 10, 20, 30, 50 и 70 км. В континентальных районах землетрясения с гипоцентрами ниже глубины 70 км отсутствовали. В Охотоморском регионе число землетрясений в верхней мантии позволяло изучать распределения магнитуд землетрясений в верхней мантии до глубины 150 км, ниже которой неравномерное распределение гипоцентров сейсмических событий не дает оснований делать обоснованные выводы о реологических свойствах глубоких слоев верхней мантии на территории этого региона. Для каждого условного слоя вычислялись тренды распределений магнитуд, относимые к средней глубине слоя. В дальнейшем они использовались для построения разрезов М-моделей. Методика построения разрезов подробно описана в работе [13].

Средняя точность определения глубин гипоцентров землетрясений в верхнекоровом слое (0–20 км), по данным каталогов ГФС РАН, составляет  $\pm$  3,5 км, в нижнекоровом слое  $\pm$  4,1 км, а в верхней мантии (100–300 км)  $\pm$  15 км. Такая точ-

ность позволяет осуществлять построение 3D-моделей распределения средних магнитуд, начиная с глубины 5-6 км.

С целью анализа представительности использованного материала сделаны три выборки из каталогов землетрясений для территории Среднего Приамурья. Первая выборка (n=348) охватывает период 2007–2008 гг., вторая (n=205) – период 2009–2010 гг., а третья выборка (n=43) за 2010 г. составлена без учета землетрясений, повторяющихся в эпицентрах сейсмических событий в предшествующие периоды (2007–2010 гг.). Горизонтальные срезы М-моделей (рис. 2, *а-в*) характеризуют распределения магнитуд землетрясений в главном сейсмическом (гранитно-метаморфическом) слое земной коры в диапазоне глубин



Рис. 2. Сравнение распределений магнитуд землетрясений в верхнем слое земной коры Приамурья (интервал глубин 5–20 км) в разные периоды: а, г) 2007–2008 гг.; б, д) 2009–2010 гг.; в) 2010 г. без учета повторяющихся землетрясений. 1 – сейсмические станции; 2 – изолинии равных магнитуд; 3, 4 – эпицентры землетрясений: единичных (3) и повторяющихся в одном гипоцентре (4); 5 – ось сдвиго-раздвиговой зоны Танлу; 6 – ось поперечной зоны пониженной сейсмичности; 7 – шкала раскраски разрезов. Обозначения структур: АЩ – Алданский щит, Ст – Становой террейн; складчатонадвиговые системы: МО – Монголо-Охотская, СА – Сихотэ-Алинская, Сх – Сахалинская, ТП – Тихоокеанский складчатый пояс. п – количество землетрясений, учтенных при построении схем

**Fig. 2.** Comparison of earthquake intensity distribution in crust upper layer of Amur region (depth interval is 5–20 km) in different periods: a, r) 2007–2008; б, д) 2009–2010; в) 2010 without repeated earthquakes. 1 – seismic stations; 2 – isoseismal lines; 3, 4 – earthquake hypocenters: single (3) and repeated in one hypocenter (4); 5 – axis of shear-spreading area of Tanlu; 6 – axis of cross area of low seismic activity; 7 – scale of section coloring. Structures: All – Aldanian shield, CT – Stanovoy terrain; fold-thrust systems: MO – Mongol-Okhotsk, CA – Sikhote-Alin, Cx – Sakhalin, TΠ – Pacific folded zone. n – amount of the earthquakes considered when mapping

5–20 км. Вертикальные разрезы (рис. 2, c, d) характеризуют распределения магнитуд до глубины 30 км.

Сравнение полученных данных (рис. 2) свидетельствует о том, что основные черты распределений магнитуд землетрясений в разные годы удовлетворительно согласуются между собой. В Среднем и Нижнем Приамурье большая часть землетрясений в среднекоровом слое в первый (2007-2008 гг.) и второй (2009-2010 гг.) периоды концентрируется в двух поясах (рис. 2, а, б). Пояс северо-восточного простирания совпадает с положением зоны Танлу, сопровождаемой поднятием кровли астеносферы (рис. 3, a), а пояс субширотного простирания – с восточным отрезком Байкало-Охотского сейсмического пояса. Второй особенностью поля сейсмичности Приамурья на обеих сравниваемых схемах является существование зоны пониженных магнитуд землетрясений северо-западного простирания, которая проявляется даже при малом числе учитываемых сейсмических событий (рис. 2, в) и разделяет земную кору Амурской плиты на 2 жестких блока. Южный блок примыкает к Северо-Китайскому кратону, а северный - к Северо-Азиатскому. Область пониженной сейсмичности смещена по сдвиговой зоне Танлу, и ее восточный фланг перемещен на северо-восток на расстояние порядка 400 км (рис. 2, a,  $\delta$ ), что соответствует тектонической интерпретации этой зоны [14].

Разрезы (рис. 2,  $\iota$ ,  $\partial$ ), построенные для разных периодов сейсмичности, тоже характеризуются общими чертами распределений магнитуд землетрясений. В обоих разрезах похожим образом диагностируется погружение кровли жесткого сейсмогенного гранитно-метаморфического слоя со стороны Северо-Азиатского кратона под складчатые комплексы Монголо-Охотской и Сихотэ-Алинской систем. Второй повторяющейся особенностью является повышение магнитуд землетрясений под западным флангом Алданского щита. Третьей особенностью является существование зоны пониженных магнитуд под Становым террейном, пронизанным юрско-меловыми гранитоидами. Понижение вязкости нижнекорового слоя на южной границе Северо-Азиатского кратона, выраженное в уменьшении магнитуд землетрясений, может быть обязано существованию здесь большого числа не полностью кристаллизовавшихся магматических очагов, являвшихся в позднем мезозое и кайнозое источником андезито-базальтовых вулканических покровов в Умлекано-Огджинском вулканическом поясе [1], и источником тепла и флюидов, способствовавшим выплавкам огромного количества «становых» щелочных гранитоидов в верхнем слое земной коры.

Проведенный анализ убеждает нас в том, что при статистическом минимуме исходных данных (30 точек) и их близком к равномерному распределению в слоях разработанная методика способна улавливать связи полей сейсмичности с реологическими неоднородностями в земной коре и верхней мантии.

#### Тектонический анализ распределений магнитуд землетрясений в земной коре и верхней мантии южных районов Дальнего Востока России

#### Средне-Амурский регион

Этот регион располагается на стыке 3-х литосферных плит: Евразиатской, Амурской и Охотоморской [1, 2], к границам которых приурочены субширотный Байкало-Охотский сейсмический пояс и меридиональная Сахалинская сейсмическая зона. На схемах тектонического районирования здесь выделяют [15] Северо-Азиатский и Северо-Китайский кратоны, Центрально-Азиатский палеозойско-мезозойский и Тихоокеанский мезозойско-кайнозойский складчатые пояса. В контуры восточного фланга Центрально-Азиатского пояса проецируется Амурская литосферная плита [1, 15], северная и южная границы которой в пределах рассматриваемой территории (рис. 3, б) совпадают, соответственно, с границами Северо-Азиатского и Северо-Китайского кратонов, а восточная проходит по острову Сахалин.

Приповерхностный слой земной коры кратонов сложен архейско-протерозойскими метаморфическими комплексами, в наибольшей степени способными накапливать упругие тектонические напряжения, которые в завершающих фазах разряжаются в разломах или в зонах горизонтальных расслоений земной коры. Тектонический анализ сейсмичности этого региона основывается на 1363 землетрясениях, произошедших здесь в период с января 2003 по март 2011 гг. Магнитуды землетрясений, происходившие повторно в тех же точках, осреднялись и относились к одному гипоцентру и после этого в массиве, используемом для построения M (х, у, z)-модели (рис. 3), осталось 253 точки.

В 3D-поле сейсмичности Приамурья расположение гипоцентров землетрясений и соответствующие им распределения магнитуд характеризуются вертикальной дискретностью. В разрезах тектоносферы регистрируется 3 слоя повышенной сейсмичности: первый в средней части коры в интервале глубин 10-20 км с магнитудами 2,8-3,4; второй в интервале глубин 30-60 км, где гипоцентры землетрясений с магнитудами от 4 до 6 распределены неравномерно, а третий слой в интервале глубин 100-200 км с магнитудами от 5,5 до 6,0 на рассматриваемой территории представлен редкими землетрясениями, сосредоточенными преимущественно вдоль юго-восточной границы Амурской плиты и северного фланга Северо-Китайского кратона. Первый уровень повышенной концентрации и интенсивности землетрясений приурочен к гранитно-метаморфическому слою земной коры в сейсмических разрезах [7, 15], второй - к переходному слою «кора-мантия» и третий - к нижнему жесткому литосферному слою. Во втором слое широко распространены линзы и прослои сред пониженной вязкости, диагностируемые минимумами скорости сейсмических волн и удель-



Рис. 3. Тектоническая схема (a) [15], распределения магнитуд землетрясений в интервалах глубин 10−14 (б) и 30−60 км (в); разрезы (г) 3D-модели распределения магнитуд землетрясений в земной коре Приамурья и Северо-Восточного Китая. 1, 2 – границы тектонических структур (1) и Амурской плиты (2); 3 – изопахиты мощности литосферы [19]; 4 – сдвигораздвиговая зона Танлу; 5 – оси зон пониженной сейсмичности; 6 – контур Мая-Селемджинского плюма; 7 – изолинии равных магнитуд; 8 – шкала раскраски разрезов. Обозначения структур над разрезами: ОП – Охотоморская плита; о. Сах – остров Сахалин; архейские и протерозойские структуры: СКК – Северо-Китайский кратон, АЩ – Алданский щит; массивы с дорифейским фундаментом: АМ – Аргуно-Мамынский, ЦБ – Цзямусы-Буренинский; мезозойско-кайнозойские впадины: САВ – Средне-Амурская, СЛ – Суньляо; СХВП – Северо-Хинганский вулканический пояс; МСП – Мая-Селемджинский плюм. Другие обозначения см. на рис. 1

Fig. 3. Tectonic map (a) [15], distributions of earthquake magnitudes in the range of 10-14 (6) and 30-60 km (B); sections (r) of 3D-model of earthquake magnitude distributions in earth crust of Amur region and North-East China. 1, 2 - boundaries of tecto-nic structures (1) and Amur platform (2); 3 - isopachytes of lithosphere thickness [19]; 4 - shear-spreading area of Tanlu; 5 - axes of low seismic activity areas; 6 - edge of Mai-Selemdhzinsk plume; 7 - equal magnitude isolines; 8 - scale of section coloring. Structures over sections: OΠ - Okhotsk sea platform; o. Cax - Sakhalin island; Archean and Proterozoic structures: CKK - North Chinese craton, AЩ - Aldanian shield; missives with pre-Riphean base: AM - Argun-Mamyn, ЦБ - Jiamusi-Bureninsk; mesozoic-kainozoic cavities: CAB - Middle-Amur, CΠ - Sunlyao; CXBΠ - North-Khingan volcanic belt; MCΠ - Mai-Selemdhzinsk plume. The other symbols are in Fig. 1

ных электрических сопротивлений [7, 15, 16], что обусловливает его высокую реологическую неоднородность и соответственно дифференцированную в пространстве сейсмичность.

Тонкий слой верхнекоровой повышенной сейсмичности в интервале глубин 10-14 км резко обособлен от поля сейсмичности в нижнем слое коры (разрезы 3-3 и 10-10 на рис. 3, г). В этом слое сдвигово-раздвиговая зона Танлу [7, 14, 17], сопровождаемая резким сокращением мощности литосферы (рис. 3, а), разделяет области с различным распределением магнитуд землетрясений. Восточная область характеризуется субмеридиональным простиранием пояса повышенной сейсмичности на границе Амурской и Охотоморской плит, а западная - чередованием линейных минимумов и максимумов сейсмичности северо-западного простирания (рис. 3, б). Такие распределения магнитуд могут быть обусловлены разными векторами приложения современных тектонических напряжений. Сейсмичность большей части Центрально-Азиатского складчатого пояса является отражением конвергенции Индийской и Евразиатской плит, начало которой относится к олигоцену [18], а сейсмичность его восточного фланга – цикличными процессами сжатия-растяжения на границе Амурской и Охотоморской плит. Ось восточной зоны высокой сейсмичности в слое 10-14 км проходит по Татарскому рифту, а на схеме расположения эпицентров всех землетрясений [3] - по западному побережью о. Сахалин. Эта зона повторяет восточный контур Амурской плиты (рис. 3, б).

Линеамент Танлу представляет собой широкую зону мезозойско-кайнозойских деформаций и дислокаций растяжения-сдвига, мигрирующую [20] в восточном направлении. В мезозое эта структура контролировала формирование впадины Сунляо и внедрение вулканических магм в Хингано-Охотском поясе [1], а в кайнозое сместилась к востоку и приобрела признаки сдвиговых дислокаций [14, 17]. По указанной причине ось зоны Танлу (главный разлом) на тектонических картах российских и китайских исследователей занимает разное положение [4, 14, 21, 22]. На некоторых картах и схемах [23] эта зона вообще не показывается. Зону Танлу иногда называют сейсмогенной, однако на изученном авторами северном отрезке этой зоны (рис. 3) сильные землетрясения в последние 10 лет не происходили, а большинство землетрясений с магнитудами M = 3,5-4 происходили на флангах этой зоны (рис. 2, *a*, *б*). На рассматриваемой территории магнитуды в среднем слое земной коры (5-20 км) не превышают 4,0 (в среднем составляют 3-3,5), а в нижней коре - 6,0 (средний уровень 4,0). И только на южном продолжении зоны Танлу, где она пересекает Северо-Китайский кратон, происходили землетрясения с магнитудами 7,0-8,5 (районы Чишань, Анкин, Бохайский залив) [17]. Различная интенсивность сейсмических процессов на северном и южном отрезках зоны Танлу объясняется различными реологическими свойствами земной коры Северо-Китайского кратона и Центрально-Азиатского складчатого пояса. Аналогичным образом отличается сейсмичность Алданского щита и северо-западного фланга Амурской плиты (рис. 4, *a*).

Намного более интенсивные, чем в зоне Танлу, сейсмические процессы произошли на о. Сахалин и в зоне Татарского рифта, однако из рассмотренных моделей (рис. 2; 3,  $\delta$ ,  $\epsilon$ ) следует, что рифтогенные процессы затронули преимущественно коровый диапазон литосферы, а ниже этой глубины литосфера переходной зоны «континент-океан» сохранила свои реологические свойства, существовавшие до отрыва Японских островов от континента 20 млн лет назад [1].

Распределение магнитуд землетрясений в разрезах M(x, y, z)-модели до глубины 60 км опосредованно связано с глубинным строением Приамурья и прилегающих районов. К западу от разлома Танлу зоны повышенной сейсмичности в интервале глубин 10-30 км совпадают с архейскими блоками земной коры в составе Северо-Азиатского и Северо-Китайского кратонов (разрезы 3-3 и 10-10, рис. 3, г). По распределению магнитуд в разрезе 10-10 можно предположить продолжение гранитно-метаморфического слоя Северо-Китайского кратона под вулканогенно-складчатые комплексы Центрально-Азиатского складчатого пояса и Цзямусы-Буреинский массив (террейн) кратонного типа. Сейсмичность среднего слоя земной коры Тихоокеанского складчатого пояса в интервале глубин 7-20 км пространственно коррелируется с жесткими пластинами океанической коры, пододвинутыми под складчатые комплексы материковой окраины [24]. Это пододвигание проявлено в распределениях магнитуд землетрясений в разрезах (рис. 3, г) и в плане (рис. 3, б). В разрезе 10-10 (рис. 3, г) граница между континентальным и океаническим среднекоровыми слоями проходит по оси Средне-Амурской впадины, маркирующей современное положение раздвиго-сдвиговой зоны Танлу [15, 21]. Позднемезозойское положение этой зоны совпадает с Хингано-Охотским вулканическим поясом [4, 19]. В поле магнитуд землетрясений зона Танлу характеризуется минимумом в широком интервале глубин (рис. 3, г). Пониженная сейсмичность осевой части зоны Танлу объясняется ее интенсивной позднемезозойско-кайнозойской тектонической (раздробление) и магматической (подплавление) проработкой. В подкоровом слое верхней мантии мезозойское положение зоны Танлу отмечается понижением электрических сопротивлений и сокращением мощности земной коры [15].

Зона низкой сейсмичности в среднем слое земной коры (интервал глубин 10–20 км) наблюдается под северным флангом Северо-Хинганского вулканического пояса [25] (разрез 8–8 на рис. 3, г). В надкупольной зоне Мая-Селемджинского плюма [24] область пониженной сейсмичности расширяется в плане до 900 км (рис. 3, *в*, г). По мнению авторов, наблюдаемые уменьшение магнитуд землетрясений являются индикатором пониженной вязкости средне- или нижнекорового слоев вследствие неполной кристаллизации мезозойских магматических очагов – источников широких вулканических полей на поверхности Земли.

Граница раздела гранитно-метаморфического и нижнего слоев земной коры на глубине порядка 20 км выражена сгущением (повышенным градиентом) средних магнитуд землетрясений (разрезы 3–3 и 10–10, рис. 3, *г*).

В западной половине разреза 10-10 (рис. 3, г) хорошо выражен тонкий слой низких магнитуд (*M*=2,6-3,0) на глубине порядка 16-20 км. Этот слой разделяет гранитно-метаморфический и мафический нижний слои земной коры в Северо-Китайском кратоне и Цзямусы-Буреинском террейне кратонного типа. В последнее время в этом же интервале глубин здесь [7, 20] и в других районах с древней корой [9, 26] выявлены слои с низкими значениями скорости сейсмических волн и удельных электрических сопротивлений. Существование слоя пониженной вязкости на границе гранитно-метаморфического и мафического слоев земной коры обеспечивает условия для горизонтальных перемещений тектонических масс, выраженных на поверхности многочисленными надвигами и сдвигами в Танлу-Сихотэ-Алинской системе трансформных деформаций притихоокеанской континентальной окраины [14, 27] и на южной границе Северо-Азиатского кратона [1].

Изучение пространственных распределений магнитуд землетрясений в подкоровом слое верхней мантии (рис. 3, в) обнаружило сейсмологические признаки существования тектоно-магматической структуры центрального типа - Мая-Селемджинского плюма, наложенного на линейные структуры и сопровождающегося изометричным поднятием астеносферы, концентрической реологической зональностью земной коры и рудной минерализации [24]. В центральной, асейсмичной, зоне плюма (рис. 3, в) предшествующими исследованиями выявлена зона резкого уменьшения скорости сейсмических волн и резкое поднятие изотермы 1000 °С до глубины 50 км [11], объясняющие пониженную вязкость подкупольной (коровомантийной) зоны плюма. 3D-анализ поля сейсмичности рассматриваемого района приводит к выводу, что Мая-Селемджинский плюм нашел выход к поверхности Земли в месте пересечения линейных асейсмичных зон пониженной вязкости северовосточного и северо-западного простираний (рис. 3, б, в), маркирующих глубинные разломы литосферы. Первая из них принадлежит сдвигораздвиговой зоне Танлу, которая в позднем мезозое сопровождалась интенсивной магматической проработкой в Хингано-Охотском вулкано-плутоническом поясе [1]). Вторая, столь же широкая, зона пониженной вязкости северо-западного простирания (рис. 2, в; 3, б) разделяет области с разным типом деформаций верхнего слоя земной коры [22, 25]. К северу от нее преобладают северо-западные простирания разломов и осей складок, а к югу – северо-восточные. Зона резкого структурного несогласия шириной порядка 100 км «обрезает» северо-восточный фланг Цзямусы-Буреинского массива и нарушает субширотные структуры Монголо-Охотской складчатой системы на отрезке между 129 и 133 °N. Разломы, теневая складчатость и зоны рассланцевания северо-западного простирания формируют структурный рисунок фанерозойских деформаций Алданского щита. Западной границей области проявления этих деформаций является Джелтулакский разлом, разделяющий районы с разным типом земной коры [15]. В примыкающем к разлому с востока Байкало-Витимском супертеррейне опять преобладают деформации и дислокации северо-восточного простирания [25]. В поле механических напряжений литосферы Амурской плиты [28] зоне низких магнитуд землетрясений в широтном интервале 48-52 °N (рис. 2, б, в; 3, б) соответствует зона растяжения.

#### Верхне-Амурский регион

Рассматриваемый регион (рис. 4) располагается в зоне сочленения северо-западного фланга Амурской литосферной плиты с Северо-Азиатским кратоном – допалеозойским основанием Евразиатской плиты [1, 2, 15]. В верхнекоровом диапазоне глубин (0-10 км) здесь с резким угловым несогласием граничат палеозойские и мезозойские складчатые и вулканические комплексы Центрально-Азиатского складчатого пояса с архейско-протерозойскими метаморфическими комплексами Северо-Азиатского кратона [22, 25]. В конце юрского – начале мелового периода Амурская плита жестко сочленилась с Северо-Азиатским кратоном [1], однако вещественная и реологическая неоднородность этих структур в глубоких слоях земной коры до сих пор продолжает находить отражение в распределениях магнитуд землетрясений (рис. 4).

Распределение магнитуд землетрясений в верхнем слое земной коры (рис. 4, *a*) вполне определенно объясняется вещественным составом и степенью жесткости (вязкости) приповерхностных тектонических комплексов. Землетрясения с наибольшими магнитудами вписываются в контуры Алданского щита, сложенного глубоко метаморфизованными кристаллическими комплексами. Палеозойские и мезозойские складчатые комплексы Амурской плиты, перекрытые на юго-востоке рассматриваемого района мезозойско-кайнозойскими вулканогенно-осадочными образованиями Амуро-Зейской впадины, характеризуются резко пониженными магнитудами землетрясений (*M*=2,0-2,4) относительно кратона. Граница между архейско-протерозойскими и преимущественно палеозойско-мезозойскими комплексами, которую большинство исследователей отождествляет с границей Евразиатской и Амурской плит, выражена зоной повышенных градиентов магнитуд в интервале значений M=2,4-2,8 (рис. 4, *a*).

В среднем слое земной коры (рис. 4,  $\delta$ ) области повышенных магнитуд землетрясений совпадают с расположением Алданского щита и блоками кратонного типа: Аргуно-Мамынского, Дягдагачинского и Мамынского. Область пониженной сейсмичности (M=2-2,6) совпадает с Северо-Хинганским вулканическим поясом, сложенным позднемезозойскими вулканитами [25]. В разрезе 8–8 (рис. 3,  $\epsilon$ ) под этим поясом располагается зона низких магнитуд в интервале глубин 10–20 км.

В следующем (по возрастанию глубин) слое земной коры (рис. 4, в) отмеченные особенности распределения магнитуд в основном сохраняются, однако Алданский щит в этом срезе резко обособлен от Становика, пронизанного юрско-меловыми гранитоидами, а в пределах Амурской плиты локальные максимумы магнитуд расширяются и объединяются. В этом слое максимальные магнитуды землетрясений регистрируются в южной части Алданского щита, в Аргуно-Мамынском и Цзямусы-Буреинском террейнах кратонного типа. Разделяющие их зоны пониженных магнитуд совпадают со Становым гранитным и Хингано-Охотским вулканическим поясами, где они, вероятно, отображают зоны пониженной вязкости, обусловленные неполной кристаллизаций магматических расплавов.

Линейные элементы поля сейсмичности Верхнего Приамурья, отражающие характер современных тектонических напряжений в зонах сочленения Северо-Азиатского кратона с Амурской плитой, сопряжены с существованием глубинной структуры центрального типа – Алдано-Зейского плюма [29]. Эта структура выражена концентрическим расположением эпицентров землетрясений и аномалий нормированной поверхностной плотности (µ<sub>z</sub>-параметра), закономерным изменением направлений векторов сейсмотектонического сжатия в полях сильных землетрясений и дуговыми магнитными аномалиями, ориентированными согласно контурам плюма. На северных, восточных и западных флангах структуры широко распространены кайнозойские щелочные базальты - признанные индикаторы мантийных плюмов во многих районах мира, а к центру структуры приурочены аномалии теплового потока интенсивностью более 50 mBt m<sup>-2</sup> [29].

В поле сейсмичности Алдано-Зейский плюм выражен минимумом магнитуд землетрясений в слое 18–22 км (рис. 4, г). Асейсмичность центральной (стволовой) зоны плюма может быть обусловлена неполной кристаллизацией магматического очага – источника позднемезозойских андезитов и кайнозойских щелочных базальтов [25], либо его повышенной флюидонасыщенностью, о чем косвенно свидетельствует мощная зона аномальной электрической проводимости в интервале глубин 20–60 км, кровля которой куполообразно воздымается в центре плюма [30]. Судя по разрезу 1–1 (рис. 4, д), асейсмичная зона пониженной вязкости в центре плюма продолжается в верхнюю мантию, где находит подтверждение в гравитационной модели: минимум  $\mu_{Z}$ -параметра, сопровождающий поднятие астеносферного слоя [29]. В разрезе 1–1 (рис. 4,  $\partial$ ) слой пониженной вязкости, диагностируемый по минимуму магнитуд землетрясений, имеет грибовидную форму, типичную для подкоровых и внутрикоровых зон плюмов [24].

Полученные данные (рис. 4) приводят к выводу, что Алдано-Зейский плюм нашел выход в приповерхностные слои земной коры в узле пересечения допозднемезозойской границы Евразиатской и Амурской литосферных плит Джелтулакским глубинным разломом, ориентированным в северозападном направлении. Таким образом, его структурная позиция близка к позиции рассмотренного выше Мая-Селемджинского плюма.

3D-анализ поля сейсмичности Приамурья и Северо-Восточного Китая обнаружил близкие черты связи магнитуд землетрясений с глубинным строением северо-западного (рис. 4) и восточного (рис. 3) флангов Амурской плиты:

- В обоих районах наибольшей сейсмичностью характеризуется гранитно-метаморфический слой земной коры, обнажающийся на земной поверхности в Северо-Азиатском и Северо-Китайском кратонах и фрагментарно в выступах дорифейского фундамента (Байкало-Витимском, Мамынском, Дягдагачинском и Туранском) в зонах домезозойской складчатости и палеозойского гранитоидного магматизма.
- Нарушения жесткости (понижение вязкости) гранитно-метаморфического слоя, выраженные в уменьшении магнитуд землетрясений, наблюдаются в зонах глубинных разломов (Танлу, Станового) и в стволовых частях плюмов (Алдано-Зейского и Мая-Селемджинского).
- 3. По распределениям магнитуд землетрясений в обоих районах в интервале глубин 20–25 км выявлен слой пониженной вязкости, разделяющий гранитно-метаморфический и нижнекоровый мафический слои земной коры. Этот слой находит выход к поверхности Земли в позднемезозойских вулканических поясах (Северо-Хинганском, Хингано-Охотском) и утолщается в стволовых зонах плюмов (Алдано-Зейском и Мая-Селемджинском).
- 4. Обнаружены признаки приуроченности глубинных структур центрального типа к узлам пересечения северо-западных и северо-восточных глубинных разломов.

#### Охотоморский регион

Охотоморский регион является местом сочленения допозднемезозойской континентальной окраины с Охотоморской буферной плитой 2-го порядка, которая на востоке граничит с Тихоокеанской плитой (рис. 1). Имеются геологические и геофизические признаки субдукции Охотоморской плиты под континентальную окраину [31, 32] и Тихоокеанской – под Охотоморскую [1, 33]. С подводных возвышенностей Охотского моря дра-



Рис. 4. Распределения магнитуд землетрясений в интервалах глубин 1−6 (а), 30−60 (б), 14−18 (в) и 18−22 км (г); разрез (д) 3Dмодели распределения магнитуд землетрясений в Верхнем Приамурье и Северо-Восточном Забайкалье. 1, 2 – границы литосферных плит (1) и тектонических структур (2); 3 – контуры Алдано-Зейского плюма в горизонтальных сечениях, км [24]; 4 – изолинии равных магнитуд; 5 – зона пониженной сейсмичности в разрезе. Обозначения структур [15, 25]: массивы с дорифейским основанием: БВТ – Байкало-Витимский, АМ – Аргуно-Мамынский, Д – Дягдагачинский, ЦБ – Цзямусы-Буреинский; локальные выступы дорифейского фундамента: М – Мамынский, Т – Туранский; СХВП – Северо-Хинганский вулканический пояс. Глубинные разломы (цифры в квадратах): 1 – Джелтулакский, 2 – Становой (Южно-Якутский), Северо-Тукурингринский. Другие обозначения см. на рис. 1 и 2

Fig. 4. Distributions of earthquake magnitudes in depth range of 1–6 (a), 30–60 (b), 14–18 (b) and 18–22 km (r); section (д) of 3D-model of earthquake magnitude distribution in upper Amur region and North-East Baikal region. 1, 2 – boundaries of lithosphere platforms (1) and tectonic structures (2); 3 – edges of Aldan-Zeisk plume in horizontal sections, km [24]; 4 – isoseismal lines; 5 – region of low seismic activity in section. Structures [15, 25]: massives with pre-Riphean basement: *BBT* – Baikal-Vitim, AM – Argun-Mamyn, *Д* – Dyagdagachinsky, *ЦБ* – Jiamusi-Bureninsk; local bowings of pre-Riphean basement: *M* – Mamyn, *T* – Turan; CXBΠ – North-Khingan volcanic belt. Deep faults (numbers are squared): 1 – Dzheltulaks, 2 – Stanovoy (Sothern-Yakutsk), North-Tukuringrinsk. The other symbols are in Fig. 1, 2

гированы разнообразные по возрасту (PZ<sub>2</sub>-KZ), составу и происхождению породы, изучение которых, однако, не дало однозначного ответа на происхождение Охотоморской плиты. Одни исследователи [11] отождествляют эту плиту с затопленной окраиной континента, другие [34] предполагают ее океаническое происхождение и отождествляют плиту с океаническим базальтовым плато, причлененным к континенту в позднем мезозое, третьи [35] связывают ее образование с подъемом мантийного диапира.

Начиная с миоцена и до настоящего времени Охотоморская плита является местом проявления интенсивных деструктивных рифтогенных процессов [36], в результате которых ее земная кора была раздроблена и пронизана магматическими инъекциями преимущественно андезитового состава. В приповерхностном слое земной коры эти



- Рис. 5. Карты-срезы 3D-модели распределения магнитуд землетрясений в нижнем слое земной коры, интервал глубин 32–36 км (а), и верхней мантии, интервал глубин 80–150 км (б) с разрезами (в) в Охотоморском регионе. 1 изолинии равных магнитуд; 2 – границы литосферных плит; 3, 4 – оси линейных зон повышенной (3) и пониженной (4) сейсмичности в разрезах; 5 – зона пониженных магнитуд в стволовой части Охотоморского плюма. Обозначения плит: АМ – Амурская, ОП – Охотоморская, ТП –Тихоокеанская. ЮО – Южно-Охотский рифт
- Fig. 5. Map-section of a 3D-model of earthquake magnitude distribution in low layer of earth crust, depth range is 32–36 km (a), and in upper mantle, depth range is 80–150 km (6) with sections (B) in Okhotsk sea region. 1 isoseismic lines; 2 boundaries of lithospheric platforms; 3, 4 axes of linear areas of high (3) and low (4) seismic activity on sections; 5 region of low magnitudes in stem part of Okhotsk plume. Platforms: AM Amur, OΠ Okhotsk, TΠ –Pacific. IOO South-Okhotsk rift

процессы выражены многочисленными рифтогенными впадинами, мощность осадков в которых достигает 8 км (в среднем 3–4 км) [36].

Согласно предшествующим исследованиям [1, 37] здесь выделяют шесть сейсмогенерирующих горизонтов, связанных со скоростными границами раздела тектоносферы: верхнекоровый, нижнекоровый, корово-мантийный, астеносферный, подастеносферный и сейсмический горизонт в переходной зоне мантии (ПЗМ-горизонт). Коровые землетрясения сосредоточены преимущественно в Хоккайдо-Сахалинской и Курило-Камчатской сейсмических зонах, а глубокофокусные мантийные – в восточных районах Охотского моря и в прибрежных районах континента. Несмотря на очевидную дискретность распределений роев землетрясений [1, 37], их гипоцентры большинство исследователей коррелирует в сейсмофокальных зонах, увязываемых с геометрией субдуцирующей Тихоокеанской литосферы. Моделирование сейсмофокальных зон осуществляется путем проецирования гипоцентров на вертикальную плоскость разрезов в широких (до 1000 км в поперечнике) полосах, пересекающих регион. Такой способ заранее предполагает существование устойчивых трендов сейсмичности по азимутам разрезов и не учитывает локальные особенности проявления сейсмичности на прилегающих к разрезам участках. В результате таких процедур коррелируемыми в 3D-пространстве оказываются гипоцентры землетрясений, располагающиеся в разных тектонических средах (слоях), которые априорно относятся только к одному слою - субдуцирующей литосфере.

Более полное представление о характере сейсмичности в Охотоморском регионе дают послойные схемы-срезы 3D-модели распределений магнитуд землетрясений, которые, наряду с линейными трендами сейсмичности (рис. 5, *a*, *б*), предоставляют возможность увидеть пространственные закономерности в распределениях локальных роев землетрясений на разных глубинных уровнях и качественные характеристики сейсмических неоднородностей, обусловленные реологическим состоянием тектонических сред. Так же как и в рассмотренных выше континентальных районах, более вязкие (прочные, жесткие) среды отображаются высокими значениями магнитуд землетрясений, а менее вязкие – низкими.

Изучение связи сейсмичности с глубинным геологическим строением в Охотоморском регионе основывается на распределениях магнитуд 1286 землетрясений, произошедших здесь в период с января 1991 по октябрь 2011 гг. Из расчетов исключены землетрясения, многократно повторяющиеся в близко расположенных гипоцентрах

В распределении магнитуд нижнекоровых землетрясений (рис. 5, *a*) отчетливо проявлены главные особенности строения земной коры Охотоморского региона. Резким скачком магнитуд выражена граница между Охотоморской и Тихоокеанской плитами, которая проходит параллельно Курильской островной дуге. Западная зона высокой сейсмичности совпадает с северо-восточным флангом Амурской плиты. Здесь в Восточно-Сахалинской складчатой системе выходят на поверхность высокоплотные юрско-меловые офиолиты, ультрабазиты и габбро-диабазы островодужного происхождения [1, 31], способные накапливать сейсмогенные тектонические напряжения. Тихоокеанская и Амурская области высокой сейсмичности разделяются линейным минимумом магнитуд (рис. 5, а), совпадающим с расположением Южно-Охотской рифтогенной впадины. В этой впадине мощность земной коры сокращена до 12-15 км [11, 36], а в гравитационной модели [24] она выражена минимумом параметра (µ<sub>z</sub>), отражающего реологическое состояние тектонических сред. Судя по распределениям магнитуд землетрясений в разрезах (рис. 5, в), зона корового реологического разуплотнения продолжается в верхнюю мантию до глубины 150 км или более.

Винтервале глубин 80-150 км (рис. 5, б) изометричным минимумом магнитуд землетрясений отображается астеносферная часть (голова) Охотоморского плюма [24], которая в тепловой модели [36] выражена куполообразным поднятием астеносферы, а в гравитационной - изометричным минимумом градиента сферической плотности в срезе на глубине 120 км [24]. Магнитуды землетрясений в тихоокеанской части этого слоя резко понижены относительно магнитуд в нижнекоровом слое (рис. 5, а) и характеризуются высокой неоднородностью по простиранию сейсмофокальной зоны. При этом изолинии средних магнитуд в тихоооканской верхней мантии ориентированы поперек границы Тихоокеанской и Охотоморской плит. Последнее может рассматриваться в качестве признака поперечных (сдвиговых?) глубинных сейсмогенных деформаций на этой границе.

Пододвигание тихоокеанской литосферы под Охотоморскую плиту читается в разрезах M(x,y,z)модели, однако это пододвигание в приводимых данных (рис. 5, e), уверенно прослеживается только до глубины 100 км. Литосфера Амурской плиты характеризуется двухслойным строением: кристаллическая кора и нижний слой литосферы разделены слоем пониженной вязкости, выраженным снижением магнитуд землетрясений до 3-3-3-6.

Земная кора Охотоморской плиты менее сейсмична, чем кора окружающих ее Тихоокеанской и Амурской плит. В разрезах она выражена асимметричным прогибанием изолиний средних магнитуд до глубины 20–25 км (рис. 5, в). Судя по распределениям магнитуд, кровля сейсмичного нижнекорового слоя тихоокеанской коры погружается под верхнекоровый вязкий слой Охотоморской плиты. Пространственному положению этой границы соответствует зона сгущения изолиний средних магнитуд в интервале глубин 18–25 км.

Выполненный анализ пространственных распределений магнитуд землетрясений в Охотоморском регионе лучше всего согласуется с тектонической моделью расслоенной литосферы [38], частным случаем которой является модель двухслойной литосферы Л.И. Лобковского [39], обосновывающая широкое присутствие в литосфере подкорового вязкого слоя, разделяющего литосферу на две жесткие составляющие. Этот слой выражен минимумами магнитуд землетрясений в интервале глубин 40–80 км. Зона субдукции тихоокеанской литосферы под охотоморскую разрывается (slab window) Охотоморским плюмом и наложенным на него Южно-Охотским рифтом.

#### Заключение

Рассмотренные данные свидетельствуют о более широком разнообразии связей сейсмических процессов с глубинным строением земной коры и верхней мантии в Дальневосточном регионе России, чем это предполагается в доминирующих моделях «разлом-землетрясение» и «субдукция-землетрясение». Распределения магнитуд землетрясений в непрерывном геологическом пространстве содержат информацию о глубинном строении изучаемых объемов тектоносферы. По 3D-распределениям магнитуд отчетливо картируются среды, различающиеся по реологическим свойствам, что может быть использовано при тектоническом районировании геодинамически активных районов (в которых *M*>2), а при дальнейшем развитии сети сейсмических станций и совершенствовании аппаратуры, способной регистрировать слабые землетрясения (*M*=0,5–1,5), – вообще любых районов.

Во всех изученных нами районах области и зоны повышенных магнитуд землетрясений в верхнем слое земной коры до глубины 10-15 км пространственно коррелируются с древними метаморфическими комплексами кратонов (Северо-Азиатского, Северо-Китайского) и с блоками кратонного типа (Цзямусы-Буреинским, Дягдагачинским, Мамынским, Туранским), в основании которых эти комплексы предполагаются по геолого-геофизическим данным. Карты-срезы и разрезы M(x,y,z)-моделей дают приблизительную оценку глубины залегания, вертикальной мощности и объемных границ этих комплексов. В акваториях окраинных морей максимумами магнитуд отобра-

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России / под ред. Ханчука А.И. – Владивосток: Дальнаука, 2006. – 81 с.
- Тектоника, геодинамика и металлогения территории республики Саха (Якутия) / под ред. Л.М. Парфенова, М.И. Кузьмина. – М.: Наука, 2001. – 71 с.
- Василенко Н.Ф., Прытков А.С. Моделирование взаимодействия литосферных плит на о. Сахалин по данным JPS-наблюдений // Тихоокеанская геология. – 2012. – Т. 31. – № 1. – С. 42–48.
- Горкуша С.В., Онухов Ф.С., Корчагин Ф.Г. Сейсмичность и неотектоника юга дальнего Востока // Тихоокеанская геология. – 1999. – Т. 18. – № 5. – С. 61–68.
- Имаев В.С. Взаимосвязь распределений гранитоидных интрузий и сейсмической активности землетрясений на Северо-Востоке

жаются островные дуги (Сахалинская, Курильская), в фундаменте которых присутствуют высокоплотные океанические ультрабазиты.

В разрезах континентальной окраины выявлены признаки пододвигания жестких пластин океанической коры под мезозойские складчатые комплексы. На западной границе Тихоокеанской плиты обнаружены признаки пододвигания коровомантийного океанического слоя под земную кору Охотского моря. Однако в приводимых моделях безусловные сейсмологические признаки субдукции тихоокеанской литосферы под Охотоморскую плиту ограничиваются глубиной 100 км.

Пониженными и низкими магнитудами землетрясений (*M*=2,5-3,2) отмечаются зоны пониженной вязкости в среднем слое земной коры, подкоровом слое верхней мантии и астеносфере. Обнаружены три геометрических типа таких зон: вертикальные линейные, слоисто-горизонтальные и локальные изометричные. Первые совпадают со структурами растяжения литосферы и магмопроницаемыми зонами глубинных разломов, вторые с границами раздела структурно-вещественных комплексов в разрезах, а третьи - с центрами тектоно-магматических структур плюмовой природы. Во всех случаях зоны низкой сейсмичности сопровождаются комплексом геолого-геофизических признаков, указывающих на флюидную, магматическую или тектоническую проработку соответствующих им геологических структур.

Охарактеризованные связи сейсмичности с глубинными структурами земной коры могут быть использованы в качестве дополнительных признаков при тектоническом районировании и мелкомасштабном глубинном картировании геодинамически нестабильных территорий. Они могут быть полезны при выборе мест заложения будущих региональных сейсмических и магнитотеллурических профилей (транссектов), преследующих цели выявления главнейших черт и особенностей глубинного строения тектоносферы Дальневосточного региона на стыках геологических структур разного происхождения, возраста и ранга (литосферных плит, кратонов и складчатых областей, вулканоплутонических поясов, плюмов и рифтовых систем).

России // Современная геодинамика, активные разломы и сейсмическое районирование. – М.: ГИН АН СССР, 1990. – С. 5–7.

- Петрищевский А.М. Связь сейсмичности с плотностными неоднородностями литосферы Дальнего Востока России // Вулканология и сейсмология. – 2007. – № 6. – С. 60–71.
- Бормотов В.А., Меркулова Т.В. Кайнозойский этап развития северной ветви Тан-Лу-Охотской рифтовой системы: глубинное строение и сейсмогеодинамика // Тихоокеанская геология. – 2012. – Т. 31. – № 1. – С. 26–41.
- Мониторинг сейсмогенных зон Хабаровского края / отв. ред. Ф.Г. Корчагин. – Владивосток: Дальнаука, 2002. – 240 с.
- Кушнир А.Н., Зайцев Г.Н. Региональные аномалии высокой электропроводности Австралийского континента и эпицентры землетрясений // Геодинаміка. – 2011. – № 2. – С. 152–154.
- Lithosphere versus astenosphere mantle sources at the Big Pine Volcanic Fields, California / E. Gazel, K.T. Plank, D.W. Forthys, C. Bendesky, C-T.A. Lee, E. Hauri // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. - 2012. - V. 13. - № 1. - P. 1-25.
- Тектоносфера Тихоокеанской окраины Азии / под ред. В.В. Гордиенко. – Владивосток: ДВО РАН, 1992. – 238 с.
- 12. Chine earthquake data center. URL: http://data.earthquake.cn/data/ (дата обращения: 01.05.2014).
- Глаголев В.Н., Петрищевский А.М. Простой алгоритм построения разрезов с использованием 3D-массивов геолого-геофизической информации (Юго-Восток России) // Тихоокеанская геология. – 2010. – Т. 4. – № 3. – С. 78–85.
- 14. Уткин В.П. Тан-Лу-Сихотэ-Алинский структурный парагенез // Тектоника, магматизм и геодинамика Востока Азии: Матер. Всеросс. конф. – Хабаровск, 12–15 сентября 2011. – Хабаровск: ИТИГ ДВО РАН, 2011. – С. 141–144.
- Глубинное строение и металлогения Восточной Азии / ред. А.Н. Диденко, В.Б. Каплун, Ю.Ф. Малышев. – Владивосток: Дальнаука, 2010. – 332 с.
- Каплун В.Б. Структура литосферы Дальневосточного региона по данным МТЗ // Тектоника, глубинное строение и геодинамика Востока Азии: Всеросс. конф.: IV Косыгинские чтения. – Хабаровск, 21–23 января 2003. – Хабаровск: ДВО РАН, 2003. – С. 153–163.
- Cenozoic extensional stress evolution in North China / Zhang Yequiao, Ma Yinsheng, Yang Nong, Shi Wei, Dong Shuwen // Journal of Geodynamics. - 2003. - V. 36. - P. 591-613.
- Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.М. Тектоника литосферных плит территории СССР. Кн. 2. – М.: Недра, 1990. – 334 с.
- Горнов П.Ю. Тепловое поле области сопряжения Центрально-Азиатского и Тихоокеанского складчатых поясов и смежных окраин Сибирской и Северо-Китайской платформ: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Хабаровск, 2010. – 28 с.
- Петрищевский А.М. Отражения рифтогенных структур в гравитационных моделях Северо-Востока Азии // Тектоника, магматизм и геодинамика Востока Азии. Хабаровск: ИТИГ ДВО РАН, 2011. С. 298–301.
- Lin G., Wang Ya. The P-wave velocity structure of the crust-mantle transition zone in the continent of China // Journal of Geophysics and Engineering. - 2005. - № 2. - P. 268-276.
- Zhi S., Cai Yo., Shi Ya. The contemporary tectonic strain rate field of continental China predicted from GPS measurements and geodynamics implication // Pure and Applied Geophysics. 2006. V. 163. P. 1477–1493.
- Тектоническая карта области сочленения Центрально-Азиатского и Тихоокеанского поясов масштаба 1:1500000 / ред. Л.П. Карсаков, Чжао Чуньцзинь, Ю.Ф. Малышев, М.В. Горшков. – Владивосток; Хабаровск: ИТИГ ДВО РАН, 2005.
- Петрищевский А.М. Гравитационный метод оценки реологических свойств земной коры и верхней мантии (в конвергентных и плюмовых структурах Северо-Восточной Азии). М.: Наука, 2013. 192 с.

- 25. Геологическая карта Приамурья и сопредельных территорий. Масштаб 1:2500000 / гл. ред. Л.И. Красный, Пэн Юнь Бяо. – Л.: ВСЕГЕИ, 1999. – 3 л. с объяснит. запиской 135 с.
- Ваньян Л.Л., Павленкова Н.И. Слой пониженной скорости и повышенной электропроводности в основании верхней части земной коры Балтийского щита // Известия РАН. Физика Земли. – 2002. – № 1. – С. 1–9.
- Результаты анализа данных GPS измерений (2003–2006 гг.) на Дальнем Востоке по Сихотэ-Алинской сети / В.Ю. Тимофеев, П.Ю. Горнов, Д.Г. Ардюков, Ю.Ф. Малышев, Е.В. Бойко // Тихоокеанская геология. – 2008. – Т. 27. – № 4. – С. 39–49.
- Шевченко Б.Ф., Саксин Б.Г., Рассказов И.Ю. Глубинное строение и морфоструктуры Амурской тектонической плиты (континентальная часть) // Тектоника, магматизм и геодинамика Востока Азии. – Хабаровск: ИТИГ ДВО РАН, 2011. – С. 336–338.
- Петрищевский А.М., Юшманов Ю.П. Геофизические, магматические и металлогенические признаки проявления мантийного плюма в верховьях рек Алдан и Зея // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – № 4. – С. 568–593.
- Каплун В.Б. Геоэлектрические строение Верхнеамурского района по данным магнитотеллурических зондирований // Тихоокеанская геология. – 2006. – Т. 25. – № 1. – С. 33–53.
- Гранник В.М. Геология и геодинамика южной части Охотоморского региона в мезозое и кайнозое. – Владивосток: Дальнаука, 2008. – 297 с.
- Van der Voo R., Spakman W., Bijwaard H. Mesozoic subducted slabs under Siberia // Nature. - 1998. - V. 397. - P. 246-249.
- Volcanism and Subduction: the Kamchatka Region / J. Eichelberger, E. Gordeev, P. Izbekov, M. Kasahara, J. Lees // Geophys. Monogr. Ser. – Washington: AGU, 2007. – V. 172. – 369 p.
- З4. Богданов Н.А., Чехович В.Д. О коллизии Западно-Камчатской и Охотоморской плит // Геотектоника. – 2002. – № 1. – С. 72–85.
- 35. Злобин Т.К. Охотская литосферная плита и модель эволюции системы «окраинное море – островная дуга – глубоководный желоб» // Вестник ДВО РАН. – 2006. – № 1. – С. 26–32.
- 36. Структура и динамика литосферы и астеносферы Охотоморского региона. Результаты исследований по международным геофизическим проектам / ред. А.Г. Родников. – М.: РАН. Национальный геофизический комитет, 1996. – 337 с.
- Сасорова Е.В., Андреева М.Ю. Глубинное распределение гипоцентров землетрясений Курильского региона // Тихоокеанская геология. – 2010. – Т. 29. – № 6. – С. 107–115.
- Соколов С.Д. Концепция тектонической расслоенности литосферы: история создания и основные положения // Геотектоника. – 1990. – № 6. – С. 3–19.
- Лобковский Л.И. Геодинамика спрединга, субдукции и двухъярусная тектоника плит. – М.: Наука, 1988. – 256 с.

Поступила 08.10.2014 г.

#### UDC 550.34 + 551.24 (571.6)

# **3D-TECTONIC ANALYSIS OF SEISMICITY FIELDS IN THE SOUTH REGIONS OF RUSSIAN FAR EAST**

### Aleksandr M. Petrishchevsky,

Dr. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia; Institute of Complex analysis of regional problems, 4, Sholom Aleikhema street, Birobidzhan, 679016, Russia. E-mail: petris2010@mail.ru

# Mariya A. Vasileva,

Institute of Complex analysis of regional problems, 4, Sholom Aleikhema street, Birobidzhan, 679016, Russia. E-mail: mahaonn2008@mail.ru

The relevance of the research is caused by the need to detect tectonic reasons of earthquakes in the Far East Russia and to analyze the relation of seismic intensity with rheological state of tectonic media.

**The aim of the research** is to justify the relation of earthquake hypocenter and magnitude distributions with a deep structure and rheological state of tectonic media in the crust and the upper mantle of Northeast Asia.

**The method used in the study:** 3D modeling of earthquake hypocenters and magnitudes distributions and development of layer-bylayer schemes and sections of average magnitude distributions on this basis.

Results. In distributions of hypocenters and magnitudes of earthquakes the authors have found out vertical resolution. It is related with rheological heterogeneity of tectonic media in the crust and the upper mantle. The areas characterized by increased magnitudes of earthquakes (M=3,5-6) in the upper layer of the crust up to the depth of 10-15 km are spatially correlated with ancient metamorphic complexes. They are outcropped in the Aldano-Stanovy shield of North Asian craton and the northern flank of North Chinese cratons. Within the Amur plate the maxima of magnitudes are dated for blocks of cratonic type: Arguno-Mamynsky, Dyagdagachinsky and Tszyamusy-Bureninsky. By the depth and shape of the upper seismic layer in these blocks it is possible to define the depth, thickness and behavior of the crystal crust layer roof, as well as the degree of a rework of the crust caused by disjunctive and volcanic processes. In particular, the authors determined the immersion of a granite-metamorphic layer of the crust in the North Chinese craton under Tszyamusy-Bureninsky terrane and crystal complexes of the Aldano-Stanovoy shield under Mongolo-Okhotskaya and Sikhote-Alin fold-thrusted systems. In margin seas the maxima of magnitudes coincide with island arcs (Sakhalin, Kuril) in which basement there are high density oceanic ultrabasites. Zones of lowered viscosity are associated with lowered and low magnitudes of earthquakes (M=2,5-3,2) in the lower crust, subcrustal layer of the upper mantle, and an asthenosphere where they are correlated with low electric resistance and lowered seismic velocity. Three geometrical types of such zones: vertical linear, layered in horizontal, and local izometric are found. The first ones coincide with lithosphere stretching structures and magma-permeable zones of deep faults. The second zones coincide with the boundaries of tectonic layers in sections, and the third ones coincide with the centers of tectonic-magmatic structures of the plume nature. In all cases the low seismicity zones are followed by a complex of geologic-geophysical signs indicating fluid, magmatic or tectonic rework of geological structures corresponding to them. The paper characterizes vertical discontinuance and longitudinal heterogeneity of seismic focal zones in the Sea of Okhotsk and Japanese regions. In the region of Okhotsk Sea the Pacific lithosphere subduction under the plate of the Sea of Okhotsk shows itself in the sections of M(x,y,z)-model, however this subduction is traced only up to the depth of 100 km.

#### Key words:

Earthquake magnitudes, rheology, deep structure of the crust and upper mantle, Northeast Asia.

### REFERENCES

- Geodinamika, magmatizm i metalogeniya Vostoka Rossii [Geodynamics, magmatism and metallogeny of the Eastern Russia]. Ed. by A.I. Khanchuk. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2006. 81 p.
- Tectonika, geodynamika i metallogeniya territorii respubliki Sakha (Yakutiya) [Tectonics, geodynamics and metallogeny of the Sakha republic territory]. Ed. by L.M. Parfenov, M.I. Kuzmin. Moscow, MAIK «Nauka» Publ., 2001. 71 p.
- Vasilenko N.F., Prytkov A.S. Modelirovanie vzaimodeystviya litosfernykh plit na o. Sakhalin po dannym JPS-nablyudeniy [Modelling of lithosphere plate interactions in the Sakhalin Island by JPS-observations]. *Russian Journal of Pacific geology*, 2012, vol. 31, no. 1, pp. 42–48.
- Gorkusha S.V., Onukhov F.S., Korchagin F.G. Seysmichnost i neotektonika yuga Dalnego Vostoka [Seismicity and neotectonics of the Southern Far East]. *Russian Journal of Pacific geology*, 1999, vol. 18, no. 5, pp. 61–68.
- 5. Imaev V.S. Vzaimosvyaz raspredeleniy granitoydnykh intruziy i seysmicheskoy aktivnosti zemletryaseniy na Severo-Vostoke Rossii [Relation of granite body distribution with seismic activity of earthquakes in the Russian Far East]. Sovremennaya geodinami-

*ka, aktivnye razlomy i seysmicheskoe rayonirovanie* [Current geodynamics, active faults and seismic division into districts]. Moscow, Academy of Sci. USSR, 1990, pp. 5–7.

- Petrishchevsky A.M. Svyaz seysmichnosti s plotnostnymi neodnorodnostyami litosfery Dalnego Vostoka Rossii [Relation of seismicity with lithospeheric density inhomogeneities in Russian Far East]. Volcanology and seismology, 2007, vol. no. 7, pp. 60–71.
- Bormotov V.A., Merkulova T.V. Kaynozoyskiy etap razvitiya severnoy vetvi Tan-Lu-Okhotskoy riftovoy sistemy: glubinnoe stroenie i seysmogeodinamika [Cenozoic evolution of northern branch of Tanlu-Okhotsk rift system: deep structure and seismic geodynamics]. *Russian Journal of Pacific geology*, 2012, vol. 31, no. 1, pp. 26–41.
- Monitoring seysmogennykh zon Khabarovskogo kraya [Monitoring of seismic zones of Khabarovsk District]. Ed. by F.G. Korchagin. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2002. 240 p.
- Kushnir A.N., Zaitsev G.N. Regionalnye anomalii vysokoi elektroprovodnosti Avstraliyskogo kontinenta i epitsentry zemletryasenii [Regional anomalies of high conductivity of the Australian continent and epicenters of earthquakes]. *Geodinamika*, 2011, no. 2, pp. 152–154.
- Gazel E., Plank K.T., Forthys D.W., Bendesky C., Lee C-T.A., Hauri E. Lithosphere versus astenosphere mantle sources at the

Big Pine Volcanic Fields, California. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2012, vol. 13, no. 1, pp. 1–25.

- Tektonosfera Tikhookeanskoy okrainy Azii [Tectonosphere of the Pacific Margin of Asia]. Ed. by V.V. Gordienko. Vladivostok, DVO RAN Publ., 1992. 238 p.
- 12. Chine earthquake data center. Available at: http://data.earthquake.cn/data/ (accessed 01 May 2014).
- Glagolev V.N., Petrishchevsky A.M. Prostoy algoritm postroeniya razrezov s ispolzovaniem 3D-masivov geologo-geofizicheskoy informatsii (Yugo-Vostok Rossii) [A simple algorithm for generating cross sections using 3D geological and geophysical data sets (Southeastern Russia)]. Russian Journal of Pacific geology, 2010, vol. 4, no. 3, pp. 78–85.
- 14. Utkin V.P. Tanlu-Sikhote-Alinskiy strukturny paragenez [The Tanlu-Sikhote-Alin structure paragenesis]. Tektonika, magmatizm i geodinamika Vostoka Azii: Materialy Vserossiyskoy konferentsii [Tectononics, magmatism and geodynamics of the Eastern Asia. Proc. All-Russian conference]. Khabarovsk, Institute of Tect. and Geophys., 2011. pp. 141–144.
- Glubinnoe stroenie i metallogeniya Vostochnoy Azii [Deep structure and metallogene of the Eastern Asia. Eds. A.N. Didenko, V.B. Kaplun, Yu.F. Malyshev. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2010. 332 p.
- 16. Kaplun V.B. Struktura litosfery Dalnevostochnogo regiona po dannym MTZ [The litosphere structure of the Far East region by MTS-data]. *Tektonika, magmatizm i geodinamika Vostoka Azii. Vserossiyskaya konferentsiya: IV Kosyginskie chteniya* [Tectononics, magmatism and geodynamics of the Eastern Asia. Proc. of All-Russian conference. IV Kosygin readings]. Khabarovsk, Institute of Tect. and Geophys., 2003. pp. 153–163.
- Zhang Yequiao, Ma Yinsheng, Yang Nong, Shi Wei, Dong Shuwen. Cenozoic extensional stress evolution in North China. Journal of Geodynamics, 2003, vol. 36, pp. 591-613.
- Zonenshain L.P., Kuzmin M.I., Natapov L.M. *Tektonika litosfernykh plit territorii SSSR* [Tectonics of lithosperic plates on the USSR territory]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 334 p.
- 19. Gornov P.Yu. Teplovoe pole oblasti sopryazheniya Tsentralno-Asiatskogo i Tikhookeanskogo skladchatykh poyasov i smezhnykh okrayn Sibirskoy i Severo-Kitayskoy platform. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Thermal field of the connect area of Central Asian and Pacific fold belts and adjacent margins of Siberian and North-China platforms. Cand. Diss. Abstract]. Khabarovsk, 2010. 28 p.
- 20. Petrishchevsky A.M. Otrazheniya riftogennykh struktur v gravitatsionnykh modelyakh Severo-Vostoka Azii [Reflections of rift structures in gravity models of the North East Asia]. *Tektonika,* magmatizm i geodinamika Vostoka Azii [Tectononics, magmatism and geodynamics of the Eastern Asia]. Khabarovsk, Institute of Tect. and Geophys., 2011. pp. 298–301.
- Lin G., Wang Ya. The P-wave velocity structure of the crust-mantle transition zone in the continent of China. *Journal of Geophy*sics and Engineering, 2005, no. 2, pp. 268–276.
- Zhi S., Cai Yo., Shi Ya. The contemporary tectonic strain rate field of continental China predicted from GPS measurements and geodynamics implication. *Pure and Applied Geophysics*, 2006, vol. 163, pp. 1477–1493.
- Tektonicheskaya karta oblasti sochleneniya Tsentralno-Aziatskogo i Tikhookeanskogo poyasov masshtaba 1:1500000 [Tectonic map of the connect area of Central Asian and Pacific belts in scale 1:1500000]. Eds. L.P. Karsakov, Chzhao Chuntszin, Yu.F. Malyshev, M.V. Gorshkov. Vladivostok; Khabarovsk, Institute of Tect. and Geophys., 2005.
- 24. Petrishchevskiy A.M. Gravitatsionny metod otsenki reologicheskikh svoystv zemnoy kory i verkhney mantii (v konvergentnykh i plyumovykh strukturakh Severo-Vostochnoy Azii) [Gravity method for evaluating rheological properties of the crust and uppermost mantle (in convergent and plume structures of the North-East Asia)]. Moscow, Nauka Publ., 2013. 192 p.

- 25. Geologicheskaya karta Priamurya i sopredelnykh territoriy. Masshtab 1:2500000. [Geological map of the Amur River Area and adjacent territories. Scale 1:2500000]. Eds. L.I. Krasny, Pen Yun Byao. Leningrad, VSEGEI Press, 1999.
- Vanyan L.L., Pavlenkova N.I. Layer with increased wave-velocity and decreased conductivity in the base of upper part of the Baltic shield crust // Izvestiya RAS. Fizika Zemli, 2002, no. 1, pp. 1–9.
- 27. Timofeev V.Yu., Gornov P.Yu., Ardyukov D.G., Malyshev Yu.F., Boyko E.V. Rezultaty analiza dannykh GPS izmereniy (2003-2006) na Dalnem Vostoke po Sikhote-Alinskoy seti [Results of the analysis of GPS-measurements data (2003-2006 years) at the Sikhote-Albun network]. *Russian Journal of Pacific geology*, 2008, vol. 27, no. 4, pp. 39-49.
- 28. Shevchenko B.F., Saksin B.G., Rasskazov I.Yu. Glubinnoe stroenie i morfostruktury Amurskoy tektonicheskoy plity (kontinentalnaya chast) [Deep structure and morphostructures of the Amurian tectonic plates (continental hart)]. *Tektonika, magmatizm i* geodinamika Vostoka Azii [Tectononics, magmatism and geodynamics of the Eastern Asia]. Khabarovsk, Institute of Tect. end Geophys., 2011. pp. 336–338.
- 29. Petrishchevskiy A.M., Yushmanov Yu.P. Geofizicheskie, magmaticheskie i matallogenicheskie priznaki proyavleniya mantiynogo plyuma v verkhovyakh rek Aldan i Zeya [Geophysical, magmatic and metallogenic manifestations of a mantle plume in the upper reaches of the Aldan and Amur Rivers]. *Russian Geology* and Geophysics, 2014, vol. 55, no. 4, pp. 568–593.
- 30. Kaplun V.B. Geoelektricheskoe stroenie Verkhneamurskogo rayona po dannym magnitotelluricheskikh zondirovaniy [Geoelectric structure of the Upper Reach of Amur River area by MTS-data]. *Russian Journal of Pacific geology*, 2006, vol. 25, no. 1, pp. 33–53.
- Grannik V.M. Geologiya i geodinamika yuzhnoy chasti Okhotomorskogo regoina v mezazoe i kaynozoe [Geology and geodynamics of Southern part of the Sea of Okhotsk Area in the Cenozoic and Mesozoic]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2008. 297 p.
- Van der Voo R., Spakman W., Bijwaard H. Mesozoic subducted slabs under Siberia. Nature, 1998, vol. 397, pp. 246–249.
- Eichelberger J., Gordeev E., Izbekov P., Kasahara M., Lees J. Volcanism and Subduction: the Kamchatka Region. *Geophys. Monogr. Ser.* Washington, AGU, 2007. Vol. 172, p. 369.
- Bogdanov N.A., Chekhovich V.D. O kollizii Zapadno-Kamchatskoy i Okhotomorskoy plit [On collision of the West Kamchatka with the Sea of Okhotsk plates]. *Geotectonics*, 2002, no. 1, pp. 72–85.
- 35. Zlobin T.K. Okhotskaya litosfernaya plita i model evolyutsii sistemy «okrainnoe more ostrovnaya duga glubokovodny zhelob» [The Sea of Okhotsk plate and the evolution model of the «margin sea – island arc – deep-water trough»]. Vestnik DVO PAN – Vestnik of the Far East Branch of the RAS, 2006, no. 1, pp. 26–32.
- 36. Struktura i dinamika litosfery i astenosfery Okhotomorskogo regiona. Resultaty issledovaniy po mezhdunarodnym geofizicheskim proektam [Structure and dynamics of lithosphere and astenosphere of the Sea of Okhotsk area. Results of researches by international geophysical projects]. Ed. A.G. Rodnikov. Moscow, National Geophysical Committee, 1996. 337 p.
- 37. Sasorova E.V., Andreeva M.Yu. Glubinnoe raspredelenie gipotsentrov zemletryaseniy Kurilskogo regiona [Deep distribution of the earthquake hypocenters of the Kuril region]. *Russian Journal* of Pacific geology, 2010, vol. 29, no. 6, pp. 107–115.
- Sokolov S.D. Kontseptsiya tektonicheskoy rassloennosti litosfery: istoriya sozdaniya i osnovnye polozheniya [The concept of tectonic layering of a lithosphere: the history of creation and basic states]. *Geotectonics*, 1990, no. 6, pp. 3–19.
- Lobkovskiy L.I. Geodinamika spredinga, subduktsiya i dvukhyarusnaya tektonika plit [Geodynamics of spreading, subduction and twolayered tectonics of plates]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 256 p.

Received: 08 October 2014.

УДК 666. 792. 22

# ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОРУНДОВОЙ БРОНЕКЕРАМИКИ, МОДИФИЦИРОВАННОЙ СЛОЖНЫМИ ДОБАВКАМИ

# Плетнев Петр Михайлович,

д-р техн. наук, профессор кафедры физики Сибирского государственного университета путей сообщения, Россия, 630049, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191. E-mail: PletnevPM@stu.ru

### Непочатов Юрий Кондратьевич,

руководитель научно-технического отдела ООО «Керамик Инжиниринг», Россия, 630049, г. Новосибирск, Красный проспект, 220. E-mail: nuk3d@mail.ru

# Маликова Екатерина Владимировна,

канд. техн. наук, ведущ. инженер-технолог ООО «Керамик Инжиниринг», Россия, 630049, г. Новосибирск, Красный проспект, 220. E-mail: chaplina@mail.ru

## Богаев Александр Андреевич,

канд. техн. наук, начальник лаборатории ООО «Керамик Инжиниринг», Россия, 630049, г. Новосибирск, Красный проспект, 220. E-mail: bogaev@inbox.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения качества и технологичности получения корундовой бронекерамики.

**Цель работы:** повышение уровня физико-механических свойств и снижение энергетических затрат при получении корундовых бронеэлементов за счет применения малых добавок в составе корундовой керамики с установлением механизма их действия на формирование структуры и обеспечение высокого уровня баллистических показателей; разработка технологических режимов изготовления керамических изделий для серийного производства.

**Методы исследования:** изучение физико-химических процессов синтеза и формирование микроструктуры корундовой бронекерамики, модифицированной малыми добавками, с использованием рентгенофазового анализа, термогравиметрической дифференциально-сканирующей калориметрии, лазерной и ситовой гранулометрии, просвечивающей электронной микроскопии, методов определения физико-механических свойств.

**Результаты.** Рассмотрены физико-химические процессы получения корундовой керамики, модифицированной добавками сложного состава, включающие магний-алюмосиликатную эвтектическую смесь и оксиды магния, иттрия. Модифицирование комплексными добавками оказало положительное влияние на весь комплекс физико-механических характеристик керамики и обеспечило повышенный уровень ее баллистических свойств при одновременном снижении температуры спекания материала на 100 °C. Выявлена функциональная роль каждого компонента комплексной добавки на формирование микроструктуры корундовой керамики, при этом эвтектическая смесь снижает температуру спекания; оксид магния, образуя алюмомагниевую шпинень на зернах корунда, препятствует росту кристаллов, а оксид иттрия с образованием алюминатов иттрия в стыковочных узлах кристаллов способствует упрочнению материала. Приведено модельное представление о механизме действия добавок на формицирование компрование комплексной добавки и образуя алюмомагниевую шпинень на зернах корунда, препятствует росту кристаллов, а оксид иттрия с образованием алюминатов иттрия в стыковочных узлах кристаллов способствует упрочнению материала. Приведено модельное представление о механизме действия добавок на формики, которые внедрены в серийное производство.

#### Ключевые слова:

Корундовая керамика, броневые свойства, эвтектическая смесь, малые добавки, микроструктура.

### Введение

Корундовая керамика в настоящее время является одним из распространенных видов броневой защиты, поскольку обладает хорошим сочетанием целевых свойств (плотностью, твёрдостью, прочностью и трещиностойкостью) [1–7].

С учетом специфических и постоянно возрастающих требований к целевым свойствам бронематериалов необходимо повышение качества корундовой керамики по физико-механическим характеристикам, основанное на формировании мелкокристаллической, равномерно зернистой структуры, и конкурентоспособной масштабной технологии получения

высококачественных бронеэлементов различной конфигурации. При этом, несмотря на то, что к настоящему времени разработано большое количество составов и технологий получения корундовой керамики, с высоким содержанием кристаллической фазой-корунда, основным её недостатком остается высокая температура обжига изделий (1700–1800 °C). Поэтому общая тенденция по созданию энергосберегающих технологий предопределяет одновременно задачу по снижению температуры спекания корундовой керамики, используемой для бронезащиты.

В соответствии с концепцией, предложенной авторами [2, 3, 7–12], для достижения высоких ме-

ханических характеристик керамики необходимо руководствоваться следующими принципами: прочность материала обеспечивается мелкозернистой структурой и надежной связью по границам зерен; требуемая трещиностойкость может быть достигнута за счет дисперсных, вязких или метастабильных хрупких фаз, плотность определяется составом и оптимальными режимами формования и спекания изделий.

Температуру спекания корундовой керамики можно понизить в основном двумя принципиально разными способами [10]. Первый способ включает комплекс мер по повышению химической активности и оптимизации свойств основного компонента шихты – глинозёма. Второй способ связан с введением модифицирующих добавок.

Важно отметить, что большинство зарубежных и отечественных исследователей [1, 8–15] используют при разработке составов корундовой керамики высокочистые субмикронные порошки с высоким содержанием  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Ряд работ [16, 17] посвящен получению корундовой керамики с использованием ультрадисперсного порошка (УДП), причем УДП применяют как в качестве добавки, так и в качестве основного сырья.

В работах [11–15] отмечается, что керамика на основе  $Al_2O_3$ , не содержащая модифицирующих добавок, характеризуется невысоким уровнем свойств, трудно регулируемой структурой, низкой плотностью. Для снижения температуры спекания, улучшения свойств алюмооксидной керамики применяют различные добавки, которые могут быть классифицированы по нескольким признакам: по количеству вводимых добавок (микро- и макродобавки), по числу компонентов добавки (одно- и многокомпонентные), по механизму спекания (жидко- и твердофазное спекание), по воздействию на основное вещество и т. д. [18].

Следует заметить, что по результатам исследований ученых РХТУ им. Д.И. Менделеева [8–13], НИИ ТПУ (г. Томск) [19, 20], СПбХТИ [21] при выборе спекающих добавок необходимо учитывать строение, характер и температуру появления жидкой фазы; размер ионного радиуса модификатора; энергию связи катион-модификатор – кислород в многокомпонентном расплаве; геометрию зёрен порошка, электростатическое состояние поверхности раздела твердой и жидкой фаз; поверхностное натяжение на границе твердая фаза – жидкость и др.

# Методика экспериментов и характеристики исходных компонентов

В качестве основного компонента при получении корундовой бронекерамики был применен глинозём различных марок (α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>>99,0 мас. %): • СТ 800 FG фирмы Almatis Германия;

- CI 600 FG QUPMEI Almans Tepmanus;
- CT 1200 SG фирмы Almatis Германия;
- ГН производства Бокситогорского комбината.

Согласно рентгенофазовому анализу глинозем всех марок состоит не менее чем на 99,0 мас. % из кристаллической α-фазы (PDF № 46–1212). Дифракционные максимумы, соответствующие  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, для всех марок глинозема идентичные друг другу.

В табл. 1 представлены основные характеристики глинозема, использованного в экспериментах, а на рис. 1 – микрофотографии глинозема различных марок.

Таблица 1	. Характеристики глинозема различных марок
Table 1.	Alumina oxide characteristics

Свойства Features		Метод определения Test method	Almatis CT 800 FG	Almatis CT 1200 SG	Mapka ГН, бокситогорский Alumina oxide grade, boksitogorsky
Площадь удельной поверхности, м²/г Specific area, m²/g		Адсорбция азота (БЭТ) Nitrogen adsorption	0,9	3,1	0,3
Размер ча- D50 стиц, мкм		Лазерная дифракция	3,5	1,3	22,0
Particle size, (µ)	D90	Laser diffraction	6,7	3,2	38,4
Содержание $\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , мас. % $\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> content, wt. %		РФА X-ray phase analysis			>99

Глинозем марки CT800FG представлен однородными по размеру сферическими зернами порошка, без заметной агломерации, а глинозем марки CT 1200 SG имеет вид высокодисперсного порошка с высокой степенью агломерации зерен. Глинозём марки ГН Бокситогорского производства является более крупнозернистым по сравнению с предыдущими марками.

Предварительные исследования показали, что плотность и прочностные характеристики корундовой бронекерамики в значительной мере зависят от качества основного компонента шихты – исходного глинозема, и качества гранулята: керамика на основе мелкозернистого глинозема марок Almatis CT 800 FT, 1200 ST имеет повышенные значения плотности и механических свойств по сравнению с керамикой того же шихтового состава с использованием глинозема марки ГН ( $d_{cp}$ =22,0 мкм) Бокситогорского комбината при одинаковых условиях обжига. Поэтому в дальнейшем разработка составов корундовой бронекерамики осуществлялась на основе глинозема марок фирмы Almatis.

Согласно общим представлениям о физико-химической природе используемых модифицирующих добавок при получении корундовой керамики нами с целью снижения температуры спекания бронеэлементов и повышения их эксплуатационных свойств были применены добавки сложного состава, включающие эвтектические смеси и монооксиды [22]. Применительно к корундовой бронекерамике практический интерес имеют эвтектические смеси в системе: MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>.

На производстве ЗАО «НЭВЗ-КЕРАМИКС» при получении корундовой бронекерамики использует-



**Рис. 1.** Микрофотографии глинозема: а) производства фирмы Almatis марки СТ 800 FG; б) производства фирмы Almatis марки СТ 1200 SG; в) марки ГН производства Бокситогорского комбината

*Fig. 1.* Micrographs of alumina oxide: a) Almatis company CT 800 FG grade; b) Almatis company CT 1200 SG grade; c) GN grade of Boksitogorsk complex

ся плавнеобразующая композиция состава СТК, соответствующего т.1 на диаграмме состояния (рис. 2) с температурой образования эвтетики при 1450 °С. С целью снижения температуры спекания керамики на основании анализа тройной диаграммы состояния системы MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> и построения температурных кривых плавкости был выбран состав т.2 (СТК-1) на диаграмме состояния с температурой образования эвтектики  $T_{_{\tiny ЗВТЕКТИКИ}}$ =1350 °С. Преимущества СТК-1 в сравнении с СТК можно оценить по температурным кривым плавкости, представленным на рис. 3.

Температурные кривые нарастания количества расплава в керамике с эвтектической добавкой СТК-1 состава т.2 на диаграмме состояния лежат выше, чем с добавкой СТК состава т.1, что потенциально предопределяет лучшие условия для спекания материала.



**Рис. 2.** Тройная диаграмма состояния системы MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> и плавнеобразующие композиции составов СТК (точка 1) и СТК-1 (точка 2), состав корундовой керамики (точка 3)

**Fig. 2.** Triple state diagram of the system MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> and flux-forming compounds of STK (point 1) and STK-1 (point 2), alumina oxide compositions (point 3)

Исходными компонентами для получения эвтектических добавок служили: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (глинозем Almatis СТ 800 FG), MgO (вводили через основной водный карбонат магния, пересчитывали на содержание оксида магния), SiO<sub>2</sub> – оксид кварца. Каждый компонент предварительно измельчали до тонины  $d \le 1$  мкм.





**Fig. 3.** Design curves of fusion of aluminum oxide-based ceramic with STK and STK-1 of the system MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>. Ceramics with: 1 – STK (7,0 wt. %); 2 – STK-1 (6,0 wt. %); 3 – STK-1 (7,0 wt. %)

После измельчения исходных компонентов и шихты эвтектических смесей СТК, СТК-1 они тщательно гомогенизировались. Компоненты смешивались сухим способом в фарфоровом керамическом барабане алюмооксидными цильбепсами при соотношении М:Ш=1:1 на валках с частотой вращения 70 об/мин в течение 6 часов. Затем шихты выгружались и подвергались термообработке в воздушной атмосфере при температурах ниже температуры образования эвтектики на 100 °С.

Фазовый состав эвтектических добавок (СТК и СТК-1) системы MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> после термообработки был представлен следующими соединениями: непрореагировавшие остатки корунда и кварца, алюмомагнезиальная шпинель и алюмосиликат магния. Преобладающей фазой оказался алюмосиликат магния – кордиерит, но для эвтектической смеси СТК-1 его количество было меньше, чем для состава СТК.

Надо полагать, что в процессе высокотемпературного спекания керамики промежуточные фазы эвтектических добавок – алюмомагнезиальная шпинель и алюмосиликат магния – совместно с исходными компонентами шихты образуют расплав, который способствует уплотнению материала. Фазовый состав эвтектических добавок в значительной мере определяет поведение керамики при обжиге и ее конечные свойства. После термообработки добавки измельчались до среднего размера зерна 1–2 мкм.

### Результаты экспериментов

Экспериментальные составы с эвтектическими добавками представлены в табл. 2.

Основной компонент шихты – глинозем, с каждой эвтектической добавкой измельчался мокрым способом в шаровой мельнице при соотношении М:Ш=1:3 в течение 24 ч ( $d_{50} < 1,5$  мкм). В полученную суспензию вводилась технологическая связка. Пресс-порошок получали с помощью распыли-



**Рис. 4.** Термограммы добавки СТК-1 (а) и гранулята корундовой керамики с этой добавкой (б) **Fig. 4.** Thermograms of STK-1 (a) mixture and alumina ceramic granulate with the same mixture (b)

тельного сушила. Образцы для исследования, представляющие собой призмы с размерами  $45,2\times5,5\times5,5$  мм (в необожжённом состоянии), прессовались на лабораторном одноосном гидравлическом прессе при P=100 МПа. Сырая плотность образцов составляла 2,6 г/см<sup>3</sup>.

Таблица 2. Экспериментальные составы с эвтектическими смесями

 Table 2.
 Test compositions with eutectic mixtures

_	Шихтовый	состав, мас. %/Charging structure, wt. %			
N≗ cocтaвa Composition	Глинозем Alumina oxide	Количество Amount	Эвтектичес- кая смесь Eutectic mixture	Количество Amount	
1	Almatis CT	08 5	т.1 MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> (СТК)	15	
2	800 FG	כ,ספ	т.2 MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> (СТК-1)	C,1	

На рис. 4 представлены термограммы эвтектической смеси СТК-1 и пресс-порошка (гранулята) шихты состава 2, как наиболее предпочтительного состава для промышленного производства.

Согласно данным термического анализа необходимо отметить следующее. Для эвтектической смеси магний-алюмосиликатного состава (СТК-1) до температуры 400 °С наблюдается уменьшение массы без каких-либо тепловых эффектов на кривой ДСК. Проявление экзотермического эффекта (без изменения массы) с началом 1337 °С и завершением 1370 °С, вероятнее всего, связано со структурным фазообразованием в смеси с последующим её плавлением, о чем свидетельствуют эндоэффекты (без потери массы) с началом 1400 °С и завершением 1450 °С.

Термограмма гранулята корундовой керамики с эвтектической добавкой состава СТК-1 показывает, что до температуры 418 °С происходит удаление технологической связки с появлением экзоэффекта, затем в интервале 712–747 °С проявляется эндоэффект (без изменения массы). Надо полагать, что это связано с возможными структурными перестройками продуктов твердофазных реакций эвтектической смести СТК-1, обогащенной глиноземом. Последующая серия эндоэффектов (без изменения массы), начиная с 1170–1212 °С и достигая максимума при 1428–1489 °С обусловлена плавлением эвтектической смеси.

Такое постепенное нарастание количества расплава в керамике связано с обогащением эвтектической смеси новыми порциями глинозема, что сопровождается изменением состава расплава, смещением температуры плавления в область повышенных температур и равномерным уплотнением керамики.

На рис. 5, 6 приведены зависимости относительной плотности и прочности корундовой керамики с эвтектическими добавками от температуры обжига.









**Рис. 6.** Гистограмма изменения прочности на изгиб корундовой керамики с добавками эвтектических смесей



Состав 2 с добавкой СТК-1 имеет пониженную температуру спекания 1650 °С по сравнению с составом 1 (добавка СТК) 1750 °С.

С целью повышения физико-механических характеристик керамики исследовалось влияние модифицирующих добавок оксидов иттрия и магния при введении их совместно с эвтектической добавкой СТК-1.

Известно, что при введении добавки MgO на поверхности зерен корунда образуется микронная прослойка магнезиальной шпинели, что способствует получению мелкозернистой структуры и, как следствие, повышению прочностных свойств материала. Добавка  $Y_2O_3$  также положительно влияет на уменьшение внутрикристаллической пористости, на повышение прочностных характеристик, в том числе трещиностойкости, при сохранении высокого уровня диэлектрических параметров алюмооксидной керамики.

Исследуемые добавки в состав керамики вводились в виде оксида иттрия и карбоната магния (табл. 3).

Таблица 3. Экспериментальные составы со сложными добавками

	Шихтовой состав, мас. %/ Charging structure, wt. %						
N⁰ cocraвa Composition	Глинозем Alumina oxide	Кол-во Amount	Эвтектическая добавка Eutectic mixture	Кол-во Amount	Модификатор Modifier	Кол-во, сверх 100 % Amount over 100 %	
2					-	-	
5	Almatis CT	005	T.2 MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub>	15	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,5	
10	800 FG	(CTK-1)	1,5	MgCO <sub>3</sub>	0,5		
10					Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,25	

Tabla 3	Tost	samplas	with	comp	lov	mivturos
i apie 5.	rest	Salliples	VVILII	COLLIDI	ех.	IIIIXLUIES

Корундовая керамика с добавками эвтектического состава СТК-1 и оксидом иттрия (состав 5) спекается при более низких температурах и имеет более высокую плотность материала по сравнению с составом 2 (рис. 7).



Рис. 7. Зависимость кажущейся плотности образцов от температуры обжига. Керамика с добавкой: 1 – СТК-1 (состав 2); 2 – СТК-1+MgO+Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (состав 10); 3 – СТК-1+Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (состав 5)

**Fig. 7.** Dependence of samples apparent density on burning temperature. Ceramics with: 1 – STK-1 (composition 2); 2 – STK-1+MgO+Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (composition 10); 3 – STK-1+Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (composition 5)

Интенсифицирующее действие добавки  $Y_2O_3$  на процессы уплотнения корундовой керамики проявляется во всем исследуемом интервале температур 1550–1750 °С, при этом эффект действия добавки в высокотемпературной области выражен сильнее, чем при низких температурах (1550–1600 °С). Уплотнение образцов происходит быстрее, что может быть связано с ускорением диффузионных процессов спекания с участием оксида иттрия. Добавка оксида иттрия уменьшает внутрикристаллическую пористость и сокращает количество микротрещин. Введение в состав 5 дополнительно карбоната магния (состав 10) способствует дальнейшему ускорению процессов спекания на начальных стадиях обжига.

Структурные исследования образцов, обожженных при 1650 °C показали, что микрострукту-

ра керамики состава 2 представлена изометрическими и призматическими зернами корунда разной величины. Размер изометрических зерен колеблется от 4 до 20 мкм, а призматической формы – от 6 до 25 мкм. Кроме того, наблюдается значительное количество внутри- и межкристаллических пор. Микроструктура образцов керамики с добавкой  $Y_2O_3$  (состав 5) преимущественно состоит из кристаллов изометрической формы со средним размером зерна не более 9 мкм. Основная часть пор вытеснена на границы зерен. Микроструктура керамики состава 10 характеризуется еще более мелким размером зерен и снижением пористости по сравнению с керамикой состава 5.

Надо полагать, что возможное образование тонкодисперсных пленок алюмомагнезиальной шпинели и алюминатов иттрия, по-видимому, обеспечивает замедление миграции границ зерен корунда и облегчает устранение внутрикристаллических пор.

Для выявления вероятного механизма упрочняющего действия на физико-механические свойства корундовой керамики добавки оксида иттрия был проведен анализ с применением просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) керамики (состав 10), включающей в свой состав наряду с оксидом иттрия добавку СТК-1 и оксид магния.



**Рис. 8.** Микрофотография корундовой керамики с добавкой оксида иттрия (белые образования, вероятно алюмо-иттриевый гранат)

# Fig. 8. Micrograph of corundum ceramic with yttrium oxide (white formations, probably yttrium-aluminum garnet)

Результаты ПЭМ показали следующие особенности структуры керамики. Фрагменты структуры с обогащенным содержанием иттрия преимущественно регистрируются на стыковых участках (узлах) кристаллической матрицы керамики (рис. 8). Такое концентрационное распределение иттрия в кристаллической матрице, видимо, связано с одновременно протекающими физико-химическими процессами образования расплава и алюмомагнезиальной шпинели на зернах корунда.

Надо полагать, что диффузионное сосредоточение иттрия в энергетически активных зонах (стыках) микроструктуры керамики предопределяет



**Рис. 9.** Модельная схема действия компонентов комплексной добавки на формирование микроструктуры корундовой керамики

Fig. 9. Model scheme of complex mixture components action on formation of corundum ceramic microstructure

наибольшие потенциальные возможности образования алюминатов иттрия. Это подтверждается результатами исследований других авторов по взаимодействию оксида иттрия с высокочистым оксидом алюминия при стехиометрическом и нестехиометрическом соотношениях компонентов [23]. Образующиеся соединения иттрия с корундом в наиболее критичных, с точки зрения прочности, элементах структуры выполняют роль скрепляющего материала для сшивки кристаллической матрицы керамики и при действии ударных нагрузок будут релаксировать возникающие механические напряжения в опасных узлах структуры материала и повышать баллистические свойства керамики.

Поскольку в формировании плотной, мелкозернистой микроструктуры и, следовательно, в достижении высоких баллистических характеристик корундовой керамики принимают участие компоненты комплексной добавки (СТК-1, MgO,  $Y_2O_3$ ), то, по нашему представлению, роль каждого компонента в этом процессе модельно можно представить следующей схемой (рис. 9).

Принимая во внимание температурный режим обжига и состав корундовой керамики можно выделить наиболее важные этапы в формировании её микроструктуры:

- исходное состояние структуры сформированной (отпрессованной) заготовки: неупорядоченное расположение зерен глинозема, окруженных пластификатором и компонентами комплексной добавки;
- нагрев до 1350 °С. Вероятные процессы и реакции: удаление пластификатора, появление расплава из магний-алюмосиликатной смеси (СТК-1), разложение карбоната магния по реакции MgCO<sub>3</sub>=MgO+CO<sub>3</sub>, начало образования алюмомагниевой шпинели по реакции: MgO+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> на зернах глинозема;
- нагрев в интервале температур 1350-1500 °С. Вероятные процессы и реакции: интенсивное образование MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> на зернах корунда, нарастание расплава эвтектической смеси с обогащением Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, уплотнение заготовок за счет твердофазных реакций, образование алюминатов иттрия в стыковочных узлах по реакции 2Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=Y<sub>4</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>9</sub>→Y<sub>4</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>9</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=4YAlO<sub>3</sub>;

 нагрев в интервале 1500–1650 °С. Вероятные процессы и реакции: интенсивное твердофазное спекание; образование алюмоиттриевого граната в узлах стыковки кристаллов корунда по реакции ЗYAlO<sub>3</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>; завершение «сшивки» кристаллической матрицы структуры корундовой керамики.

В табл. 4 приведены свойства исследуемых составов корундовой керамики, из которых следует, что введение добавок  $Y_2O_3$  и MgO (составы 5 и 10) оказывает положительное влияние на весь комплекс физико-механических характеристик, значительно повышая его уровень по сравнению с керамикой без добавок. Особенно это проявляется на показателях прочности, модуля упругости и трещиностойкости.

Таблица 4.	Физико	механиче	ские	свойства	а образцов	иссле-
	дуемых	составов	кору	ндовой/	керамики,	обож-
	женной	при темпе	рату	pe 1650 °C	2	

Table 4.Physical and mechanical features of the corundum<br/>ceramic samples burned at 1650 °C

Характеристики	Обозначение керамики/Ceramic				
Features	Состав 2 Composition 2	Состав 5 Composition 5	Состав 10 Composition 10		
Плотность, г/см <sup>3</sup> Density, g/cm <sup>3</sup>	3,78	3,85	3,86		
Водопоглощение, % Water absorption, %	0,02	0,01	0,01		
Микротвердость по Виккерсу, гПа Vickers hardness, hPa	15,3	15,8	16,7		
Трещиностой- кость, МПа•м <sup>0.5</sup> Crack resistance, MPa•m <sup>0.5</sup>	3,20	5,86	5,64		
Предел прочности при изгибе, МПа Bending strength, MPa	243	320	340		
Модуль упругости, МПа Elasticity modulus, MPa	300	350	374		
Скорость прохожде- ния ультразвука, м/с Ultrasound propa- gation velocity, m/s	9200	10260	10570		

### Выводы

- Для снижения температуры спекания корундовых изделий базового состава с использованием добавки СТК с температурой плавления 1450 °С целесообразно использовать эвтектическую смесь СТК-1 с температурой плавления 1350 °С в области кристаллизации метасиликата магния системы MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> с компонентным составом MgO-22,0; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-16,0; SiO<sub>2</sub>-62,0 мас. %.
- Применение низкотемпературной эвтектической смеси (содержание не более 1,5 мас. %) состава СТК-1 в составе корундовой керамики на основе высокочистого с содержанием α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> более 99,0 мас. % глинозема обеспечивает заметное на 100 °С снижение температуры спекания изделий

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- A Review of Ceramics for Armor Applications / P.G. Karandikar, G. Evans, S. Wong, M.K. Aghajanian // 32<sup>th</sup> International Conference on Advanced Ceramics and Composites. – Daytona Beach, January 2008. Rev. 3 Ceramic Engineering and Science Proceedings. – 2008. – V. 29. – № 6. – P. 178–191.
- Баринов С.М., Шевченко В.Я. Прочность технической керамики. – М.: Наука, 1996. – 160 с.
- Введение в техническую керамику / под ред. В.Я. Шевченко. М.: Наука, 1993. – 112 с.
- Неорганическое материаловедение. В 2-х т. / под ред. Г.Г. Гнесина, В.В. Скорохода. – Киев: Наукова думка, 2010. – Т. 2. – Кн. 1. – 854 с.
- Керамика для машиностроения / А.П. Гаршин, В.М. Гропянов, Г.П. Зайцев и др. М.: Научтехлитиздат, 2003. 380 с.
- Разрушение керамики и её сопротивление внедрению высокоскоростных ударников / Б.А. Галанов, О.Н. Григорьев, С.М. Иванов и др. // Огнеупоры и техническая керамика. – 2004. – № 5. – С. 8–15.
- Medvedovski E. Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. P. 1 // Ceramics International. 2010. – V. 36. – P. 2103–2115.
- Лукин Е.С. Современная высокоплотная оксидная керамика с регулируемой микроструктурой. Ч. І. Влияние агрегации порошков оксидов на спекание и микроструктуру керамики // Огнеупоры и техническая керамика. – 1996. – № 1.– С. 5–14.
- Лукин Е.С. Современная высокоплотная оксидная керамика с регулируемой микроструктурой. Ч. І. Влияние агрегации порошков оксидов на спекание и микроструктуру керамики (продолжение) // Огнеупоры и техническая керамика. – 1996. – № 2. – С. 9–18.
- Павлушкин Н.М. Спеченный корунд. М.: Стройиздат, 1961. – 208 с.
- Лукин Е.С. Современная высокоплотная оксидная керамика с регулируемой микроструктурой. Ч. II. Обоснование принципов выбора добавок, влияющих на степень спекания оксидной керамики // Огнеупоры и техническая керамика. –1996. – № 4. – С. 2–13.
- 12. Лукин Е.С. Современная высокоплотная оксидная керамика с регулируемой микроструктурой. Ч. II. Обоснование принципов выбора добавок, влияющих на степень спекания оксидной керамики (продолжение) // Огнеупоры и техническая керамика. –1996. – № 5. – С. 2–9.

по сравнению с базовым составом. Применение малых добавок (0,3–0,5 мас. %) – оксидов магния и иттрия – совместно с эвтектической смесью СТК-1 в составах корундовой керамики на основе высококачественного глинозема фирмы Almatis (Германия) вследствие индивидуального действия каждого компонента добавки на физико-химические процессы спекания способствует формированию равномернозернистой, плотной структуры и приданию материала высокого уровня физико-механических свойств и бронестойкости.

- Разработанные составы и технологические процессы получения корундовой бронекерамики прошли широкую промышленную апробацию и внедрены в серийное производство.
- Новые виды корундовой керамики с добавками эвтектических составов / Е.С. Лукин, Н.А. Макаров и др. // Конструкционные материалы. – 2001. – № 3. – С. 10–15.
- Takehiko Hirata, Katsunori Akiyama, Hirokazu Yamamoto. Sintering behavior of Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics // Ceramics International. 1999. V. 25. P. 723-726.
- Yung-Fu Hsu, Sea-Fue Wang, Ta-Wui Cheng. Effects of additives on the densification and microstructural evolution of fine-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder // Materials Science and Engineering. - 2003. -V. 362. - P. 300-308.
- Sathiyakuman M., Gnanam F.B. Influence of additives on density, microstructure and mechanical properties of alumina // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – V. 133. – P. 282–286.
- Kim S.W., Cockcroft S.L., Khalil K.A., Ogi K. Sintering behavior of ultra-fine Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-(ZrO<sub>2</sub>+X mol % Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ceramics by high-frequency induction heating // Materials Science and Engineering. – 2010. – V. 527. – P. 4926–4931.
- Влияние добавок оксидов иттрия и магния на характеристики корундовой бронекерамики / Е.В. Маликова, Ю.К. Непочатов, П.М. Плетнев и др. // Огнеупоры и техническая керамика. – 2013. – № 4-5. – С. 35-39.
- Функциональная керамика / В.И. Верещагин, П.М. Плетнев, А.П. Суржиков, В.Е. Федоров. – Новосибирск, Наука, 2004. – 348 с.
- Лотов В.А., Добролюбов А.Т. Кинетика спекания корундовой керамики с микродобавками // Стекло и керамика. – 1997. – № 11. – С. 10–12.
- Орданьян С.С., Самохвалова Т.Н., Зайцев Г.П. Корундовая керамика с пониженной температурой спекания // Огнеупоры. 1992. – № 4. – С. 10–12.
- 22. Влияние комплексных добавок на спекание и броневые свойства корундовой керамики / Ю.К. Непочатов, Е.В., Маликова П.М. Плетнев и др. // Огнеупоры и техническая керамика – 2013. – № 10. – С. 14–19.
- Sintering kinetics of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder / Wenming Zeng, Lian Gao, Linhua Gui, Jinkun Guo // Ceramics International. - 1999. -V. 25. - P. 723-726.

Поступила 27.06.2014 г.

UDC 666. 792. 22

# TECHNOLOGY OF PRODUCING CORUNDUM ARMOR CERAMICS MODIFIED WITH COMPLEX ADDITIVES

# Petr M. Pletnev,

Dr. Sc., Siberian Transport University, 191, Dusi Kovalchuk Street, Novosibirsk, 630049, Russia. E-mail: PletnevPM@stu.ru

### Yury K. Nepochatov,

LLC «Ceramic Engineering», 220, Krasny Prospekt, Novosibirsk, 630049, Russia. E-mail: nuk3d@mail.ru

# Ekaterina V. Malikova,

Cand. Sc., LLC «Ceramic Engineering», 220, Krasny Prospekt, Novosibirsk, 630049, Russia. E-mail: chaplina@mail.ru

# Aleksandr A. Bogaev,

Cand. Sc., LLC «Ceramic Engineering», 220, Krasny Prospekt, Novosibirsk, 630049, Russia. E-mail: bogaev@inbox.ru

The relevance of research is caused by the necessity to improve the structure and technologies for producing corundum armor elements. **The main aim** of the research is to increase the level of physico-mechanical features and to reduce the use of small additives in composition of corundum ceramics applying the mechanism of their effect on structure formation and ensuring a high level of ballistic performance; to develop the technological models for chain production of ceramic products.

**Methods:** study of phisico-cheramical processes of synthesis and formation of microstructure of corundum armor elements, modified with small additives using X-ray phase analysis, thermogravimetric differential scanning calorimetry, laser and sieve grading transmission electron microscopy methods for determining phisico-mechanical properties.

**Results.** The authors have studied physical-chemical processes of preparing corundum ceramics modified with the complex additives consisting of magnesium-aluminosilicate eutectic mixture and oxides of magnesium and yttrium. Modification with the complex additives had positive influence on the whole complex of physical and mechanical characteristics of ceramics and provided the increased level of ballistic properties while reducing the sintering temperature of the material at 100 °C. The authors determined the functional role of each component in the complex additive on formation of micro-structure of corundum ceramics. The eutectic mixture reduces sintering temperature; magnesium oxide prevents crystals growth forming aluminum-magnesium spinel on corundum grains; yttrium oxide promotes material hardening at yttrium aluminate formation in docking stations of crystals. The paper introduces the model representation of the additives action on ceramics micro-structure formation. The authors developed the compositions and technologies of preparing corundum armor elements which were introduced into serial production.

#### Key words:

Corundum ceramics, armor properties, eutectic mixture, small additives, micro-structure.

### REFERENCES

- Karandikar P.G., Evans G., Wong S., Aghajanian M.K. A Review of Ceramics for Armor Applications. 32<sup>th</sup> International Conference on Advanced Ceramics and Composites. Daytona Beach, January 2008. Rev. 3 Ceramic Engineering and Science Proceedings, 2008, vol. 29, no. 6, pp. 178–191.
- Barinov S.M., Shevchenko V.Ya. Prochnost tekhnicheskoy keramiki [Technical ceramics strength]. Moscow, Nauka Publ., 1996. 160 p.
- Vvedenie v tekhnicheskuyu keramiku [Introduction into technical ceramics]. Ed. by V.Ya. Shevchenko. Moscow, Nauka Publ., 1993. 112 p.
- Neorganicheskoe materialovedenie [Inorganic material sciences]. Ed. by G.G. Gnesin, V.V. Skorokhod. Kiev, Naukova dumka Publ., 2010. Vol. 2, B. 1, 854 p.
- Garshin A.P., Gropyanov V.M., Zaytsev G.P. Keramika dlya mashinostroeniya [Ceramics for machine building industry]. Moscow, Nauchtekhlitizdat Publ., 2003. 380 p.
- Galanov B.A., Grigorev O.N., Ivanov S.M. Razrushenie keramiki i ee soprotivlenie vnedreniyu vysokoskorostnykh udarnikov [Ceramics destruction and its resistance to introduction of high-speed hammers]. Ogneupory i tekhnicheskaya keramika, 2004, no. 5, pp. 8–15.

- Medvedovski E. Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. P.1. *Ceramics International*, 2010, vol. 36, pp. 2103–2115.
- Lukin E.S. Sovremennaya vysokoplotnaya oksidnaya keramika s reguliruemoy mikrostrukturoy [Modern high-density oxide ceramics with controlled microstructure]. Ch.I. Vliyanie agregatsii poroshkov oksidov na spekanie i mikrostrukturu keramiki [P.I. Oxide powder aggregation on ceramics sintering and microstructure]. Ogneupory i tekhnicheskaya keramika, 1996, no. 1, pp. 5–14.
- Lukin E.S. Sovremennaya vysokoplotnaya oksidnaya keramika s reguliruemoy mikrostrukturoy [Modern high-density oxide ceramics with controlled microstructure]. Ch. I. Vliyanie agregatsii poroshkov oksidov na spekanie i mikrostrukturu keramiki (prodolzhenie) [P. I. Oxide powder aggregation on ceramics sintering and microstructure (continuation)]. Ogneupory i tekhnicheskaya keramika, 1996, no. 2, pp. 9–18.
- Pavlushkin N.M. Spechenny korund [Sintered corundum]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1961. 208 p.
- Lukin E.S. Sovremennaya vysokoplotnaya oksidnaya keramika s reguliruemoy mikrostrukturoy [Modern high-density oxide ceramics with controlled microstructure]. Ch. II. Obosnovanie printsipov vybora dobavok, vliyayushchikh na stepen spekaniya oksid-

noy keramiki [Substantiation of the principles of selecting additives affecting the oxide ceramics sintering degree]. *Ogneupory i* tekhnicheskaya keramika, 1996, no. 4, pp. 2–13.

- Lukin E.S. Sovremennaya vysokoplotnaya oksidnaya keramika s reguliruemoy mikrostrukturoy [Modern high-density oxide ceramics with controlled microstructure]. Ch. II. Obosnovanie printsipov vybora dobavok, vliyayushchikh na stepen spekaniya oksidnoy keramiki (prodolzhenie) [Substantiation of the principles of selecting additives affecting the oxide ceramics sintering degree (continuation)]. Ogneupory i tekhnicheskaya keramika, 1996, no. 5, pp. 2–9.
- Lukin E.S., Makarov N.A. Novye vidy korundovoy keramiki s dobavkami evtekticheskikh sostavov [New types of corundum ceramics with eutectic compositions]. *Konstruktsionnye materialy*, 2001, no. 3, pp. 10–15.
- Takehiko Hirata, Katsunori Akiyama, Hirokazu Yamamoto. Sintering behavior of Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics. *Ceramics International*, 1999, vol. 25, pp. 723–726.
- Yung-Fu Hsu, Sea-Fue Wang, Ta-Wui Cheng. Effects of additives on the densification and microstructural evolution of fine-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder. *Materials Science and Engineering*, 2003, vol. 362, pp. 300-308.
- Sathiyakuman M., Gnanam F.B. Influence of additives on density, microstructure and mechanical properties of alumina. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, vol. 133, pp. 282–286.
- 17. Kim S.W., Cockcroft S.L., Khalil K.A., Ogi K. Sintering behavior of ultra-fine Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-(ZrO<sub>2</sub>+X mol % Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ceramics by high-frequ-

ency induction heating. *Materials Science and Engineering*, 2010, vol. 527, pp. 4926-4931.

- Malikova E.V., Nepochatov Yu.K., Pletnev P.M. Vliyanie dobavok oksidov ittriya i magniya na kharakteristiki korundovoy bronekeramiki [Influence of yttrium and magnesium oxides additives on corundum ceramics characteristics]. Ogneupory i tekhnicheskaya keramika, 2013, no. 4–5, pp. 35–39.
- Vereshchagin V.I., Pletnev P.M., Surzhikov A.P., Fedorov V.E. Funktsionalnaya keramika [Functional ceramics]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2004. 348 p.
- Lotov V.A., Dobrolyubov A.T. Kinetika spekaniya korundovoy keramiki s mikrodobavkami [Kinetics of sintering corundum ceramics with microadditives]. *Steklo i keramika*, 1997, no. 11, pp. 10–12.
- Ordanyan S.S., Samokhvalova T.N., Zaytsev G.P. Korundovaya keramika s ponizhennoy temperaturoy spekaniya [Corundum ceramics with low sintering temperature]. *Ogneupory*, 1992, no. 4, pp. 10–12.
- 22. Nepochatov Yu.K. Malikova E.V., Pletnev P.M. Vliyanie kompleksnyh dobavok na spekanie i bronevye svoystva korundovoy keramiki [Complex additives influence on sintering and armor features of corundum ceramics]. Ogneupory i tekhnicheskaya keramika, 2013, no. 10, pp. 14–19.
- Wenming Zeng, Lian Gao, Linhua Gui, Jinkun Guo. Sintering kinetics of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder. *Ceramics International*, 1999, vol. 25, pp. 723-726.

Received: 27 June 2014.

УДК 620.9:662.92; 658.264

# ДВУХЗОННЫЙ ГАЗОГЕНЕРАТОР НА ВОЗДУШНОМ ДУТЬЕ С ПСЕВДООЖИЖЕННЫМ СЛОЕМ

# Дубинин Алексей Михайлович,

д-р техн. наук, профессор кафедры теплоэнергетики и теплотехники Уральского энергетического института ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина», Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: v.g.tuponogov@urfu.ru

# Тупоногов Владимир Геннадьевич,

д-р техн. наук, профессор кафедры теплоэнергетики и теплотехники Уральского энергетического института ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина», Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: v.g.tuponogov@urfu.ru

# Рыжков Александр Филиппович,

д-р техн. наук, профессор кафедры тепловых электрических станций Уральского энергетического института ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина», Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: af.ryzhkov@mail.ru

### Каграманов Юрий Александрович,

аспирант кафедры теплоэнергетики и теплотехники Уральского энергетического института ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина», Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; инженер ОАО УралГИПРОМЕЗ, Россия, 620075, г. Екатеринбург, пр. Ленина, 60А. E-mail: KagramanovYA@yandex.ru

## Лабинцев Егор Сергеевич,

студент кафедры теплоэнергетики и теплотехники Уральского энергетического института ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина», Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: egor.labintsev@mail.ru

Показана актуальность развития технологий получения искусственного газа из твердых топлив для использования в энергетических установках, включая когенерационные. К наиболее перспективным относятся низкотемпературные технологии химико-термической переработки углей в псевдоожиженном слое. Проведена разработка конструкции, а также исследование работы двухзонного реактора пузырькового псевдоожиженного слоя малой мощности для нужд локальной энергетики, например, в составе минитеплоэлектроцентрали (мини-TЭЦ) с газо-поршневым приводом либо в гибридных паро-газовых установках (ПГУ). В реакторе осуществляется воздушная газификация угля с разделением зон подачи топлива и отвода получаемого бессмольного синтез-газа, часть которого сжигается в реакторе для поддержания автотермичности процесса. Предложена химико-кинетическая модель процесса газификации для расчета состава получаемого синтез-газа по высоте реакционной зоны и на выходе из реактора. Модель позволила произвести расчеты и выполнить оптимизацию процесса газификации по температуре в зоне газификации, соответствующей максимальному количеству выхода горючего компонента синтез-газа – оксида углерода. Приведены результаты экспериментальной проверки теоретических расчетов в газификаторе с псевдоожиженным слоем. Результато работы стал расчёт оптимальной температуры процесса газификации – 820 °С и доли отводимого синтез-газа – 0,92 для бородинских углей. Такой состав и теплота сгорания получаемого в реакторе синтез-газа позволяют использовать его в качестве низкокалорийного топлива в камерах сгорания газо-поршневых мини-ТЭЦ и гибридных ПГУ с двухступенчатым подогревом циклового воздуха, что требует дальнейшего изучения и развития технологии.

#### Ключевые слова:

Уголь, выход летучего вещества, воздух, тепло, продукты газификации, КПД, константа скорости, равновесие.

### Введение

Многие современные технологии использования твердых топлив базируются на их термохимической переработке в искусственный газ, который затем может сжигаться в технологических и энергетических установках, включая когенерационные, или преобразуется в жидкое топливо [1]. Одним из направлений развития таких технологий является снижение температуры в активной зоне термохимического реактора, поскольку при этом уменьшается образование оксидов азота и серы, шлакование поверхностей реактора [2], расширяются возможности использования низкосортных топлив [3], и снижается капиталоемкость оборудования. Используются и продолжают исследоваться три основные низкотемпературные технологии: 1) низкотемпературная вихревая технология (НТВ), которая применяется для сжигания угольной пыли в энергетических котлах, как правило мощностью в сотни МВт, и позволяет снизить температуру в топке котла до 1100-1250 °С [4]; 2) низкотемпературная карбонизация углесодержащих топлив в потоке, успешно опробованная при подготовке угольной пыли перед вводом в топку парового котла мощностью 420 т/ч [5] и находящая применение в разрабатываемых схемах гибридных ПГУ [6]; 3) слоевые технологии газификации твердых топлив [7], включающие газификацию в плотном слое (по методу Lurgi) [8], газификаторы с пузырьковым кипящим слоем (по методу Winkler [9] и установки с форсированными режимами псевдоожижения (ЦКС - циркуляционный кипящий слой), имеющие большую производительность и используемые в основном в энергоблоках угольных ТЭС (тепло-электро станций) [10].

Технологии псевдоожижения относятся к наиболее перспективным и непрерывно совершенствуются. Компанией Foster Wheeler разработаны схемы ПГУ, использующие карбонизатор твердого топлива под давлением с пузырьковым псевдоожиженным слоем – topping cycle [11] и с ЦКС под давлением – схема HIPPS (high integrity pressure protection system) [10]. В обоих случаях продуктами карбонизации (частичной газификации) при температурах 850-930 °С являются газ для газотурбинной установки (ГТУ) и полукокс для парового котла ЦКС. Низкий уровень температур позволяет обессмоливать получаемый газ и после циклонной пылеочистки подавать в камеру сгорания ГТУ. Японскими энергетическими центрами разработан цикл ПГУ с внутрицикловой паровой газификацией угля повышенной эффективности (advanced cycle A-IGCC (advanced integrated gasification combined cycle)) [12] с КПД нетто 53–57 %. В цикле пар после паровой турбины нагревается до 700 °С газами, выходящими из газовой турбины, и подается в газификатор с псевдоожиженным слоем, работающий в интервале температур 700-1000 °С. В США исследуется цикл ПГУ с «мягкой» частичной газификацией угля (mild gasification cycle - IMGCC) в реакторе с пузырьковым псевдоожиженным слоем [13]. Основным элементом цикла является разработанная система высокотемпературной газоочистки (при температурах больше 500 °C), позволяющая избегать потерь энергии синтез-газа при термическом разложении тяжелых летучих на легкие компоненты (CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>).

В данной работе предложена конструкция и исследуется работа реактора пузырькового псевдоожиженного слоя малой мощности для нужд локальной энергетики, например в составе миниТЭЦ с газо-поршневым приводом либо в гибридных ПГУ. В нашем случае требуется получение чистого газа, поскольку присутствие углеводородов способствует образованию высокотоксичных оксидов азота в процессе сжигания газа [14], а для удаления смоляных включений требуется создание дорогостоящих очистных блоков [15]. В целях снижения капиталоемкости оборудования и упрощения условий эксплуатации использован метод автотермичной воздушной газификации с комбинированной схемой движения дисперсных и газовых потоков.

### Схема газогенератора

Принципиальная схема двухзонного газогенератора показана на рис. 1. В газогенераторе выделяется камера сгорания при помощи центральной трубы – 2. В камеру сгорания подводится дробленый и отгрохоченный уголь.

Через газораспределительную решетку вводится воздух. Для поддержания оптимальной температуры в псевдоожиженном слое в кольцевой зазор между обмуровкой газогенератора и центральной трубой вводится дополнительный воздух, необходимый для сгорания летучих, выходящих из угля, и части продуктов газификации, входящих в кольцевой зазор. Дополнительная теплота, образующаяся в камере сгорания, переносится в реакционный объем посредством циркуляции дисперсных частиц кокса, золы и шлака. Продукты сгорания летучих и части продуктов газификации отводятся отдельно от полезного продукта, что дает возможность избавиться от смолы, уксусной кислоты, скипидаров, фенолов и упростить конструктивные решения газоочистных устройств.

В реакционный объем поступает практически чистый углерод кокса [16]. Поэтому горючий газ образуется в соответствии с обобщающей реакцией

$$C+0,5(O_2+3,76N_2)CO+1,88N_2,$$

которая из-за существенной разности скоростей реакции горения углерода с кислородом воздуха с образованием CO<sub>2</sub> и реакции восстановления CO<sub>2</sub> углеродом топлива до CO, разделяется в пространстве и во времени на две: очень быстро протекающую экзотермическую реакцию (1) горения углерода с кислородом воздуха

С+0,5(O<sub>2</sub>+3,76N<sub>2</sub>) 0,5(CO<sub>2</sub>+C)+1,88N<sub>2</sub>, (1) с теплотой  $q_{x_1}$ =16419 кДж на 1 кг исходного углерода и медленную эндотермическую реакцию (2) восстановления CO<sub>2</sub> до CO углеродом топлива

$$0,5(CO_2+C)+1,88N_2CO+1,88N_2$$
, (2)

с теплотой  $q_{x_2}$ =7136 кДж на 1 кг исходного углерода. и – константы скорости реакции м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>с). В камере сгорания окисляется часть продуктов газификации по реакции

 $CO+1,88N_2+0,5(O_2+3,76N_2)CO_2+3,76N_2$ 

с экзотермическим тепловым эффектом  $q_{x_3}$ =23596 кДж на 1 кг исходного углерода. Летучие при сгорании с воздухом дают теплоту сгорания  $q_{\pi}$ =12863 кДж на 1 кг исходного углерода.



- Рис. 1. Принципиальная схема двухзонного газогенератора для воздушной газификации углей. І – подвод воздуха; ІІ – ввод угля; ІІІ – отвод продуктов газификации; ІV – отвод продуктов сгорания; V – отвод золы; VI – ввод инерта. 1 – псевдоожиженный слой; 2 – труба для отвода полезного продукта; 3 – зонтик для перемешивания продуктов газификации с воздухом; 4 – регулятор равенства давлений в камерах; 5 – водоохлаждаемые циклоны; 6 – регулирующий клапан
- **Fig. 1.** Flow-sheet of two-zone gas generator for coal air gasification. I air supply; II coal input; III gasification product output; IV combustion product output; V ash output; VI inert gas input. 1 fluidized bed; 2 tube for useful product output; 3 umbrella for mixing gasification products with air; 4 controller of pressure balance in chambers; 5 water-cooling cyclones; 6 control valve

Над кипящим слоем в камеру сгорания вводится дополнительный расход воздуха для дожигания СО, выходящего из кипящего слоя углерода в небольших количествах.

Состав продуктов газификации и их теплота сгорания определяются месторождением угля [17], высотой и температурой псевдоожиженного слоя. Так, при температуре 650 °С в равновесных продуктах воздушной газификации углерода содержится 17 % СО, а теплота сгорания такой смеси составит 2149 кДж/м<sup>3</sup>; при температуре 1000 °С продукты газификации содержат 34,5 % СО, а их теплота сгорания в два раза выше – 4298 кДж/м<sup>3</sup>.

### Моделирование процесса газификации

Для определения оптимальной доли *х* продуктов газификации углерода топлива, отводимых для полезного использования, составляется система уравнений, включающих в себя:

1) уравнение теплового баланса газогенератора

$$[(1-x)q_{x_3} + q_{_{\Pi}}]\eta + q_{_{Y}} + q_{_{BY}} + q_{_{B_1}} + q_{_{B_2}}(1-x) + q_{_{B_3}} =$$

$$= q_{x_2} \left( 1 - \frac{r_{\text{CO}_2}}{0,21} \right) + \left[ C_{\text{n.r.}} x + C_{\text{n.c.}} (1-x) + C_{\text{n.n.}} \right] t + q_{\text{H}}; \quad (3)$$

 уравнения материального баланса [18]: для кислорода на выходе из пузырей

$$r_{O_2}^h = 0,21 \exp\left(-\frac{sk_1^*h}{w_b}\right),$$
 (4)

для диоксида углерода на выходе из пузырей

$$r_{\rm CO_2}^h = \frac{0.21k_1^*}{k_1^* - k_2^*} \left[ \exp\left(\frac{sk_2^*h}{w_b}\right) - \exp\left(\frac{sk_1^*h}{w_b}\right) \right],$$
(5)

для оксида углерода на выходе из пузырей

$$r_{\rm CO}^{h} = \frac{0,21 - r_{\rm O_2} - (1 - \beta^*) r_{\rm CO_2}}{\beta^* + 0,21 + 0,5 \cdot 0,79};$$
 (6)

Концентрацию азота находим из балансового уравнения

$$N_{2}^{h} = 1 - (r_{O_{2}}^{h} + r_{CO_{2}}^{h} + r_{CO}^{h}),$$
(7)

*h* – высота псевдоожиженного слоя, м.

В уравнениях (3)-(7):  $q_y$ ,  $q_{\text{вy}}$ ,  $q_{\text{в}_1}$ ,  $q_{\text{в}_2}$ ,  $q_{\text{в}_3}$  теплота, вносимая с сухим углем, с влагой угля, первичным воздухом, подаваемым под газораспределительную решетку, идущим на горение части продуктов газификации и, наконец, на сгорание летучих (их значения для экспериментального газогенератора соответственно равны 27; 66; 116; 227 и 375 кДж на 1 кг исходного углерода);  $q_{\rm H}$  – теплота, затраченная на нагрев до температуры кипения, испарение и нагрев пара, образовавшегося из влаги угля, равная 1230 кДж на 1 кг исходного углерода; Сп., Сп.с., Сп.д. – удельные теплоемкости продуктов газификации, продуктов сгорания и продуктов сгорания летучих (равные соответственно 9,68; 19,2; и 25 кДж/К на 1 кг исходного углерода; t – температура псевдоожиженного слоя,  $\eta$  – КПД камеры сгорания;  $\eta = 1 - (q_3 + q_4 + q_5 + q_6)$ , где  $q_3$ ;  $q_4$ ;  $q_5$ ;  $q_6$  – потери теплоты с химическим и механическим недожогами, потери теплоты в окружающую среду через обмуровку и с золой,  $\eta$ =0,8;  $\overline{r}_{_{\rm CO_2}}$  – концентрация СО<sub>2</sub> на выходе из псевдоожиженного слоя; 0,21 – начальная концентрация СО<sub>2</sub>; сомножитель

 $\left(1 - \frac{\overline{r_{\text{CO}_2}}}{0,21}\right)$  учитывает неполноту расходования те-

плоты на эндотермическую реакцию (2). 1-x - до-ля продуктов газификации, отводимых на сжигание для увеличения температуры в псевдоожиженном слое (при x=1 температура в слое равна 760 °C); удельная площадь поверхности угольных частиц в псевдоожиженном слое определяется по следующему выражению [19]

а

$$s = \frac{6\rho(1 - \varepsilon_{mf})z^*}{d_k\rho_k}$$

где  $\rho = \rho_n (1-z^*) + \rho_k z^* -$  средняя плотность псевдоожиженного слоя;  $\rho_n$  и  $\rho_k -$  плотности инертного материала (золы и шлака) и кокса, равные соответственно 3760 и 1650 кг/м<sup>3</sup>;  $z^*$  – концентрация кокса в слое, кг на 1 кг смеси;  $\varepsilon_{mf}$  – порозность псевдоожиженного слоя при минимальной скорости псевдоожижения [20];  $d_k$  – размер частиц кокса, м. Скорость продуктов газификации увеличивается в 1,21 раза с уменьшением концентрации CO<sub>2</sub> от 0,21 до 0 и описывается зависимостью

$$w = \frac{w^*}{1 + r_{\rm CO_*}}$$

а средняя скорость продуктов газификации

$$\overline{w} = \frac{w^* \int_{0.21}^{0} \frac{dr_{\text{CO}_2}}{1 + r_{\text{CO}_2}}}{0,21} = 0,9w^*,$$

где  $w^*$  — скорость на выходе из газогенератора в расчете на пустое сечение при нормальных условиях. Скорость при рабочих параметрах *t* и *p* 

$$w_p = 0.9w^* \frac{(273+t)p_0}{273p}$$

где  $p_0$ , p – атмосферное давление и давление в газогенераторе, МПа. Скорость подъема пузырей

$$w_b = \frac{(w_p - w_{mf})(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_p - \varepsilon_{mf}}$$

где  $\varepsilon_p$  и  $\varepsilon_{mf}$  – порозности псевдоожиженного слоя при рабочей скорости и минимальной скорости псевдоожижения, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> [5].  $k_1^*$ ,  $k_2^*$  – эффективные константы скорости взаимодействия O<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub> с углеродом топлива, рассчитываются по методике [19] на основании известных констант скоростей, м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>с) для плотного слоя при реагировании:

кислорода с углеродом бородинского угля [21]

$$k_1 = 3 \cdot 10^3 \exp\left[-\frac{11065}{t+273}\right];$$

и СО<sub>2</sub> с углеродом того же угля

$$k_2 = 35 \cdot 10^3 \exp\left[-\frac{17621}{t+273}\right].$$

Эффективная константа скорости расходования  $O_2$  при взаимодействии с углеродом твердого топлива в псевдоожиженном слое:

$$k_1^* = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{d_\kappa}{\operatorname{Sh} \cdot D} + \frac{s}{\beta}}$$

где D – эффективный коэффициент молекулярной диффузии реагирующего газа, м<sup>2</sup>/с [22]. Эффективная константа скорости расходования CO<sub>2</sub> при

взаимодействии с углеродом твердого топлива в псевдоожиженном слое

$$k_2^* = \frac{1}{\frac{1}{k_2} + \frac{d_\kappa}{\operatorname{Sh} \cdot D} + \frac{s}{\beta}},$$

где *β* – интегральный коэффициент массоотдачи:

$$\beta = \int_{0}^{h} \frac{6K(w_{p} - w_{mf})}{d_{b}(w_{p} - 0.9w_{mf} + 0.71\sqrt{gd_{\pi}})} dh$$

$$d_{\rm n} = 0,53(w_p - w_{mf})^{0.4} h^{0.7}$$

$$d_{\rm n} = 0,53(w_p - w_{mf})^{0,4} h^{0,7}$$

Критерий Шервуда, определяющий массоперенос реагента из плотной фазы через пограничный слой в облако пузыря,

Sh = 0,24Ar<sup>0,333</sup> 
$$\left(\frac{d_{\kappa}}{d_{u}}\right)^{0,5}$$
,

Ar – критерий Архимеда рассчитывается по методике [20]; *d*<sub>к</sub> и *d*<sub>u</sub> – диаметры частиц кокса и инертного материала (золы и шлака), м.

Усреднение концентрации  $O_2$  и  $CO_2$  на выходе из псевдоожиженного слоя производилось на основании двухфазной модели псевдоожиженного слоя. На выходе из плотной фазы продукты имеют равновесный состав (табл. 1), а на выходе из пузырей рассчитываются по уравнениям (4), (5).

$$\frac{\bar{r}_{o_2}}{\bar{r}_{co_2}} = \frac{w_{mf} \cdot r_{O_2}^{\nu} + (w_p - w_{mf}) r_{O_2}^{\mu}}{w_p};$$

$$\frac{\bar{r}_{co_2}}{\bar{r}_{co_2}} = \frac{w_{mf} \cdot r_{CO_2}^{\rho} + (w_p - w_{mf}) r_{CO_2}^{h}}{w_p}.$$

n (

В уравнение (6) подставляются средние концентрации  $\bar{r}_{0_2}$  и  $\bar{r}_{C0_2}$ , и получают среднюю  $\bar{r}_{C0}$  на выходе из газогенератора. Здесь  $r^p_{0_2}$  и  $r^p_{C0_2}$  – равновесные концентрации  $O_2$  и  $CO_2$  на выходе из плотной фазы (табл. 1).

- Таблица 1. Равновесный состав воздушной газификации углерода в зависимости от температуры (давление 0,1 МПа, коэффициент расхода воздуха 0,5) [23]
- Table 1.
   Equilibrium composition of carbon gasification depending on temperature (pressure 0,1 MPa, air flow coefficient 0,5) [23]

t, ℃	Состав, % об./Composition, % vol.					
	CO	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>			
650	17	11	72			
750	27	5	68			
800	32	2	66			
850	33	1,55	65,45			
900	33,5	1,1	65,4			
950	34	0,65	65,35			
1000	3,5	0,2	65,3			

### Моделирование оптимальных параметров

При моделировании процесса оптимизации параметров газификации задавался ряд температур в диапазоне 760–1000 °С с интервалом 50 °С, для каждой температуры из уравнений (4)–(7) рассчитывался полный состав продуктов газификации на выходе, а из уравнения теплового баланса определялась доля полезно отводимого продукта *x*.

$$x = \frac{\begin{bmatrix} \bar{q}_{x_2} \left( 1 - \frac{\bar{r}_{CO_2}}{0, 21} \right) + (C_{\Pi C} + C_{\Pi \Pi})t + q_{\rm H} - q_{\rm y} - \\ -q_{\rm By} - q_{\rm B_1} - q_{\rm B_2} - q_{\rm B_3} - (q_{\rm x_3} + q_{\rm \pi})\eta \end{bmatrix}}{(C_{\Pi C} - C_{\Pi \Gamma})t - q_{\rm x_3}\eta - q_{\rm B_2}}.$$

При уменьшении доли x (увеличении 1-x) температура в псевдоожиженном слое увеличивается, что приводит к повышению концентрации СО в продуктах газификации и их теплоты сгорания. Произведение  $xr_{\rm CO}$  возрастает, достигает максимального значения, затем убывает.

Максимальному значению произведения  $xr_{co}$  соответствует оптимальная температура процесса газификации. При этом углерод не тратится на перегрев продуктов газификации. Остается больше углерода на газификацию диоксидом углерода для получения СО.

В результате расчетов было установлено, что максимальная концентрация СО при минимальном расходе топлива на нагрев продуктов газификации  $(1-x)q_{x_3}\eta$  соответствует значению x=0,92, при этом оптимальная температура в слое равна 820 °C, а продукты газификации имеют теплоту сгорания 3680 кДж/м<sup>3</sup>.

### Эксперимент

Для проверки модели были проведены опыты на экспериментальном газогенераторе с внутренним диаметром 0,2 м. Инертным заполнителем служили частицы электрокорунда размером 0,5 мм, топливом – частицы бородинского угля средним размером 0,32 мм. Характеристика топлива (марка 2Б, класса Р), (% по массе): W<sup>r</sup>=33;  $A^{r}=7,4; C^{r}=46,6; H^{r}=3; N^{r}=0,6; O^{r}=13,2; V^{daf}=47;$ Q<sup>r</sup><sub>i</sub>=15280 кДж/кг. Концентрация кокса в слое *z*\*=0,1 кг на 1 кг смеси,  $d_k = 0,32 \cdot 10^{-3}$  м, *ε*<sub>mf</sub>=0,218 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, удельная площадь поверхности угольных частиц в слое *S*≈700 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>. Высота слоя h=1 м. Расход угля 25,4 кг/ч, общий расход воздуха 105 м<sup>3</sup>/ч, в том числе под газораспределительную решетку 50 м<sup>3</sup>/ч, на сжигание части продуктов газификации и летучих 13-55 м<sup>3</sup>/ч, температура в слое 820 °С. Потеря углерода с уходящей золой 2 %.

Сравнение расчетов с экспериментом представлено в табл. 2.

Доли продуктов газификации *x* и 1–*x* изменяли варьированием диаметра внутренней трубы для отвода полезного продукта.

Скорость на пустое сечение газогенератора при нормальных условиях *w*<sup>\*</sup>=0,56 м/с. Состав получа-

емых продуктов газификации определяли на хроматографе. Результаты экспериментов представлены на рис. 2.

 Таблица 2.
 Сравнение расчета по модели с экспериментом

 Table 2.
 Comparison of model calculation with the experiment

Данные/Data	Концентрация компонентов в продуктах воздушной газификации, % об. Component concentration in air gasification products, % vol.					
	r <sub>co2</sub>	r <sub>02</sub>	r <sub>N2</sub>	r <sub>co</sub>	$R_{CH_4}$	$R_{\rm H_2}$
Экспериментальные Experimental	7,7	3,1	61,7	19,5	1,2	6,8
Расчетные по модели Calculated by the model	11,3	3,0	64,9	20,8	0	0



**Рис. 2.** Зависимость температуры, состава продуктов воздушной газификации ирша-бородинского угля, теплоты сгорания газа и мощность газогенератора от х

**Fig. 2.** Dependence of temperature, composition of air gasification products in irsha-borodinsky coal, gas heat value and gasifier capacity on x

При уменьшении доли x c 1 до 0,65 удалось повысить температуру с 760 до 1000 °С, концентрацию СО с 14 до 26 %, теплоту сгорания  $Q_{\rm H}^{\rm c}$  с 2400 до 4100 кДж/м<sup>3</sup>, которую рассчитывали по уравнению Д.И. Менделеева по составу продуктов газификации. На рис. 2 приведены результаты оптимизации мощности газогенератора  $N=BxQ_{\rm H}^{\rm c}$ , где B – объемная производительность газогенератора на все сечение, м<sup>3</sup>/с, при нормальных условиях. Максимальное значение N приходится на x=0,92, N=47 кВт.

Выход сухих продуктов газификации на 1 кг рабочего угля  $\approx 2,0$  м<sup>3</sup>. Химический КПД газогенератора, %,

$$\eta_x = \frac{2.0 \cdot Q_{\text{\tiny H}}^{\text{c}} \cdot x \cdot 100}{Q_i^{\text{r}}} = \frac{2.0 \cdot 3680 \cdot 0.92 \cdot 100}{15280} = 44.$$

#### Заключение

- Конструкция двухзонного газогенератора обеспечивает получение бессмольных низкокалорийных продуктов газификации твердого топлива, пригодных для сжигания в когенерационных установках малой мощности.
- Предложенная кинетическая модель процесса газификации позволяет рассчитывать состав продуктов газификации и проводить оптимизацию процесса по температуре слоя. Для бородинских углей оптимальная температура 830 °С

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Корчевой Ю.П., Майстренко А.Ю., Топал А.И. Экологически чистые угольные энерготехнологии. – Киев: Научная мысль, 2004. – 187 с.
- Кубин М. Сжигание твердого топлива в кипящем слое / пер. с чешск. – М.: Энергоиздат, 1987. – 112 с.
- Табакаев Р.Б., Казаков А.В., Заворин А.С. Перспективность низкосортных топлив Томской области для теплотехнического использования // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 4. – С. 41–46.
- Рундыгин Ю.А., Григорьев К.А., Скудицкий В.Е. Низкотемпературная вихревая технология сжигания твердых топлив: опыт внедрения, перспективы использования // Новые технологии сжигания твердого топлива: их текущее состояние и использование в будущем: Матер. Всеросс. науч.-техн. семинара. – М., 2001. – М.: ВТИ, 2001. – С. 286–295.
- Шульман В.Л., Зайцев А.В., Богатова Т.Ф. Развитие угольных парогазовых технологий // Технологии эффективного и экологически чистого использования угля: Сб. докл. конф. – М.: ВТИ, 2009. – С. 246–251.
- О предпроектной проработке гибридной угольной ПГУ с воздухонагревателем / С.И. Гордеев, Н.В. Вальцев, Т.Ф. Богатова, Е.И. Левин, В.Л. Шульман, А.Ф. Рыжков, Н.А. Абаимов // Электрические станции. – 2012. – № 10. – С. 17–21.
- Инновационные технологии в энергетике // под общ. ред. Н.В. Крючковой. – Иваново: Научная мысль, 2011. – 228 с.
- Шиллинг Г-Д., Бонн Б., Краус У. Газификация угля. М.: Недра, 1986. – 175 с.
- 9. Yates J.G. Fundamentals of fluidized chemical processes. London: Butterworts, 1983. - 222 p.
- Rao A.D. Combined cycle systems for nearzero emission power // Woodhead Publishing Series in Energy. – 2012. – № 32. – 357 p.
- Increased efficiency of Topping cycle PCFB power plants / A. Robertson, W. Domeracki, D. Horazak, R. Newby, A. Rehmat // American Power Conference. - Chicago, Illinois, 1996. -P. 17-25.
- 12. System modeling of energy recuperated IGCC system with preand post-combustion  $CO_2$  capture / M. Kawabata, O. Kurata,

(при этом доля отводимых продуктов газификации x=0,92), теплота сгорания продуктов газификации составляет 3860 КДж/м<sup>3</sup>.

 Согласно литературным источникам получаемый низкокалорийный газ может сжигаться в камерах сгорания газопоршневых мини-ТЭЦ и в гибридных ПГУ с двухступенчатым подогревом циклового воздуха.

Исследование выполнено в Уральском федеральном университете за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14–19–00524).

N. Iki, A. Tsutsumi // Applied Thermal Engineering. – 2013. – N<br/>b54. – P. 310–318.

- Khan J., Wang T. Implementation of demoisturization and devolatilization model in multi-phase simulation of hybrid entrained and fluidized bed mild gasifier // International Journal of Clean Coal and Energy. - 2013. - № 2. - P. 35-53.
- Hasegawa T. Gas Turbine Combustion and Ammonia Removal Technology of Gasified Fuels // Energies. – 2010. – № 3. – P. 335–449
- Загрутдинов Р.Ш., Нагорнов А.Н., Сенчин П.К. Наладочные испытания газогенератров Lurgi и перспективы газогенераторных технологий // Ползуновский вестник. – 2007. – № 3. – С. 40–47.
- 16. Осипов П.В., Чернявский Н.В., Рыжков А.Ф. Изучение характера выгорания волчанского бурого угля в условиях кипящего слоя // Теплофизика и теплоэнергетика: сб. науч. статей. – Магнитогорск: МаГУ, 2010. – С. 96–99.
- Баскаков А.П., Мацнев В.В., Распопов И.В. Котлы и топки с кипящим слоем. – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 352 с.
- Дубинин А.М., Кагарманов Г.Р., Обожин О.А. Минитеплоэлектроцентраль на твердом топливе // Энергетик. – 2010. – № 3. – С. 33–35.
- Мунц В.А., Баскаков А.П., Ашихмин А.А. Расчет газообразования при горении твердого топлива в кипящем слое // ИФЖ. – 1988. – № 3. – С. 432–438.
- Тодес О.М., Цитович О.Б. Аппараты с кипящим зернистым слоем: гидравлические и тепловые основы работы. – Л.: Химия, 1981. – 296 с.
- Виленский Т.В., Хэмалян Д.М. Динамика горения пылевидного топлива. – М.: Энергия, 1978. – 498 с.
- 22. Эккерт Э.Р., Дрейк Р.М. Теория тепло- и массообмена / пер. с англ. под ред. А.В. Лыкова. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 680 с.
- Жоров Ю.М. Термодинамика химических процессов. Нефтехимический синтез, переработка нефти и природного газа. – М.: Химия, 1985. – 464 с.

Поступила 21.07.2014 г.

UDC 620.9:662.92; 658.264

# TWO-ZONE AIR BLOW GAS GENERATOR WITH FLUIDIZED BED

### Aleksey A. Dubinin,

Dr. Sc., Ural Federal University, 19, Mira street, Yekaterinburg, 620002, Russia. Email: v.g.tuponogov@urfu.ru

# Vladimir G. Tuponogov,

Dr. Sc., Ural Federal University, 19, Mira street, Yekaterinburg, 620002, Russia. Email: v.g.tuponogov@urfu.ru

# Aleksey F. Ryzhkov,

Dr. Sc., Ural Federal University, 19, Mira street, Yekaterinburg, 620002, Russia. Email: af.ryzhkov@mail.ru

### Yuriy A. Kagramanov,

Ural Federal University, 19, Mira street, Yekaterinburg, 620002, Russia. Email: KagramanovYA@yandex.ru

### Egor S. Labintsev,

Ural Federal University, 19, Mira street, Yekaterinburg, 620002, Russia. Email: egor.labintsev@mail.ru

This paper considers the topicality of developing techniques for gas generation from solid fuels and its application in power installations, including cogeneration. Low temperature technologies with thermo-chemical coal conversion in fluidized bed reactors are the most perspective ones. The authors have developed the construction of two zone gas reactor with fluidized bed and studied its operation in set of electrical power station with gas pump engine cycles, or in combined cycles. The reactor works with air coal gasification. Zones of fuel input and product (clean synth-gas without resin) output the part of which is combusting in reactor for autothermal process running are separated. The authors propose the chemical-kinetic model of gasification to calculate the output synth-gas composition along the reactor zone height and at outlet from the reactor. The gasification process optimization along the temperature in gasification zone was done according to this model. The optimal temperature of the process corresponds to maximum output of synth-gas. The paper introduces the experimental data of theoretical calculations in gas reactor with fluidized bed. As a result, the optimal temperature value was determined as 820 °C, the output synth-gas part was 0,92 for Borodinsky coal. The output synth-gas with its composition and combustion cameras of electrical power stations with gas pump engines and in combustion cameras of electrical power stations with gas pump engines and in combustion cameras of electrical power stations with gas pump engines and in combustion cameras of the output synth-gas.

#### Key words:

Coal, volatile content, air, heat, gasification products, chemical efficiency factor, velocity constant, equilibrium.

The research was carried out at the Ural Federal University and financially supported by the Russian Scientific Fund (project number 14-19-00524).

### REFERENCES

- Korchevoy Yu.P., Maystrenko A.Yu., Topal A.I. *Ekologicheski* chistye ugolnye energotekhnologii [Clean coal technologies]. Kiev, Nauchnaya mysl Publ., 2004. 187 p.
- Kubin M. Szhiganie tverdogo topliva v kipyashchem sloe [Coal combustion in fluidized bed]. Translated from Czech. Moscow, Energoizdat Publ., 1987. 112 p.
- Tabakaev R.B., Kazakov A.V., Zavorin A.S. Perspektivnost nizkosortnykh topliv Tomskoy oblasti dlya teplotekhnicheskogo ispolzovaniya [Prospects of low-grade fuels of Tomsk region for power needs]. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2013, vol. 323, no. 4, pp. 41-46.
- 4. Rundygin Yu.A., Grigorev K.A., Skuditskiy V.E. Nizkotemperaturnaya vikhrevaya tekhnologiya szhiganiya tverdykh topliv: opyt vnedreniya, perspektivy ispolzovaniya [Low temperature vortex technology of solid fuel combustion: experience in introduction, prospects of application]. Vserossiysky nauchnotekhnichesky seminar «Novye tekhnologii szhiganiya tverdogo topliva: ikh tekushchee sostoyanie i ispolzovanie v buduyushchem» [Russian scientific seminar. New technologies of coal combu-

stion: its current statement and future application]. Moscow, 23-24 Jan. 2001. pp. 286-295.

- Shulman V.L., Zaytsev A.V., Bogatova T.F. Razvitie ugolnykh parogazovykh tekhnologiy [Coal IGCC technology development]. Sbornik dokladov konferentsii. Tekhnologii effektivnogo i ekologicheski chistogo ispolzovaniya uglya [Collection of reports of the conference. Technologies of efficient and ecologically clean coal use]. Moscow, 2009. pp. 246–251.
- Gordeev S.I., Valzev N.V., Bogatova T.F., Levin E.I., Shulman V.L., Ryzhkov A.F., Abaimov N.A. O predproektnoy prorabotke gibridnoy ugolnoy PGU s vozdukhonagrevatelem [Hybrid coal IGCC with air heater design]. *Elektricheskie stantsii* – Electrical stations, 2012, no. 10, pp. 17–21.
- Innovatsionnye tekhnologii v energetike [Innovative technologies in power engineering]. Ed. by N.V. Kryuchkova. Ivanovo, Nauchnaya mysl Publ., 2011. 228 p.
- Shilling G-D., Bonn B., Kraus U. *Gazifikatsiya uglya* [Coal gasification]. Moscow, Nedra Publ., 1986. 175 p.
- Yates J.G. Fundamentals of liquidized chemical processes. London, Butterworts, 1983. 222 p.

- 10. Rao A.D. Combined cycle systems for nearzero emission power. Woodhead Publishing Series in Energy, 2012, no. 32, 357 p.
- Robertson A., Domeracki W., Horazak D., Newby R., Rehmat A. Increased efficiency of Topping cycle PCFB power plant. *Proc. of American Power Conference*. Chicago, Illinois, April 9–11, 1996. pp. 17–25.
- Kawabata M., Kurata O., Iki N., Tsutsumi A. System modeling of energy recuperated IGCC system with post-combustion CO<sub>2</sub> capture. *Applied Thermal Engineering*, 2013, no. 54, pp. 310–318.
- Khan J., Wang T. Implementation of demoisturization and devolitilization model in multi-phase simulation of hybrid entrained and fluidized bed mild gasifier. *International Journal of Clean Coal and Energy*, 2013, no. 2, pp. 35-53.
- Hasegawa T. Gas turbine combustion and Ammonia Removal Technology of Gasified Fuels. *Energies*, 2010, no. 3, pp. 335–449.
- Zagrudtinov R.Sh., Nagornov A.N., Senchin P.K. Naladochnye ispytaniya gazogeneratorov Lurgi i perspektivy gazogeneratornykh tekhnologiy [Adjustment tests of Lurgi gas reactors and gasgeneration technologies prospects]. *Polzunovskiy vestnik*, 2007, no. 3, pp. 40–47.
- 16. Osipov P.V., Chernyavskiy N.V., Ryzhkov A.F. Izuchenie kharaktera vygoraniya volchanskogo burogo uglya v usloviyakh kipyashchego sloya [Studying the nature of volchansk coal combustion in fluidized bed]. Sbornik nauchnykh statey. Teplofizika i teploenergetika [Collection of reports of the conference. Heat power physics and thermal power engineering]. Magnitogorsk, 2010. pp. 96–99.

- Baskakov A.P., Matsnev V.V., Raspopov I.V. Kotly i topki s kipyashchim sloem [Boilers and furnaces with fluidized beds]. Moscow, Energoatomizdat, 1996. 352 p.
- Dubinin A.M., Kagarmanov G.R., Obozhin O.A. Miniteploelektrotsentral na tverdom toplive [Mini power station on solid fuel]. *Energetik*, 2010, no. 3, pp. 33-35.
- Munts V.A., Baskakov A.P., Ashikhmin A.A. Rasschet gazoobrazovaniya pri gorenii tverdogo topliva v kipyashchem sloe [Calculation of gas generation from solid fuel in the fluidized bed]. *IFZH*, 1988, no. 3, pp. 432–438.
- Todes O.M., Tsitovich O.B. Apparaty s kipyashchim zernistym sloem: gidravlicheskie i teplovye osnovy raboty [Installations with fluidized beds: hydraulic and main bases of operation]. Leningrad, Khimiya Publ., 1981. 296 p.
- Vilenskiy T.V., Khzmalyan D.M. Dinamika goreniya pylevidnogo topliva [Dust fuel combustion dynamics]. Moscow, Energiya Publ., 1978. 498 p.
- Ekkert E.R., Dreik R.M. Teoriya teplo- i massoobmena [Thermomass transition theory]. Translated from English and ed. by A.V. Lykova. Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1961. 680 p.
- Zhorov Yu.M. Termodinamika khimicheskikh protsessov. Neftekhimicheskiy sintez, pererabotka nefti i prirodnogo gasa [Thermodynamics of chemical processes. Oil synthesis, oil and natural gas processing]. Moscow, Khimiya Publ., 1985. 464 p.

Received: 21 July 2014.

УДК 620.97;621.31;681.518

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ В РЕАЛЬНЫХ РЕЖИМАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

# Дубинин Дмитрий Владимирович,

канд. техн. наук, доцент каф. радиоэлектроники и защиты информации Томского университета систем управления и радиоэлектроники, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40. E-mail: dima@info.tusur.ru

### Лаевский Виктор Евгеньевич (V. Geringer),

канд. техн. наук, зав. лаб. «Регенеративные источники энергии и автомобильная электроника» Государственного объединенного университета Баден-Вюртемберг, Германия, D=88045, Friedrichshafen, Fallenbrunnen 2. E-mail: geringer@dhbw-ravensburg.de

В настоящее время широкое применение находят системы преобразования солнечной энергии в электричество. Солнце обладает практически безграничными ресурсами. Солнечная энергия общедоступна. Разработка и производство систем преобразования солнечной энергии в электричество является наиболее перспективным и активно развиваемым направлением создания экологически чистых регенеративных источников энергии.

**Цель работы.** Для сравнения технических характеристик батарей различных производителей в реальных условиях эксплуатации на кафедре pereнeparuвных источников энергии в Baden-Württemberg Cooperative State University, Department of Engineering, Campus Friedrichshafen спроектирован и реализован системный комплекс «Photovoltaic Research System». Этот комплекс позволил сравнить энергетическую эффективность стационарно установленных элементов с аналогичными панелями, находящимися на платформе двухосевой системы автоматического слежения за углом стояния Солнца.

**Методы исследования.** Исследования производились с использованием информационных систем SolarLog и SolarEdge, позволяющих производить считывание, обработку и накопление эксперементальных данных непосредственно с фотоэлектрических преобразователей. Обработка и проверка результатов производилась в средах MathCAD и MS Excel. Использовались методы статистической обработки информации.

**Результаты.** Результаты, полученные за период с января по март 2014 г., позволили рассмотреть эффективность работы солнечных батарей различных фирм производителей и привести оценки эффективности размещения солнечных панелей на платформе двухосевой системы автоматического слежения («DEGERtraker 5000HD») за углом стояния Солнца по сравнению со стационарным положением. Показано влияние эффектов затенения на стационарно установленные модули. Получены оценки себестоимости электроэнергии, обобщены результаты обработки статистических данных.

### Ключевые слова:

Возобновляемые источники энергии, солнечная батарея, выходная мощность, энергетическая эффективность, себестоимость электроэнергии, солнечная энергия.

#### Актуальность проблемы

В настоящее время широкое применение находят системы преобразования солнечной энергии в электричество [1-3]. Разработка таких систем является наиболее перспективным и активно развиваемым направлением [4-8] создания экологически чистых регенеративных источников энергии. За последние пять лет прирост электроэнергии, выработанной за счет преобразования солнечной энергии, составил 50 %. По экспертным оценкам общая мощность солнечной генерации в мире составляет 100 ГВт на конец 2012 г. [9]. В этой области Российская Федерация многократно отстает от европейских стран. Для стимулирования развития в России возобновляемой энергетики правительство приняло пакет документов, что должно привлечь в эту сферу инвесторов.

Для прямого преобразования солнечной энергии в электрическую используется явление фотоэффекта. У фотоэлектрических установок коэффициент преобразования солнечной энергии в электрическую относительно небольшой [10–12]. В настоящее время он составляет 13–18 % для солнечных батарей массового производства. Суммарная эффективность большинства индустриальных солнечных полупроводниковых систем электроснабжения не превышает 8–12 % [13, 14]. Предпринимаются попытки увеличения коэффициента преобразования в лабораторных условиях. В настоящий момент достигнута величина 24 % для лучших лабораторных образцов [15, 16].

Стоимость электроэнергии, выработанной солнечными батареями, ежегодно снижается. За 2011 г. снижение составило 50 %, а с 2008 г. падение составило 75 %. Если на начало 2007 г. себестоимость 1 Вт составляло для разных типов фотоэлементов 3–4 \$, то в 2013 г. цена киловатт-часа в регионах с большим количеством Солнца составило менее 0,1 EUR.

В связи с этим на базе кафедры регенеративных источников энергии (Faculty of Engineering/Studiengang TEU/Solar Research Laboratory) в городе Фридрихсхафен был создан системный комплекс тестирования солнечных батарей в реальных режимах эксплуатации с целью сопоставления характеристик, создания компьютерных моделей, проведения анализа энергетической эффективности стационарно установленных элементов с аналогичными панелями, находящимися на платформе двухосевой системы автоматического слежения за углом стояния Солнца, а также исследования процессов и создания моделей потери производительности батарей за счёт процессов старения.

#### Краткое техническое описание комплекса

Исследуемые солнечные панели были разделены на две группы. Первая группа солнечных батарей состоит из 40 панелей, расположенных на крыше здания лаборатории (первый пункт наблюдения). Конструкция позволяет изменять наклон батарей к плоскости крыши. Всего возможны шесть фиксированных положений угла наклона: от 10 до 60 градусов.

Вторая группа солнечных батарей размещена на платформе двухосевой системы автоматического слежения фирмы «DEGERenergie GmbH» (второй пункт наблюдения). Система «DEGERtraker 5000HD» позволяет сохранять положение Солнца на нормали плоскости несущей платформы. Сектор поворота платформы по азимуту составляет 300 градусов, по углу места – от 20 до 90 градусов. Максимальная площадь несущей платформы составляет 43,5 м<sup>2</sup>. В течение года система слежения «DEGERtraker 5000HD» потребляет 8 кВт-ч электроэнергии. Общий вид комплекса показан рис. 1 [17].



Рис. 1. Внешний вид системного комплекса

### Fig. 1. System complex exterior

В составе системного комплекса используются широко распространенные в Европе солнечные батареи: SW270 MONO фирмы Solar World, LG280N1C фирмы LG, SI M 60 260 фирмы Bosch, 255 W 60M фирмы Asola, SF220 245W фирмы Hanwha, KD245GH-4YB2 фирмы Kyocera, REC245PE фирмы REC, UF L 95-115 фирмы Q.Cells.

Такой набор позволяет проводить разнообразные исследования [17] различных технологий создания солнечных батарей [18–20]: изготовленных из монокристаллического кремния (панели фирм SolarWorld, LG, Bosch, Asola), мультикристаллического кремния (панели фирм Hanwha, Kyocera, REC), а также тонкоплёночные фотоэлектрические преобразователи фирмы Q.Cells.

### Результаты обработки статистических данных

В данной работе изучалась эффективность размещения солнечных панелей на рабочей поверхности следящей системы «DEGERtraker 5000HD» по сравнению с их размещением на крыше лаборатории. Для этого были выбраны солнечные панели LG280N1C фирмы LG, SI M 60 260 фирмы Bosch, 255 W 60M фирмы Asola, поскольку они расположены в обоих пунктах наблюдения. Из двенадцати экземпляров каждого образца четыре установлены на крыше лаборатории, а остальные - на рабочей поверхности следящей системы. Количество энергии, выработанной каждым модулем, измерялось информационной системой Solar Edge. Полученные данные усреднялись для каждого типа батарей, установленных в первом и во втором пунктах наблюдения. Сбор данных о выработке электроэнергии солнечными панелями проводился в течение первого квартала 2014 г.

На рис. 2. приведены данные о среднем значении электроэнергии  $W_{\rm KP}$ , выработанной одним модулем различных фирм, установленным в первом пункте наблюдения, за период с января по март 2014 г. Угол стояния панелей на крыше составлял 60 градусов к линии горизонта.



**Рис. 2.** Среднее значение электроэнергии W<sub>KP</sub>, выработанной одним модулем LG280N1C (1), SI M 60 260 (2), 255 W 60M (3) за период с января по март 2014 г.

**Fig. 2.** Average value of electric energy  $W_{kp}$  generated by one module LG280N1C (1), SI M 60 260 (2), 255 W 60M (3) from January to March 2014

Аналогичные солнечные панели, установленные на двухосевой платформе системы слежения «DEGERtraker 5000HD», за тот же период времени выработали несколько больше энергии  $W_{TP}$ . Эти данные приведены на рис. 3. Рост выработки электроэнергии объясняется работой следящей системы наведения.

Общий анализ полученных данных показал, что в январе эффективность выработки энергии на платформе двухосевой системы автоматического слежения превышала на 22 % выработку электроэнергии панелями, стационарно установленными на крыше. В феврале эффективность выработки энергии на платформе двухосевой системы снизилась на 2 % и превысила на 20 % энергию, полученную стационарно установленными панелями. В марте система автоматического слежения позволила получить выигрыш энергии на уровне 33 % по сравнению со стационарно установленными панелями. А средняя эффективность системы слежения за весь временной период наблюдения составила 25 %. На рис. 4. показано отношение энергий  $W_{TP} \kappa W_{KP}$  для солнечных панелей каждого вида за период наблюдения.



**Рис. 3.** Среднее значение электроэнергии W<sub>TP</sub>, выработанной одним модулем LG280N1C (1), SI M 60 260 (2), 255 W 60M (3) за период с января по март 2014 г.

Fig. 3. Average value of electric energy W<sub>TP</sub> generated by one module LG280N1C (1), SI M 60 260 (2), 255 W 60M (3) from January to March 2014



Рис. 4. Отношение значений W<sub>TP</sub> к W<sub>KP</sub> для модулей LG280N1C (1), SI M 60 260 (2), 255 W 60M (3) за период с января по март 2014 г.

**Fig. 4.** Ratio of  $W_{TP}$  to  $W_{KP}$  for modules LG280N1C (1), SI M 60 260 (2), 255 W 60M (3) from January to March 2014

Как видно из рис. 2, 3 больше энергии выработал модуль LG280N1C. Выигрыш составляет 10–12 % по сравнению с модулем SI M 60 260 и 17–20 % по сравнению с модулем 255 W 60M. Солнечные панели всех видов имеют практически одинаковые площади рабочей поверхности, но отличаются ценой. Поэтому представляет интерес себестоимость электроэнергии, определяемая как отношение среднего значения выработанной энергии к стоимости панели. Данная величина характеризует окупаемость инвестиций. На рис. 5 для всех солнечных батарей приведены данные о себестоимости электроэнергии для модулей, установленных на крыше лаборатории. Аналогичные данные для модулей, размещенных на платформе следящей системы «DEGERtraker 5000HD», приведены на рис. 6. Графики показывают, что для всех типов панелей себестоимость электроэнергии практически одинаковая.



**Рис. 5.** Себестоимость электроэнергии, выработанной солнечными батареями LG280N1C (1), SI M 60 260 (2), 255 W 60M (3), за период с января по март 2014 г. в первом пункте наблюдения





Ис. 6. Себестоимость электроэнергии, выработанной солнечными батареями LG280N1C (1), SI M 60 260 (2), 255 W 60M (3), за период с января по март 2014 г. во втором пункте наблюдения



Следует заметить, что при выработке электроэнергии солнечными панелями, установленными на крыше, имел место эффект затенения. Поскольку солнечные батареи были установлены под углом 60 градусов к горизонту, в утреннее время панели первого ряда создавали препятствие для прохождения солнечных лучей к панелям второго, третьего и четвертого рядов. Это привело к некоторому снижению выработки электроэнергии. На рис. 7 приведены данные о неравномерности выработки электроэнергии за период с января по март. Поскольку эффект затенения не влиял на солнечные батареи первого ряда, они выработали максимальный объем электричества  $W_{\rm max}$ . Сильнее всего затенение повлияло на батареи, которые были установлены в четвертом ряду. Они выработали наименьшее значение электроэнергии  $W_{\rm min}$ . Таким образом, отношение  $W_{\rm max} \ K \ W_{\rm min}$  характеризует неоднородность выработки электроэнергии одинаковыми солнечными панелями, установленными в разных местах первого пункта наблюдения. Как следует из рис. 7, потери за счет затенения могут достигать 18 %.

### Заключение

В данной работе были представлены данные о выработке электроэнергии из солнечного света панелями LG280N1C, SI M 60 260, 255 W 60M, проведен анализ эффективности работы двухосевой системы автоматического слежения за углом стояния Солнца системы слежения DEGERtraker 5000HD, дана оценка себестоимости электроэнергии. Анализ показал, что использование двухосевой системы автоматического слежения повышает выработку электроэнергии в среднем на 25 %.

Также было изучено влияние затенения одних солнечных батарей другими, получены данные об уровне снижения выработанной электроэнергии вследствие этого эффекта. Потери составили от 7 до 18 %.

Данные исследования требуют продолжения, так как эффективность выработки электроэнергии из солнечного света во втором и третьем кварталах

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Volker Q. Regenerative Energiesysteme. München: Carl Hanser Verlag, 2013. – 424 S.
- Wagner A. Photovoltaik Engineering: Handbuch für Planung, Entwicklung und Anwendung. – Heidelberg: Stringer Verlag, 2010. – 439 S.
- Фортов В.Е., Попель О.С. Энергетика в современном мире. Долгопрудный: ИД «Интеллект», 2011. – 168 с.
- Саидова Г.К. Альтернативные источники энергии: возможности использования в Узбекистане: аналитический доклад. – Ташкент: Центр экономических исследований, 2011. – 74 с.
- Дураева Е. Возобновляемая энергия в России. От возможности к реальности. – Париж: Изд. ОЭСР/МЭА, 2004. – 124 с.
- Попель О.С. Возобновляемые источники энергии: роль и место в современной и перспективной энергетике // Ж. рос. хим. обва им. Д.И. Менделеева. – 2008. – Т. 52. – № 6. – С. 95–106.
- Фортов В.Е., Макаров А.А. Направления инновационного развития энергетики мира и России // Успехи физических наук. 2009. Т. 179. № 12. С. 1337–1353.
- Никитин Д. Трудный путь к солнцу: согреет ли Россию солнечная энергетика // РосБизнесКонсалтинг. 1995–2015. URL: http://top.rbc.ru/economics/17/06/2013/862008.shtml (дата обращения: 19.02.2014).
- Gremenok V.F. Thin film solar cells based on Cu(In, Ga)Se<sub>2</sub> // ECOBALTICA'2006: Proceedings of the VI International Youth Environmental Forum / Ed.by M. Fiodorov et al. – Saint-Petersburg, 2006. – P. 24–28.
- Würfel P. Physik der Solarzellen. Heidelberg: Spektrum Publ., 2000. – 195 S.
- Рейви К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии. М.: Мир, 1984. – 472 с.



- **Рис. 7.** Влияние взаимного затенения солнечных батарей на снижение выработки электроэнергии для модулей LG280N1C (1), SI M 60 260 (2), 255 W 60M (3) за период с января по март 2014 г. в первом пункте наблюдения
- **Fig. 7.** Influence of inter-shading of solar batteries on decrease of electricity generation for modules LG280N1C (1), SI M 60 260 (2), 255 W 60M (3) from January to March 2014 in the first observation point

возрастает. Кроме того, в стоимости солнечных панелей, установленных на системе слежения, не были учтены затраты на покупку DEGERtraker 5000HD, а в панелях, установленных стационарно, – затраты на систему крепления батарей. Окончательные выводы об энергетической эффективности солнечных батарей в условиях данной местности целесообразно сделать после годового цикла наблюдений.

- Würfel P. Physics of solar cells. From principles to new concepts. – Weinheim: Wiley-VCH Publ., 2005. – 186 p.
- Schünemann C. Photovoltaik // Regenerative Zukunft. URL: http://www.regenerative-zukunft.de/erneuerbare-energien-menu/photovoltaik (дата обращения: 25.02.2014).
- Гременок В.Ф. Солнечные элементы на основе полупроводниковых материалов. – Минск: ИЦ БГУ, 2007. – 222 с.
- Шаповалов В.А., Никитенко Ю.А. Профилированные монокристаллы кремния для солнечной энергетики // Вопросы атомной науки и техники. – 2014. – № 1 (89). – С. 48–52.
- Mahon S. SunPower claims new 23.4 percent solar cell efficiency record // PV-Tech. 2014. URL: http://www.pv-tech.org/news/ sunpower\_claims\_new\_234\_percent\_solar\_ cell\_efficiency\_record (дата обращения: 14.02.2014).
- 17. Системный комплекс по исследованию работы солнечных батарей различных производителей в реальных условиях эксплуатации / Д.В. Дубинин, В.Е. Лаевский, В. Поль, Дж. Хайлиг // Электронные средства и системы управления: Матер. докладов IX Междунар. научно-практ. конф. – Томск: B-Спектр, 2013. – С. 140–145.
- Roedem B. Thinfilm PV module review: Changing contribution of PV module technologies for meeting volume and product needs / Ed. by B. Roedem // Refocus. - 2006. - V. 7. - № 4. - P. 34-39.
- Jager-Waldau A. R&D roadmap for PV // Thin Solid Films. 2004. – V. 451. – P. 448–454.
- Photovoltaic materials, history, status and outlook / A. Goetzberger et al. // Material Science and Engineering. – 2003. – V. 40. – P. 1–46.

Поступила 12.04.2014 г.

UDC 620.97;621.31;681.518

# ENERGY EFFICIENCY OF SOLAR BATTERIES UNDER REAL OPERATING CONDITIONS

### Dmitry V. Dubinin,

Cand. Sc., Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: dima@info.tusur.ru

# Viktor Geringer,

PhD, Baden-Wuerttemberg Cooperative State University, Campus Friedrichshafen, Fallenbrunnen 2, Friedrichshafen, D-88045, Germany. E-mail: geringer@dhbw-ravensburg.de

At the present time solar energy-electricity conversion systems are widely used. Solar energy is widely available while possessing unlimited resources. This direction is the most promising and rapidly developing branch of the environmentally friendly renewable energy sources creation. **The main aim of the study.** Within the framework of comparing the features of the batteries of various manufacturers under actual operating conditions at the Department of renewable energy sources in Baden-Württemberg Cooperative State University, Department of Engineering, Campus Friedrichshafen the authors have designed and realized the system complex PRS which allows analyzing energy efficiency of the fixed, stationary elements with the elements being placed on the platform of the dual-axis system of the sun standing angle auto-tracking.

**The methods used in the study.** The investigations were carried out with the use of Solarlog and SolarEdge systems which allow reading, processing and storing measurement data directly from the respective photovoltaic cells. The data were processed and verified in MathCAD and MS Excel environments. The authors used the methods of information statistical processing.

The results obtained for the period of January–March 2014 allowed considering the efficiency of operation of the solar cell batteries of different manufacturers and evaluating the advantage of placing solar panels on a biaxial system with automatic tracking angle and elevation («DEGERtraker 5000HD») compared to a fixed, stationary system. The influence of shading effects on the fixed modules is demonstrated. In conclusion, the authors obtained the estimates of electricity cost, summarized the results of statistical data processing.

### Key words:

Renewable energy sources, photovoltaic solar battery, output power, power efficiency, electricity charges, solar energy.

### REFERENCES

- 1. Volker Q. *Renewable Energy Systems* [Regenerative Energiesysteme]. München, Carl Hanser Publ., 2013. 424 p.
- Wagner A. Photovoltaik Engineering: Handbuch für Planung, Entwicklung und Anwendung [Photovoltaic Engineering: Handbook for Planning, Development and Application]. Heidelberg, Stringer Publ., 2010. 439 p.
- Fortov V.E., Popel O.S. *Energetika v sovremennom mire* [Power engineering in the modern world]. Dolgoprudny, Intellekt Publ. House, 2011. 168 p.
- Saidova G.K. Alternativnye istochniki energii: vosmozhnosti ispolsovaniya v Uzbekistane. Analiticheskiy doklad [Alternative energy sources: the possibility of using in Uzbekistan. Analytical report]. Tashkent, Centre for Economic Research Publ., 2011. 74 p.
- Duraeva E. Vozobnovlyaemaya energiya v Rossii. Ot vozmozhnosti k realnosti [Renewable energy in Russia. From possibility to reality]. Paris, OECD/IEA Publ., 2004. 124 p.
- Popel O.S. Vozobnovlyaemye istochniki energii: rol i mesto v sovremennoy i perspektivnoy energetike [Renewable energy: the role and place in modern and future energy]. *Zhurnal rossiyskoy khimii* obshchestva D.I. Mendeleeva, 2008, vol. 52, no. 6, pp. 95–106.
- Fortov V.E., Makarov A.A. Napravleniya innovatsionnogo razvitiya energetiki mira i Rosii [Directions of innovative development of energy in the world and in Russia]. Uspekhi fizicheskikh nauk, 2009, vol. 179, no. 12, pp. 1337–1353.
- Nikitin D. Trudny put k solntsu: sogreet li Rossiyu solnechnaya energetika [Difficult way to the sun: whether the solar power will warm Russia]. *RosBiznesKonsulting*. 1995–2015. Available at: http://top.rbc.ru/economics/17/06/2013/862008.shtml (accessed 19 February 2014).
- Gremenok V.F. Thin film solar cells based on Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub>. Proceedings of the VI International Youth Environmental Forum «ECOBAL-TICA 2006». Ed by M. Fiodorov. Saint-Petersburg, 2006. pp. 24–28.
- Würfel P. *Physik der Solarzellen* [Physics of Solar Cells]. Heidelberg: Spektrum Publ., 2000. 195 p.

- Ravi K.V. Imperfections and Impurities in Semiconductor Silicon. John Wiley & Sons Inc Publ., 1981. 379 p.
- 12. Würfel P. Physics of solar cells. From principles to new concepts. Weinheim, Wiley-VCH Publ., 2005. 186 p.
- Schünemann C. Technik und Solarzellenarten [Technology and solar cell types]. Available at: http://www.regenerative-zukunft.de/erneuerbare-energien-menu/photovoltaik (accessed 25 February 2014).
- Gremenok V.F. Solnechnye elementy na osnove poluprovodnikovykh materialov [Solar cells based on semiconductor materials]. Minsk, Zentr BGU Publ., 2007. 222 p.
- Shapovalov V.A., Nikitenko Yu.A. Profilirovannye monokristaly kremniya dlya solnechnoy energetiki [Shaped silicon monocrystals for solar energy]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki*, 2014, no. 1 (89), pp. 48–52
- Mahon S. SunPower claims new 23.4 percent solar cell efficiency record. *PV-Tech.* 2014. Available at: http://www.pvtech.org/ news/sunpower\_claims\_new\_234\_percent\_solar\_ cell\_efficiency\_record (accessed 14 February 2014).
- Dubinin D.V., Geringer V., Pohl V., Heilig J. Sistemny kompleks po issledovaniyu raboty solnechnykh batarey razlichnykh proizvoditeley v realnykh usloviyakh ekspluatazii [Solar Photovoltaic Research System for Investigating different PV Modules under real Conditions]. *Elektronny sredstva i sistemy upravleniya: Materialy dokladov IX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [International Scientific-Practical Conference of «Electronic Instrumentation and Control Systems»]. Tomsk, V-Spektr Press, 2013. Vol. 2, pp. 140–145.
- Roedem B. Thinfilm PV module review: Changing contribution of PV module technologies for meeting volume and product needs. Ed. by B. Roedem. *Refocus Press*, 2006, vol. 7, no. 4, pp. 34–39.
- Jager-Waldau A. R&D roadmap for PV. Thin Solid Films, 2004, vol. 451, pp. 448–454.
- Goetzberger A. Photovoltaic materials, history, status and outlook. Material Science and Engineering, 2003, vol. 40, pp. 1–46.

УДК 62-83-523:550.832.07

# ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОДЪЕМНИКОВ КОМПЛЕКСОВ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СКВАЖИН

# Чернышев Александр Юрьевич,

канд. техн. наук, доцент каф. электропривода и электрооборудования Энергетического института ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: ach@tpu.ru

### Журиков Сергей Александрович,

зам. директора по геофизической аппаратуре ООО «ACV-ЭКСПЕРТ», Россия, 634061, г. Томск, ул. Красноармейская, д. 51/1. E-mail: GurikovSA @asu-expert.ru

# Чернышев Игорь Александрович,

канд. техн. наук, доцент каф. электропривода и электрооборудования Энергетического института ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: chia@tpu.ru

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью создания асинхронных электроприводов подъемников комплексов геофизического исследования скважин.

**Цель работы:** исследование систем преобразователь частоты – асинхронный двигатель, учитывающих особенности эксплуатации и изменения параметров нагрузки подъемников комплексов геофизического исследования скважин.

**Методы исследований** основаны на использовании теории автоматического управления и имитационного моделирования в программной среде MatLab Simulink.

**Результаты**. Разработана методика расчета нагрузки при подъеме геофизического прибора в сухих скважинах и скважинах, заполненных жидкостью или буровым раствором, что позволяет более точно определять мощность электропривода подъемника. Рассчитаны переходные процессы при пуске, торможении электропривода, а также при прихвате геофизического прибора в скважине. Разработаны и исследованы асинхронные электроприводы геофизических подъемников с векторным регулированием скорости. Полученные теоретические исследования подтверждены экспериментально при создании электроприводов подъемников установок геофизического исследования скважин.

Выводы. В скважинах с жидкостью силу тяги при подъеме геофизического прибора необходимо рассчитывать с учетом эффекта вытеснения жидкости геофизическим прибором и каротажным грузонесущим кабелем. Суммарный момент инерции электропривода каротажного подъемника, приведенный к валу двигателя, незначительно изменяется как при перераспределении массы кабеля с барабана в скважину, так и от плотности бурового раствора. Полученные результаты позволяют применять стандартные ПИ-регуляторы скорости асинхронных электроприводов с векторным управлением без ухудшения качества регулирования скорости и момента при любой глубине скважины. При исследовании систем векторного управления необходимо учитывать особенности широтно-импульсного регулирования напряжения преобразователя частоты, что позволяет получить более достоверные результаты имитационного моделирования и ускорить процесс настройки электроприводов.

### Ключевые слова:

Геофизическое исследование скважин, статические нагрузки подъемников, асинхронный электропривод, векторное управление, широтно-импульсная модуляция.

# Введение

Лаборатории [1] для выполнения геофизического исследования скважин являются неотъемлемым атрибутом при бурении [2] и эксплуатации газовых [3], нефтяных скважин [4], скважин рудной геологии, а также гидрогеологии при добыче промышленной и питьевой воды. Комплексы для геофизических исследований в скважинах оснащены каротажными подъемниками (рис. 1). В состав современного каротажного подъемника входит: 1 – электрический привод лебедки с асинхронным двигателем и редуктором; 2 – электрический привод кабелеукладчика; 3 – барабан для намотки каротажного грузонесущего кабеля.

Разработка каротажных подъемников, как правило, производиться с учетом особенностей предстоящих исследований скважин, в первую



Рис. 1. Каротажный подъемник

Fig. 1. Wireline unit

очередь их глубины и типа скважинного прибора [5]. В этом случае в вариантах изделия габари-

ты и мощность установленного электропривода существенно отличаются. Однако при разработках любых геофизических комплексов они должны соответствовать отраслевой технической инструкции [6]. В данной работе приведена методика определения нагрузки при подъеме геофизического прибора каротажным подъемником в зависимости от глубины исследуемых скважин, их особенностей, параметров барабана и грузонесущего кабеля, исследована возможность применения для каротажных подъемников асинхронных частотнорегулируемых электроприводов.

# Расчет нагрузки при подъеме геофизического прибора

Диаметр намотки кабеля на барабан рассчитаем относительно числа слоев N=1,2,3,... каротажного грузонесущего кабеля на барабане, начиная с пустого барабана:

$$d_{\kappa,\delta}(N) = d_{\delta} + (2N-1)d_{\kappa},$$

где  $d_{5}$  – диаметр барабана, N;  $d_{\kappa}$  – диаметр каротажного грузонесущего кабеля, м.

Остаточная длина каротажного грузонесущего кабеля, намотанного на барабан

$$L_{\mathbf{K},\mathbf{\delta}}(N) = w\pi (Nd_{\mathbf{\delta}} + N^2 d_{\mathbf{K}}),$$

где  $w=l_6/d_{\rm g}$  – число витков кабеля в одном слое намотки;  $l_6$  – длина барабана, м.

Сила тяги, создаваемая барабаном для геофизического прибора, находящегося в сухой скважине:

$$F_{\rm TC}(N) = [(L_{\rm K} - L_{\rm K,0}(N))m_{\rm K,V}]g + m_{\rm L,\Pi}g,$$

где  $L_{\rm k}$  – полная длина каротажного грузонесущего кабеля, м;  $m_{\rm k,y}$  – масса удельная каротажного грузонесущего кабеля, кг/м;  $m_{\rm r.n}$  – масса геофизического прибора, кг; g – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Сила тяги, создаваемая барабаном для геофизического прибора, находящегося в скважине, заполненной жидкостью или буровым раствором:

$$F_{\rm TB}(N) = [(L_{\rm K} - L_{\rm K.6}(N))(m_{\rm K.y} - s_{\rm K}\rho_{\rm c.w})]g + (m_{\rm r.n} - V_{\rm r.n}\rho_{\rm c.w})g,$$

где  $s_{\rm k} = \pi d_{\rm k}^{2}/4$  – площадь поперечного сечения каротажного грузонесущего кабеля, м<sup>2</sup>;  $V_{\rm r,n}$  – объем геофизического прибора, м<sup>3</sup>;  $\rho_{\rm c.m}$  – плотность скважинной жидкости (бурового раствора), кг/м<sup>3</sup>.

Так как геофизические исследования в скважинах в основном производятся при подъеме геофизического прибора, то момент сопротивления, приведенный к валу двигателя, при статической нагрузке:

$$M_{\rm c}(N) = \frac{F_{\rm T}(N)d_{\rm K,\tilde{6}}(N)}{2i_{\rm II}\eta_{\rm II}},$$

где  $i_n$  – общее передаточное число от вала электродвигателя к барабану намотки каротажного грузонесущего кабеля;  $\eta_n$  – к.п.д. кинематической цепи, учитывающий потери в редукторе, цепной передаче, подшипниках качения и трение в блоках и каротажном кабеле;  $F_{T}(N)$  – сила тяги, создаваемая барабаном.

На рис. 2 приведены графики момента сопротивления, создаваемого геофизическим прибором в сухой скважине  $M_c(N)$  (кривая 1), и момента сопротивления, создаваемого геофизическим прибором в скважине, заполненной буровым раствором (кривая  $2 - \rho_{c.*}=1000 \text{ кг/m}^3$ , кривая  $3 - \rho_{c.*}=1730 \text{ кг/m}^3$ , кривая  $4 - \rho_{c.*}=2200 \text{ кг/m}^3$ ), от числа слоев каротажного грузонесущего кабеля на барабане при следующих параметрах:  $d_6=0,5 \text{ м}$ ;  $d_{\kappa}=0,0102 \text{ м}$ ;  $l_6=0,96 \text{ м}$ ;  $L_{\kappa}=3500 \text{ м}$ ;  $m_{\kappa,y}=0,422 \text{ кг/m}$ ;  $V_{r.n}=0,0254 \text{ кг/m}^3$ ;  $m_{r.n}=120 \text{ кг}$ ;  $i_n=30,735 \text{ o.e.}$ ;  $\eta_n=0,84 \text{ o.e.}$ 



**Рис. 2.** Зависимость статического момента сопротивления от слоя N каротажного грузонесущего кабеля на барабане

Fig. 2. Resistance static moment dependence on layer N of wireline load-bearing cable on a drum

Анализ полученных зависимостей  $M_{\rm e}(N)$  показывает, что учет особенностей работы геофизического прибора в буровом растворе существенно снижает статический момент сопротивления, приведенный к валу двигателя, и, как следствие, установленную мощность двигателя.

Линейная скорость проведения каротажа находится в диапазоне от 50 до 3000 м/час или от  $v_{\min}=0,014$  м/с до  $v_{\max}=0,83$  м/с и зависит от методов геофизических исследований в скважине. Минимальная или максимальная скорость вращения барабана также зависит от числа слоев кабеля на барабане. Необходимо, чтобы электропривод обеспечивал минимальную скорость подъема, при максимальном числе слоев каротажного грузонесущего кабеля на барабане, и максимальную скорость подъема, при наименьшем числе слоев кабеля.

Для приведенных ранее параметров каротажного подъемника эти условия выполняются при следующих угловых скоростях вращения двигателя:  $\omega_{\text{дmin}}=3,083$  рад/с и  $\omega_{\text{дmax}}=312,12$  рад/с. Диапазон регулирования скорости двигателя  $D=\omega_{\text{gmax}}/\omega_{\text{дmin}}=312,12/3,083=101,2$ , что определяет способ регулирования скорости асинхронного двигателя – векторное управление.

Одновременно с изменением момента сопротивления на валу двигателя изменяется и эквивалентный момент инерции электропривода каротажного подъемника, приведенный к валу двигателя:

$$J_{\Sigma} = k_{\rm my} J_{\rm d} + \frac{J_{\rm d}(N)}{i_{\rm d}^2} + m_{\rm K,r}(N)\rho^2(N), \qquad (1)$$

где  $k_{\pi y}$ =1,05–1,3 – коэффициент, учитывающий момент инерции соединительной муфты и первой шестерни редуктора электропривода;  $J_{\pi}$  – момент инерции двигателя, кг·м<sup>2</sup>;  $J_{6}(N)$  – момент инерции барабана с N слоями кабеля, кг·м<sup>2</sup>;

$$m_{\rm k,r}(N) = (L_{\rm k} - L_{\rm k,\delta}(N))m_{\rm k,v} + m_{\rm r}$$

масса геофизического прибора с кабелем в сухой скважине или

$$m_{\text{K},\Gamma}(N) = (L_{\text{K}} - L_{\text{K},\tilde{6}}(N))(m_{\text{K},\text{y}} - s_{\text{K}}\rho_{\text{C},\text{w}}) + (m_{\text{\Gamma},\Pi} - V_{\Gamma,\Pi}\rho_{\text{C},\text{w}})$$

– масса геофизического прибора с кабелем в скважине, заполненной жидкостью или буровым раствором, кг;  $\rho = v(N)/\omega_{\rm gs}(N)$  – радиус приведения геофизического прибора с кабелем в скважине к валу двигателя, м/рад; v(N) – линейная скорость геофизического прибора в скважине, м/с;  $\omega_{\rm gs}(N)$  – угловая скорость двигателя при N слое кабеля на барабане, рад/с.

При подъеме геофизического прибора радиус приведения

$$\rho = \frac{\nu(N)}{\omega_{\rm дB}(N)} = \frac{\omega_{\rm fap}(N) \cdot d_{\rm K, \tilde{6}}(N)}{\omega_{\rm dB}(N)} = \frac{d_{\rm K, \tilde{6}}(N)}{2i_{\rm n}}$$

где  $\omega_{\text{бар}}(N)$  – угловая скорость барабана при N слое кабеля на барабане, рад/с.

Тогда (1) преобразуется к виду:

$$J_{\Sigma} = k_{\Pi y} J_{\Lambda} + \frac{J_{\delta\Pi} + \left[\frac{d_{\delta}^{2} + d_{\kappa\delta}^{2}(N)}{8} L_{\kappa\delta}(N)m_{\kappa y}\right]}{i_{\Pi}^{2}} + m_{\kappa,\Gamma}(N) \left(\frac{d_{\kappa,\delta}(N)}{2i_{\Pi}}\right)^{2}.$$
 (2)

На рис. З приведены графики суммарного момента инерции электропривода, приведенного к валу двигателя, для геофизического прибора в сухой скважине  $J_2(N)$  (кривая 1) и момента инерции электропривода в скважине, заполненной буровым раствором (кривая  $2 - \rho_{c.m} = 1000$  кг/м<sup>3</sup>, кривая  $3 - \rho_{c.m} = 1730$  кг/м<sup>3</sup>, кривая  $4 - \rho_{c.m} = 2200$  кг/м<sup>3</sup>), от числа слоев N каротажного грузонесущего кабеля на барабане.

Анализ графиков показывает, что суммарный момента инерции электропривода  $J_{\Sigma}$ , приведенный к валу двигателя, незначительно изменяется как от числа слоев N каротажного грузонесущего кабеля на барабане, так и от плотности бурового раствора  $\rho_{c.ж}$ . Это объясняется, в первую очередь, большим передаточным числом от вала электродвигателя к барабану намотки каротажного грузонесущего кабеля и малым радиусом приведения поступательно движущихся элементов – геофизического прибора с кабелем в скважине.



**Рис. 3.** Зависимость момента инерции электропривода от слоя N каротажного грузонесущего кабеля на барабане

*Fig. 3.* Electric drive inertia moment dependence on layer N of wireline load-bearing cable on a drum

Незначительные изменения момента инерции электропривода, приведенного к валу двигателя, позволяют выполнить асинхронный частотно-регулируемый электропривод подъемника с векторным регулированием скорости, а его регулятор скорости – с постоянным коэффициентом усиления.

### Моделирование электропривода подъемника

Система управления асинхронным электроприводом с преобразователем частоты, обеспечивающая диапазон регулирования скорости D≥1:100, может быть построена с модальным [7] или подчиненным [8–10] регулированием. Несмотря на высокое быстродействие электроприводов с модальным регулятором [11], при выполнении электроприводов каротажных подъемников предпочтение следует отдавать системам подчиненного регулирования [12–17], которые обеспечивают простоту настройки регуляторов промышленных электроприводов, особенно при необходимости добавления дополнительного контура регулирования линейной скорости подъемника.

Функциональная схема асинхронного электропривода каротажного подъемника с векторным регулированием скорости приведена на рис. 4.

На функциональной схеме рис. 4 приняты следующие обозначения: *М* – трехфазный асинхронный двигатель; ПЧ – двухзвенный преобразователь частоты с автономным инвертором напряжения; РП – регулятор потокосцепления; РС – регулятор скорости; РТ – регулятор тока; ПКП – преобразователь координат прямой; ПКО – преобразователь координат обратный; Б – барабан; МР – мерный ролик; ГП – геофизический прибор; *BR* – датчик скорости; ИДП – импульсный датчик положения.

Для исследования электроприводов каротажных подъемников комплексов геофизического исследования скважин в программной среде *Mat-Lab-Simulink* составлена программа имитационного моделирования асинхронных частотно-регулируемых электроприводов с векторным управлением. Программа учитывает широтно-импульсное регулирование напряжение преобразователя частоты. Исследования проведены с асинхронным двигателем типа 5А250М2К, имеющим следующие технические данные: номинальная мощность  $P_{\mu}=55$  кВт; номинальная частота вращения  $n_{\mu}=2945$  мин<sup>-1</sup>; номинальный фазный ток  $I_{1\pi}=98$  А. Параметры схемы замещения асинхронного двигателя определены в соответствии с методикой, изложенной в [18]. Близкие результаты дают вычисления по [19, 20].



**Рис. 4.** Функциональная схема асинхронного электропривода каротажного подъемника с векторным регулированием скорости

*Fig. 4.* Circuit diagram of induction electric drive of the wireline elevator with velocity vector control

На рис. 5 приведены графики переходных процессов скорости двигателя  $\omega$  и его электромагнитного момента M для подъема геофизического прибора и его остановки. График отражает цикл работы каротажного подъемника:

- плавный пуск на малую скорость подъема геофизического прибора для выбора зазоров в кинематике электропривода и натяжения каротажного грузонесущего кабеля;
- плавный переход на рабочую скорость, определяемую типом прибора геофизического исследования скважин;
- равномерное движение геофизического прибора в скважине;
- плавное торможение барабана лебедки при приближении геофизического прибора к устью скважины или башмаку обсадной колонны во избежание соскальзывания грузонесущего кабеля с мерного ролика и его дальнейшего обрыва;
- подход к устью скважины с малой скоростью;
- плавное торможение, останов электропривода и его отключение с наложением механического тормоза на вал двигателя.



Рис. 5. Графики переходных процессов скорости двигателя ω подъемника и его электромагнитного момента M при стандартном цикле работы подъемника

**Fig. 5.** Curves of transients of the elevator motor velocity  $\omega$  and its electromagnetic torque M at standard cycle of the elevator operation

Пульсации электромагнитного момента M на графиках переходных процессов (рис. 5) объясняются широтно-импульсным регулированием напряжения преобразователя частоты. Колебания скорости электродвигателя, являющегося инерционным звеном второго порядка, на частоте работы ШИМ 5 кГц практически отсутствуют.

На рис. 6 приведены результаты моделирования прихвата геофизического прибора в скважине.



подъемника при заклинивании геофизического прибора в скважине

*Fig. 6.* Curves of transients in the elevator electric drive at geophysical tool seizure in a borehole

При движении геофизического прибора в скважине возможно его заклинивание (прихват кабеля или прибора). Прихват геофизического прибора является нежелательным, но штатным режимом работы каротажного подъемника. В этом случае подъем необходимо немедленно остановить. Иногда кабель с геофизическим прибором удается освободить, однако во всех случаях заклинивание геофизического прибора в скважине не должно приводить к выходу из строя электропривода подъемника комплекса геофизического исследования скважин. В подавляющем большинстве случаев тормозной момент на электроприводе подъемника растет постепенно по мере вытягивания каротажного грузонесущего кабеля, как показано на рис. 6. В регулируемом электроприводе останов подъема геофизического прибора происходит автоматически при достижении электромагнитным моментом асинхронного двигателя допустимого значения момента стопорения.

#### Выводы

 В скважинах с жидкостью силу тяги при подъеме геофизического прибора необходимо рассчитывать с учетом эффекта вытеснения жидкости геофизическим прибором и каротажным грузонесущим кабелем, что позволяет в скважинах с обсадными колоннами, где маловероятно заклинивание прибора, значительно снизить мощность установленного двигателя электропривода.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Модуль индукционного каротажа для телесистемы с электромагнитным каналом связи / Р.С. Мухамадиев, А.Г. Гайван, В.Т. Перелыгин, В.П. Чупров, А.П. Потапов, В.Г. Судничников // НТВ «Каротажник». – Тверь: Изд-во АИС, 2013. – Вып. 10 (232). – С. 216–223.
- Еремин В.Н., Волканин Ю.М., Тарасов А.В. Аппаратурно-методическое обеспечение электромагнитного каротажа в процессе бурения // НТВ «Каротажник». – Тверь: Изд-во АИС, 2013. – Вып. 4 (226). – С. 62–69.
- Исследование влияния положения и размера технологической каверны на показания импульсного нейтронного каротажа в обсаженной газовой скважине / И.В. Бабкин, А.Н. Малев, А.П. Тимошенко, А.А. Семьяков // НТВ «Каротажник». – Тверь: Изд-во АИС, 2012. – Вып. 11 (221). – С. 189–195.
- Комплекс устьевого оборудования для геофизических исследований и работ в действующих газовых и нефтяных скважинах / В.Ю. Хатьков, С.А. Венско, А.Я. Апанин, Б.М. Кочергинский, М.Л. Михин // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд-во АИС, 2014. Вып. 1 (235). С. 95–106.
- Бурдо Г.Б., Стрельников Ю.А., Болотов А.Н. Изучение трения в узлах геофизических приборов при исследовании скважин // НТВ «Каротажник». – Тверь: Изд-во АИС, 2013. – Вып. 10 (232). – С. 216–223.
- РД 153-39.0-072-01. Техническая инструкция по проведению геофизических исследований и работ приборами на кабеле в нефтяных и газовых скважинах. Введ. 01.07.2001. – М.: Минэнерго России, 2001. – 271 с.
- Мазуров В.М., Фам Ван Нгуен. Модальные регуляторы для промышленных объектов с запаздыванием // Автоматизация в промышленности. – 2006. – № 11. – С. 19–22.
- Martin J., Nyoman Wahyu Satiawan I. A simple multi-level space vector modulation algorithm for five-phase open-end winding drives. Mathematics and Computers in Simulation. - 2013, April. - V. 90. - P. 74-85.
- Open-loop neuro-fuzzy speed estimator applied to vector and scalar induction motor drives / F. Lima, W. Kaiser, I. Nunes da Silva, Azauri A.A. de Oliveira Jr. // Applied Soft Computing. – 2014, August. – V. 21. – P. 469–480.
- Reza C.M.F.S., Didarul Islam Md., Saad Mekhile A review of reliable and energy efficient direct torque controlled induction motor drives // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014, September. – V. 37. – P. 919–932.
- Коротков М.Ф., Пахомов А.Н., Федоренко А.А. Модальное управление асинхронным электроприводом // Известия Том-

- 2. Установлено, что суммарный момент инерции электропривода, приведенный к валу двигателя, незначительно изменяется как от числа слоев каротажного грузонесущего кабеля на барабане, так и от плотности бурового раствора. Полученные результаты позволяют применять стандартные ПИ-регуляторы скорости асинхронных электроприводов с векторным управлением без ухудшения качества регулирования скорости и момента при любой глубине геофизического исследования скважин.
- 3. При исследовании систем векторного управления необходимо учитывать особенности широтно-импульсного регулирования напряжения преобразователя частоты, что позволяет получить более достоверные результаты имитационного моделирования и ускорить процесс настройки электроприводов.

ского политехнического университета. - 2014. - Т. 324. - № 4. - С. 69-75.

- A new natural gamma radiation measurement system for marine sediment and rock analysis / M.A. Vasiliev, P. Blum, G. Chubarian, R. Olsen, C. Bennight, T. Cobine, D. Fackler, M. Hastedt, D. Houpt, Z. Mateo, Y.B. Vasilieva // Journal of Applied Geophysics. - 2011, November. - V. 75. - Iss. 3. - P. 455-463.
- Orlowska-Kowalska T., Tarchala G., Dybkowski M. Sliding-mode direct torque control and sliding-mode observer with a magnetizing reactance estimator for the field-weakening of the induction motor drive // Mathematics and Computers in Simulation. – 2014, April. – V. 98. – P. 31–45.
- 14. Improved stator winding fault tolerance architecture for vector control of induction motor: Theory and experiment / Gouichiche Abdelmadjid, Boucherit Seghir Mohamed, Tadjine Mohamed, Safa Ahmed, Messlem Youcef // Electric Power Systems Ressearch. – 2013, November. – V. 104. – P. 129–137.
- Vaez-Zadeh S., Jalali E. Combined vector control and direct torque control method for high performance induction motor drives // Energy Conversion and Management. - 2007, December. -V. 48. - Iss. 12. - P. 3095-3101.
- A review of direct torque control of induction motors for sustainable reliability and energy efficient drives / Sutikno Tole, Rumzi Nik, Idris Nik, Jidin Auzani // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2014, April. - V. 32. - P. 548-558.
- Arun Dominic, Thanga Raj Chelliah. AnalHsis of field-oriented controlled induction motor drives under sensor faults and an overview of sensorless schemes // ISA Transactions. - 2014, September. - V. 53. - Iss. 5. - P. 1680-1694.
- Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным // Матер. Междунар. науч.-техн. конф. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – С. 269–272.
- Боловин Е.В., Глазырин А.С. Идентификация параметров асинхронных электродвигателей с неподвижным короткозамкнутым ротором на основе разностных схем // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 321. – № 5. – С. 101–108.
- Глазырин А.С., Боловин Е.В. Метод идентификации параметров асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором на основе разностных схем // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 8 (79). С. 178–185.

Поступила 05.11.2014 г.

UDC 62-83-523:550.832.07

# ELECTRIC DRIVE OF ELEVATORS FOR BOREHOLE GEOPHYSICAL SURVEY COMPLEX

# Aleksandr Yu. Chernishev,

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: ach@tpu.ru

# Sergey A. Zhurikov,

ASU-EXSPERT, 51/1, Krasnoarmeyskaya street, Tomsk, 634061, Russia. E-mail: GurikovSA @asu-expert.ru

# Igor A. Chernishev,

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: chia@tpu.ru

**Relevance of the research** is caused by the necessity of developing an elevator induction motor electric drive for borehole geophysical survey complexes.

The main aim of the study is to develop and research the frequency converter – induction motor systems, which take into account operation features and changes in the load parameters of elevators for borehole geophysical survey complexes.

Methods of research are based on application of automatic control theory and simulation in Matlab Simulink.

**The results.** The authors have developed the technique of load calculation while lifting geophysical device in dry boreholes and boreholes filled with fluid or drilling mud. This allows determining more precisely the elevator electric drive capacity. Transient processes at starting and braking of electric drive and when geophysical device weld tool is in a borehole, are calculated. The authors developed and studied induction motor electric drives of geophysical elevator with speed vector control. The theoretical investigations are confirmed experimentally when developing the elevators of borehole geophysical research units.

**Conclusions.** In boreholes with liquid the traction force at geophysical device lifting should be calculated taking into account fluid displacement by the device and wireline carrying cable. The total moment of inertia back to the motor shaft of electric drive of wireline elevator varies slightly both at cable weight redistribution from a drum to the well and at drilling mud density. It allows the use of standard PI speed controllers in induction motor drive systems with vector control without quality deterioration of speed and torque control at any depth of boreholes. When studying vector control systems it is important to consider the PWM voltage regulation of frequency converter, that allows obtaining more reliable results of imitating modelling and speeding up the electric drive setting.

### Key words:

Geophysical exploration of boreholes, static loads of winch hoists, induction motor drive, vector control, pulse-width modulation.

### REFERENCES

- Makhamadiev R.S., Gayvan A.G., Perelygin V.T., Chuprov V.P., Potapov A.P., Sudnichnikov V.G. Modul induktsionnogo karotazha dlya telesistemy s elektromagnitnym kanalom svyazi [An induction logging module for telecommunication system with an electromagnetic communication channel]. Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Karotazhnik – Scientific-technical herald Karotazhnik, 2013, vol. 221, no. 11, pp. 216–223.
- Eremin V.N., Volkanin Yu. M., Tarasov A.V. Apparatno-metodicheskoe obespechenie elektromagnitnogo karatazha v protsesse bureniya [Tool-and-method support for electromagnetic logging while drilling]. Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Karotagnik – Scientific-technical herald Karotagnik, 2013, vol. 226, no. 4, pp. 62–69.
- Babkin I.V., Malev A.N., Timoshenko A.P. Semyakov A.A. Issledovanie vliyaniya polozheniya i razmera tekhnologicheskoy kaverny na pokozaniya impulsnogo neytronnogo karotazha v obsazhennoy gazovoy skvazhine [Investigation on the effect of technological cavern position and size on pulse neutron log readings in the cased gas well]. Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Karotagnik – Scientific-technical herald Karotagnik, 2012, vol. 221, no. 11, pp. 189–195.
- Khatkov V.Yu., Vensko S.A., Apanin A.Yu., Kocherginsky B.M., Mikin M.L. Kompleks ustevogo oborudovaniya dlya geofizicheskikh issledovaniy i rabot v deystvuyushchikh gazovykh i neftyanykh skvazhinakh [Wellhead equipment set for well-logging and operations in producing oil and gas wells]. Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Karotagnik – Scientific-technical herald Karotagnik, 2014, vol. 235, no. 1, pp. 95–106.

- Burdo G.B., Strelnikov Yu.A., Bolotov A.N. Izuchenie treniya v uzlakh geofizicheskikh priborov pri issledovanii skvazhin [Investigation on friction in assemblies of geophysical tools in well logging]. Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Karotagnik – Scientifictechnical herald Karotagnik, 2011, vol. 207, no. 9, pp. 84–89.
- RD 153-39.0-072-01. Tekhnicheskaya instruktsiya po provedeniyu geofizicheskikh issledovaniy i rabot priborami na kabele v neftyanykh i gazovykh skvazhinakh [Technical Instructions for geophysical research and work by cable device in oil and gas boreholes]. Introduced 01.07.2001. Moscow, Ministry of energetic of Russia, 2001. 271 p.
- Mazurov V.M., Fam Van Nguen. Modalnye regulyatory dlya promyshlennykh obektov s zapazdyvaniem [Modal controllers for industrial facilities with delay]. Avtomatizatsiya v promyshlennosti, 2006, no. 11, pp. 19–22.
- Martin J., Nyoman Wahyu Satiawan I. A simple multi-level space vector modulation algorithm for five-phase open-end winding drives. *Mathematics and Computers in Simulation*, April 2013, vol. 90, pp. 74-85.
- Lima F., Kaiser W., Nunes da Silva I., Azauri A.A. de Oliveira Jr. Open-loop neuro-fuzzy speed estimator applied to vector and scalar induction motor drives. *Applied Soft Computing*, August 2014, vol. 21, pp. 469–480.
- Reza C.M.F.S., Didarul Islam Md., Saad Mekhile. A review of reliable and energy efficient direct torque controlled induction motor drives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, September 2014, vol. 37, pp. 919–932.
- 11. Korotkov M.F., Pakhomov A.N., Fedorenko A.A. Modalnoe upravlenie asinkhronnym elektroprivodom [Modal control of

asynchronous electric drive]. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2014. vol. 324, no. 4, pp. 69–75.

- Vasiliev M.A., Blum P., Chubarian G., Olsen R., Bennight C., Cobine T., Fackler D., Hastedt M., Houpt D., Mateo Z., Vasilieva Y.B. A new natural gamma radiation measurement system for marine sediment and rock analysis. *Journal of Applied Geophy*marine sediment and rock analysis. *Journal of Applied Geophy*marine sediment and rock analysis. *Journal of Applied Geophy-*
- sics, November 2011, vol. 75, Iss. 3, pp. 455–463.
- Orlowska-Kowalska T., Tarchala G., Dybkowski M. Sliding-mode direct torque control and sliding-mode observer with a magnetizing reactance estimator for the field-weakening of the induction motor drive. *Mathematics and Computers in Simulation*, April 2014, vol. 98, pp. 31–45.
- 14. Gouichiche Abdelmadjid, Boucherit Seghir Mohamed, Tadjine Mohamed, Safa Ahmed, Messlem Youcef. An improved stator winding fault tolerance architecture for vector control of induction motor: Theory and experiment. *Electric Power Systems Research*, November 2013, vol. 104, pp. 129–137.
- Vaez-Zadeh S., Jalali E. Combined vector control and direct torque control method for high performance induction motor drives. *Energy Conversion and Management*, December 2007, vol. 48, Iss. 12, pp. 3095-3101.
- Sutikno Tole, Rumzi Nik, Idris Nik, Jidin Auzani. A review of direct torque control of induction motors for sustainable reliability and energy efficient drives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, April 2014, vol. 32, pp. 548–558

- Arun Dominic, Thanga Raj Chelliah. Analysis of field-oriented controlled induction motor drives under sensor faults and an overview of sensorless schemes. *ISA Transactions*, September 2014, vol. 53, Iss. 5, pp. 1680–1694.
- Chernishev A.Yu., Chernishev I.A. Opredelenie parametrov skhemy zameshcheniya asinkhronnogo dvigatelya po katalozhnym dannym [Determination of induction motor drive parameters according to the catalo]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchnotekhnicheskoy konferentsii* [Proc. of the International scientific conference]. Tomsk, Tomsk Polytechnic UniversityPubl. house, 2007. pp. 269–272.
- Bolovin E. V., Glazyrin A. S. Identifikatsiya parametrov asinkhronnykh elektrodvigateley s nepodvizhnym korotkozamknutym rotorom na osnove raznostnykh skhem [Induction motor with squirrel cage rotor drives parameters identification using finite difference method]. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2013. vol. 321, no. 5, pp. 101–108.
- 20. Glazyrin A.S., Bolovin E.V. Metod identifikatsii parametrov asinkhronnykh elektrodvigateley s korotkozamknutym rotorom na osnove raznostnykh skhem [Method of induction motor with squirrel cage rotor drives parameters identification based on finite difference method]. Bulletin of the Irkutsk Technical University, 2013, no. 8 (79), pp. 178–185.

Received: 05 November 2014.

УДК 002.52:681.3.016

# ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ОПЕРАТОРА ПРИ УПРАВЛЕНИИ ОБЪЕКТОМ ЭНЕРГЕТИКИ

# Павлов Владимир Иванович,

д-р техн. наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», Россия, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106. E-mail: vpavl@mail.ru

### Аксенова Татьяна Викторовна,

аспирант кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», Россия, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106. E-mail: belova tatyana@bk.ru

# Аксенов Виктор Владимирович,

канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», Россия, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106. E-mail: avaks 68@bk.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения «помехоустойчивости» и «пропускной способности» человека – оператора – при управлении объектами энергетики в случаях возникновения неопределенности, а также в условиях дефицита времени.

**Цель исследования** заключается в повышении надежности функционирования автоматизированных объектов энергетики за счёт применения информационной системы поддержки операторской деятельности.

**Методы исследования:** методы системного анализа, математического моделирования сложных систем, компьютерного моделирования; теория Марковских процессов; теория систем со случайно изменяющейся структурой.

**Результаты**. Разработан подход к информационной поддержке операторской деятельности, сущность которого заключается в возможности использования эвристических способностей оператора для корректировки баз данных, моделей и знаний в системе информационной поддержки при возникновении неопределенности. При этом подсказки системы информационной поддержки при принятии того или иного решения актуальны, т. к. осуществляются в реальном масштабе времени. Модернизированный алгоритм функционирования системы информационной поддержки, основанный на байесовском подходе, обеспечивает дополнительное распознавание причины возникновения неопределенности за счёт регистрации сопутствующих признаков и учёта этой информации при определении текущей ситуаций. Проведено исследование быстродействия алгоритма распознавания системы информационной поддержки операторае разработана структурная схема системы информационной поддержки операторской деятельности, в которой на функциональном уровне учтена возможность получения оператором необходимой подсказки о текущей ситуационной обстановке, соответствии изменений фазовых координат объектов их моделям, появлении скрытых закономерностей в измерениях, а также реализована возможность коррекции базы данных, базы моделей и базы знаний системы поддержки принятия решений.

#### Ключевые слова:

Операторская деятельность, неопределенность, модель состояния объекта, модель измерения, коррекция информационной системы.

### Состояние вопроса

При управлении объектами энергетики широко используются автоматизированные системы, в которых реализована информационная поддержка операторской деятельности в виде экспертных систем [1–3]. Наибольшее распространение получили системы информационной поддержки (СИП), в которых поступление входной информации организовано автоматически по каналам связи с объектом управления (системой контроля) [4–8]. Применяются также СИП смешанного типа, в которых часть информации, как правило, параметрическая, поступает автоматически, а непараметрическая информация вводится вручную оператором [9–11]. Статистика свидетельствует, что в области автома тизированного управления объектами энергетики на «человеческий фактор» приходится более 50 % всех случаев нарушений, инцидентов и аварий [12-15]. Это обусловлено недостаточной «пропускной способностью» и «помехоустойчивостью» человека-оператора. Наиболее сложными при работе операторов являются ситуации, в которых возникают неопределенности в показаниях приборов и измерителей, противоречия в показаниях, выход индицируемых показаний за пределы допустимых значений. Требуется дальнейшая разработка методов и совершенствование систем информационной поддержки операторов для повышения эффективности и, в том числе, безопасности автоматизированного управления объектами энергетики.

### Постановка задачи

В [16] операторская деятельность рассмотрена на примере телеуправления объектом с известной моделью изменения фазовых координат:

$$\mathbf{Y}_{k} = \mathbf{A}_{k-1}\mathbf{Y}_{k-1} + \mathbf{B}_{k-1}\mathbf{U}_{k-1} + \mathbf{F}_{k-1}\boldsymbol{\xi}_{k-1}, \qquad (1)$$

где **Y**,  $\boldsymbol{\xi}$  – векторы размерности *n* фазовых координат объекта и случайных составляющих (шумов состояния) соответственно; **U** – вектор размерности  $\geq n$  управлений объектом; **A**, **B**, **F** – матрицы состояния, управления и шумов соответственно; *k* – текущий момент времени. Составляющими вектора **Y** являются все контролируемые фазовые координаты объекта, составляющими вектора **U** являются те фазовые координаты, по которым осуществляется управление.

Измерения фазовых координат объекта осуществляются в соответствии с моделью:

$$\mathbf{Z}_{k} = \mathbf{C}_{k}(\boldsymbol{\mu}_{k},\boldsymbol{\gamma}_{k})\mathbf{Y}_{k} + \mathbf{N}_{k}, \qquad k = \overline{\mathbf{I},K}, \qquad (2)$$

где **Z**, **N** – векторы размерности  $\geq n$  выходных сигналов и шумов измерителей; **С**( $\mu_k, \gamma_k$ ) – матрица дискриминационных характеристик измерителей фазовых координат;  $\mu$ ,  $\gamma$  – программа измерений, задаваемая оператором:  $\mu$  – назначаемый измеритель,  $\gamma$  – интервал измерений; K – длина серии измерений. Результаты измерений передаются по каналу передачи данных (проводному, беспроводному) для визуализации на средствах отображения информации оператора.

Несоответствие данных о функционировании управляемого объекта энергетики его штатной модели возникает по независящим от оператора причинам: 1) неблагоприятные факторы внешней среды, старение и износ аппаратуры, неадекватная реакция объекта на команды управления; 2) искажения при передаче данных по каналу из-за воздействия естественных и искусственных помех. В [16] указаны причины неадекватности измерений (2) и приведены соответствующие модели при неравноточных измерениях, случайных пропаданиях сигнала, ложных измерениях. Приведен фрагмент структурной схемы системы информационной поддержки операторской деятельности в условиях неопределенности, реализующей разрабатываемый подход повышения пропускной способности и помехоустойчивости человека-оператора. Сущность разрабатываемого подхода заключается в формировании с единых позиций концептуальной модели (КМ) управления объектом в сознании оператора, а также моделей изменения фазовых координат и управляющих воздействий объектом, применяемых в СИП. При этом при возникновении неопределенностей в течение сеанса управления объектом предлагается параллельно с машиной вывода и машиной объяснения в СИП использовать эвристические способности оператора для коррекции определенной части базы данных, а именно базы моделей в случаях, когда оператору удается оперативно найти приемлемый для практики способ разрешения возникшей неопределенности.

Цель статьи – повышение надежности функционирования автоматизированных объектов энергетики путем повышения помехоустойчивости и пропускной способности операторов.

### Основная часть

Оператор в процессе функционирования непрерывно корректирует КМ ситуационной обстановки по мере изменений, отображаемых на информационном поле. Информационное поле может содержать неопределенности, явно проявляющиеся в скачкообразном изменении параметров сигналов. Кроме того, возможно появление скрытых неопределенностей, выражающихся в несоответствии изменений компонентов вектора фазовых координат объекта их действующим моделям. Учет данных особенностей, интуитивно понятных оператору, в [16] предложено осуществлять путем формального введения в модель состояния объекта и модель измерения аддитивных составляющих. Модели приобретают вид:

$$\mathbf{Y}_{k} = \mathbf{A}_{k-1} \mathbf{Y}_{k-1} + \mathbf{B}_{k-1} \mathbf{U}_{k-1} + \mathbf{F}_{k-1} \boldsymbol{\xi}_{k-1} + \mathbf{g}_{k-1} , \qquad (3)$$

$$\mathbf{Z}_{k} = \mathbf{C}_{k}(\boldsymbol{\mu}_{k},\boldsymbol{\gamma}_{k})\mathbf{Y}_{k} + \mathbf{N}_{k} + \mathbf{Z}_{\Pi k}, \qquad k = 1, K, \quad (4)$$

где  $\mathbf{g}_{Y}, \mathbf{Z}_{\Pi}$  – смещения в векторе фазовых координат и измерения, приводящие к неопределенности. Остальные обозначения как в (1) и (2).

Для обеспечения согласованного функционирования оператора и СИП, а также для предоставления возможности оператору корректировать определенную часть базы данных СИП алгоритмическое обеспечение должно строиться с учетом моделей (3) и (4). Ситуационная обстановка при управлении объектом разбивается экспертами на множество ситуаций S, составляющих полную группу несовместных событий. В данное множество включаются ситуации штатного функционирования, а также ситуации сбоев и отказов из-за неравноточных измерений, случайных пропаданий сигналов, ложных измерений в различных сочетаниях. Алгоритм распознавания ситуаций, основанный на байесовском подходе [17, 18] и реализуемый в СИП, в результате модернизации [19] приобретает вид:

$$\widehat{p}_{k}^{(s)}(\mathbf{Y}) =$$

$$= \frac{p^{(s)}(\mathbf{Y})q \exp[-0.5\Delta t \varphi_{k}^{(s)}(\mathbf{Y}, \mathbf{Z}, \mathbf{U})]}{\sum_{s=1}^{s} \int_{-\infty}^{\infty} p^{(s)}(\mathbf{Y})q \exp[-0.5\Delta t \varphi_{k}^{(s)}(\mathbf{Y}, \mathbf{Z}, \mathbf{U}]d\mathbf{Y}}, \quad (5)$$

$$\varphi_{k}^{(s)}(\mathbf{Y}, \mathbf{Z}, \mathbf{U}) =$$

$$= \sum_{l, m=1}^{n} \frac{\overline{\mathcal{Q}}_{lq}^{(s)}}{|\mathbf{Q}^{(s)}|} \left( \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{k} - C_{lk}^{(s)}(\mu_{k}, \gamma_{k})\mathbf{Y}_{k} \end{bmatrix} \times \\ \times [\mathbf{Z}_{k} - C_{mk}^{(s)}(\mu_{k}, \gamma_{k})\mathbf{Y}_{k}] \end{bmatrix} \right), \quad (6)$$

где  $\Delta t = t_k - t_{k-1}$ , s = 1, S – номер текущей ситуации, определяемый по критерию  $s = \arg \max[p_k^{(s)}(\mathbf{Y})];$ l, m – индексы соответствующих составляющих фазовых координат объекта;  $\overline{Q}_{lm}$  – алгебраическое дополнение элемента  $Q_{lm}$  в определителе  $|\mathbf{Q}|$  матри-



**Рисунок.** Схема информационной поддержки операторской деятельности в условиях неопределенности (вариант). АСУ – автоматическая система управления; БК – блок коммутации

Figure. Diagram of information support of an operator activity in uncertainty (variant). ACУ is the automated control system; БК is the switching block
цы шумов измерителя; *q* – коэффициент, назначаемый экспертом в случае инструментальной регистрации признака, сопутствующего возникновению неопределенной ситуации (неравноточного измерения, случайного пропадания сигнала, ложного измерения). Возможность такой регистрации возникает, если часть штатных измерителей фазовых координат объекта или специально разработанные измерители использовать в виде [20]:

$$q = q_m(P_r, k | s_k, y_{mk}, k), P_r = \overline{1,0}, s = \overline{1,S},$$
 (7)

где  $P_r=1$  соответствует инструментальной регистрации признака неопределенности по m-й фазовой координате объекта.

Фрагмент структурной схемы СИП операторской деятельности в условиях неопределенности с возможностью корректировки системы поддержки принятия решений (СППР) показан на рисунке. При разработке схемы учтено то, что при взаимодействии оператора и СППР на функциональном уровне должна быть возможность получения необходимой подсказки о: текущей ситуационной обстановке; соответствии изменений фазовых координат объектов их моделям; появлении скрытых закономерностей в измерениях; возможности коррекции базы данных, базы моделей, базы знаний СППР.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кунаев М.А. Оперативная диагностика энергетических установок // Атомная стратегия XXI век. – 2010. – № 3. – С. 14–16.
- Применение экспертной системы для оптимального управления технологическими процессами / С.В. Артемова, Д.Ю. Муромцев, С.Б. Ушанев, Н.Г. Чернышов // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 1997. – № 1. – С. 12–16.
- Калинушкин А.Е., Митин В.И., Семченков Ю.М. Создание экспертных систем для ядерной энергетики // Атомная техника за рубежом. – 1990. – Т. 7. – С. 3–12.
- Грунтович Н.В., Бубнов Е.А., Бондарев Д.И. Создание автоматизированных систем информационной поддержки оператора на основе систем централизованного контроля судовой энергоустановки // Судостроение. – 1993. – № 1. – С. 24–25.
- Владимиров В.А., Поршнев С.В., Фридман И.С. Анализ технологической информации для выявления предвестников аварийных остановок газоперекачивающих агрегатов // Датчики и системы. – 2003. – № 12. – С. 40–44.
- Мохорт И.А., Семикин В.Ю. Развитие информационно-управляющей системы газотранспортного предприятия. Опытная эксплуатация // Нефтяное хозяйство. 2007. № 5. С. 112–114.
- Комплекс информационной поддержки оператора ВВР-ц. Опыт создания первой версии / И.Н. Козиев, О.Ю. Кочнов, Е.С. Старизный, Ю.В. Волков // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2000. – № 2. – С. 30–39.
- Система информационной поддержки оператора группового щита управления неблочной электростанции / А.Ш. Лейзерович, Д.И. Бухны, Ю.А. Радин и др. // Электрические станции. – 1994. – № 7. – С. 27–31.
- Дьяков А.Ф. Надежная работа персонала в энергетике. М.: Изд-во МЭИ, 1991. – 224 с.
- Анохин А.Н., Острейковский В.А. Вопросы эргономики в ядерной энергетике. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 344 с.

#### Выводы

В представленном варианте поддержки операторской деятельности учтена возможность как автоматического, так и автоматизированного управления объектом энергетики.

Разработанный вариант автоматизированной коррекции информационных подсистем (измерителей фазовых координат) объекта путем изменения  $\mu$ и у в (4) предполагает использование оператором при формировании корректирующих воздействий подсказки со стороны СППР. При этом оператор также использует интуицию и опыт эксплуатации объекта при коррекции КМ в соответствии с (3), (4) и частично (7). Оператор в случае необходимости корректирует определенную часть баз данных, моделей и знаний СППР. Очевидно, что корректировка СППР и выдача ею подсказки при принятии того или иного решения должны осуществляться в реальном масштабе времени, то есть подсказка должна быть актуальной. Исследование быстродействия алгоритма распознавания ситуаций (5), (6) для различных сочетаний возможных неопределенностей показало, что время, затрачиваемое на определение изменившейся ситуации с вероятностью  $p_{k}^{(s)}(\mathbf{Y})$  не менее 0,95, не превышает одной секунды.

Статья подготовлена при поддержке РФФИ, грант № 12-08-00352-а.

- Development of an expert system for estimating fault section in control center based on protective system simulation / T. Kimura, S. Nishimatsu, Y. Ueki, Y. Fukuyama // IEEE Trans. on Power Delivery. - 1992. - V. 7. - № 1. - P. 167-172.
- Thompson N., Goffman M. Electric experience with online generator monitoring and diagnostics // Proceeding of the American Power Conference. – 1988. – № 50. – P. 468–471.
- Zinser K., Welsang C. Knowledge-based systems in distributed control // Modern Power Systems. – 1990. – V. 1. – P. 63–67.
- Костин А.Н. Голиков Ю.Я. Психология автоматизации управления техникой. – М.: Изд-во Ин-та психологии РАН, 1996. – 160 с.
- 15. Обеспечение комплексной адекватности тренажеров для электроэнергетики – основа безаварийной работы оперативного персонала / И.Ш. Загретдинов, С.И. Магид, С.В. Мищеряков, Л.В. Сысоева, Е.Н. Архипова. – М.: АПАРТ, 2003. URL: http://www.testenergo.ru/article1.htm (дата обращения: 29.07.2014).
- Павлов В.И., Аксенова Т.В., Аксенов В.В. Повышение надежности функционирования объектов энергетики, управляемых оператором // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 323. № 4. С. 91–94.
- Муромцев Д.Ю., Орлова Л.П., Козлов А.И. Принятие решений с использованием байесовского подхода и экспертных оценок // Вестник Тамбовского ГТУ. – 2003. – Т. 9. – № 1. – С. 15–24.
- Савчук В.П. Байесовские методы статистического оценивания. Надежность технических объектов. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 328 с.
- Павлов В.И., Аксенов В.В., Белова Т.В. Оптимизация функционирования измерительных систем // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 4. – С. 104–106.
- Павлов В.И. Скорейшее обнаружение изменения свойств случайных процессов с использованием сопутствующих признаков // Радиотехника. 2009. № 2. С.15–19.

Поступила 04.08.2014 г.

UDC 002.52:681.3.016

# EFFICIENCY OF INFORMATION SUPPORT OF OPERATOR WHEN CONTROLLING POWER ENGINEERING FACILITIES

## Vladimir I. Pavlov,

Dr. Sc., Tambov State Technical University, 106, Sovetskaya Street, Tambov, 392000, Russia. E-mail: vpavl@mail.ru

#### Tatyana V. Aksenova,

Tambov State Technical University, 106, Sovetskaya Street, Tambov, 392000, Russia. E-mail: belova\_tatyana@bk.ru

#### Victor V. Aksenov,

Cand. Sc., Tambov State Technical University, 106, Sovetskaya Street, Tambov, 392000, Russia. E-mail: avaks 68@bk.ru

The relevance of the discussed issue is caused by the need of increasing «noise stability» and «capacity» of a person – an operator – when controlling power engineering facilities in cases of uncertainty, as well as at time deficiency.

**The main aim of the study** consists in increasing reliability of functioning of automated engineering facilities operation, applying the information system of operator activity support.

**The methods of the study:** methods of systems analysis, mathematical modeling of complex systems, computer modeling, theory of Markov processes, theory of systems with accidental changing structure.

**The results.** The authors have developed the approach to information support of operator activity which essence consists in possibility of using heuristic abilities of an operator to correct databases, models and knowledge in the information support system at uncertainty. The hints in the information support system when making this or that decision are relevant as they are given in real time. The modernized algorithm of the information support system operation, based on the Bayesian approach, provides additional recognition of the reason of uncertainty occurrence by recording accompanying signs and accounting of this information when determining current situations. The authors studied the speed of the situation recognition algorithm and developed the block diagram of the operator activity information support system. In the diagram the authors took into account at functional level the possibility of receiving the required hint on the current situation, correspondence of changes of the objects phase coordinates to their models, occurrence of the hidden regularities in measurements. The possibility of correcting database, base of models and base of knowledge of decision-making system support is implemented in the research.

#### Key words:

Activity, uncertainty, object state model, measurement model, correction of the information system.

The paper was supported by RFBR, grant no. 12-08-00352-a.

#### REFERENCES

- Kunaev M.A. Operativnaya diagnostika energeticheskikh ustanovok [Operational diagnostics of power plants]. Atomnaya strategiya XXI vek, 2010, no. 3, pp. 14–16.
- Artemova S.V., Muromtsev D.Yu., Ushanev S.B., Chernyshov N.G. Primenenie ekspertnoy sistemy dlya optimalnogo upravleniya tekhnologicheskimi protsessami [Use of expert system for optimum control of technological processes]. *Information technologies in design and production (ITDP)*, 1997, no. 1, pp. 12–16.
- Kalinushkin A.E., Mitin V.I., Semchenkov Yu.M. Sozdanie ekspertnykh system dlya yadernoy energetiki [Creation of expert systems for nuclear power]. Atomnya tekhnika za rubezhom, 1990, vol. 7, pp. 3–12.
- 4. Gruntovich N.V., Bubnov E.A., Bondarev D.I. Sozdanie avtomatizirovannykh sistem informatsionnoy podderzhki operatora na osnove sistem tsentralizovannogo kontrolya sudovoy energoustanovki [Creation of the automated systems of operator information support on the basis of the centralized control systems of ship power installation]. Sudostroenie, 1993, no. 1, pp. 24–25.
- Vladimirov V.A., Porshnev S.V., Fridman I.S. Analiz tekhnologicheskoy informatsii dlya vyyavleniya predvestnikov avariynykh ostanovok gazoperekachivayushchikh agregatov [The analysis of technological information to identify the harbingers of emergency stops of gas-distributing units]. Sensors and Systems, 2003, no. 12, pp. 40–44.

- 6. Mokhort I.A., Semikin V.Yu. Razvitie informatsionno-upravlyayushchey sistemy gazotranspotnogo predpriyatiya. Opytnaya ekspluatatsiya [Development of management-information system of gas transmission company. Trial operation]. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2007, no. 5, pp. 112–114.
- Koziev I.N., Kochnov O.Yu., Starizny E.S., Volkov Yu.V. Kompleks informatsionnoy podderzhki operatora VVR-ts. Opyt sozdaniya pervoy versii [Complex of information support of the operator of VVR-ch. Experience of developing the first version]. *Nuclear Power. Proceedings of the universities*, 2000, no. 2, pp. 30-39.
- Leyzerovich A.Sh., Bukhny D.I., Radin Yu.A. Sistema informatsionnoy podderzhki operatora gruppovogo shchita upravleniya neblochnoy elektrostantsii [The information support system for the operator of a group control panel of not block power plant]. *Elektricheskie stantsii*, 1994, no. 7, pp. 27–31.
- Dyakov A.F. Nadezhnaya rabota personala v energetike [Staff reliable work in power industry]. Moscow, MYI Publ., 1991. 224 p.
- Anokhin A.N., Ostreykovskiy V.A. Voprosy ergonomiki v yadernoy energetike [Ergonomics issues in nuclear power engineering]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2001. 344 p.
- Kimura T., Nishimatsu S., Ueki Y., Fukuyama Y. Development of an expert system for estimating fault section in control center based on protective system simulation. *IEEE Trans. on Power Deli*very, 1992, vol. 7, no. 1, pp. 167–172.

- Thompson N., Goffman M. Electric experience with online generator monitoring and diagnostics. *Proceeding of the American Power Conference*, 1988, no. 50, pp. 468-471.
- Zinser K., Welsang C. Knowledge-based systems in distributed control. Modern Power Systems, 1990, vol. 1, pp. 63-67.
- Kostin A.N., Golikov Yu.Ya. Psikhologiya avtomatizatsii upravleniya tekhnikoy [Psychology of equipment automation management]. Moscow, Institute of psychology RAN Press, 1996. 160 p.
- 15. Zagretdinov I.Sh., Magid S.I., Mishcheryakov S.V., Sysoeva L.V., Arkhipova E.N. Obespechenie kompleksnoy adekvatnosti trenazherov dlya elektroenergetiki – osnova bezavariynoy raboty operativnogo personala [Ensuring complex adequacy of exercise machines for power industry is a base of staff trouble-free operation]. Moscow, APART, 2003. Available at: http://www.testenergo.ru/article1.htm (accessed 29 July 2014).
- Pavlov V.I., Aksenova T.V., Aksenov V.V. Povyshenie nadezhnosti funktsyonirovaniya obektov energetiki, upravlyaemykh operatorom [Increase of reliability of operator-controlled power object functioning]. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2013, vol. 323, no. 4, pp. 91–94.

- Muromtsev D.Yu., Orlova L.P., Kozlov A.I., Prinyatie resheniy s ispolzovaniem bayesovskogo podkhoda i ekspertnykh otsenok [Decision making using the Bayes approach and expert estimations]. *Transactions of the TSTU*, 2013, vol. 9, no. 1, pp. 15–24.
- Savchuk V.P. Bayesovskie metody statisticheskogo otsenivaniya. Nadezhnost tekhnicheskith obektov [Bayesian methods of statistical estimation. Reliability of technical objects]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 328 p.
- Pavlov V.I., Aksenov V.V., Belova T.V. Optimizatsiya funktsyonirovaniya izmeritelnykh system [Optimization of measuring systems functioning]. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2010, vol. 317, no. 4, pp. 104-106.
- Pavlov V.I. Skoreyshee obnaruzhenie izmeneniya svoystv sluchaynykh protsessov s ispolzovaniem soputstvuyushchikh priznakov [The prompt detection of change in random processe properties by accompanying]. *Radioengineering*, 2009, no. 2, pp. 15–19.

Received: 04 August 2014.

УДК 621.311

## К ВОПРОСУ МОНИТОРИНГА КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

## Волошко Анатолий Васильевич,

канд. техн. наук, доцент кафедры электроснабжения Института энергосбережения и энергоменеджмента Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт», Украина, 03056, г. Киев, ул. Борщаговская, 115. E-mail: a-voloshko@yandex.ua

#### Харчук Андрей Леонидович,

аспирант кафедры электроснабжения Института энергосбережения и энергоменеджмента Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт», Украина, 03056, г. Киев, ул. Борщаговская, 115. E-mail: Elselogin@yahoo.com

Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения экономической эффективности и режимной безопасности функционирования электрических сетей путем улучшения качества электрической энергии. Одним из направлений решения данного вопроса является развитие существующих и разработка новых методов и средств проведения мониторинга показателей качества электрической энергии, что позволяет повысить эффективность использования энергоресурсов.

**Цель исследования:** разработка методов повышения эффективности проведения мониторинга показателей качества электрической энергии в электроэнергетических системах путём увеличения скорости и точности его проведения, а также усовершенствования анализа полученной информации.

**Методы исследований:** использование системного анализа, методов математического анализа, вейвлет-преобразования, преобразования Фурье, преобразования Гилберта, распределения Вигнера, преобразования Уолша для проведения анализа кривых напряжения с использованием программных пакетов MatLab, Simulink, компьютерного моделирования, проведение пороговой фильтрации кривых напряжения в случае наличия в кривых напряжения шумов и избыточных информационных сигналов, экспериментальные исследования.

**Результаты**. Разработан метод проведения мониторинга показателей качества электрической энергии путем контроля вейвлеткоэффициентов разложения кривой напряжения. Данный метод основан на том, что любые нарушения системы, в том числе и нарушение показателей качества электрической энергии, приводят к изменениям детализирующих вейвлет-коэффициентов разложения кривой напряжения на разных уровнях декомпозиции. Использование данного метода позволяет проводить мониторинг одновременно нескольких показателей качества электрической энергии в режиме реального времени, а также проводить своевременные мероприятия по обеспечению качества электроэнергии – в отличие от существующих на сегодня систем мониторинга, которые проводят контроль показателей качества электрической энергии путем обработки и анализа ранее зафиксированной информации.

#### Ключевые слова:

Качество электрической энергии, мониторинг, преобразование Фурье, вейвлет-преобразование, идентификация отклонений показателей качества электрической энергии.

#### Актуальность работы

Обеспечение качества электрической энергии является одним из направлений повышения эффективности функционирования как всего энергетического комплекса страны, так и отдельных его энергетических систем.

Показатели и нормы качества электрической энергии установлены государственным стандартом ГОСТ Р 54149–2010. Нормы качества электроэнергии являются уровнями электромагнитной совместимости для кондуктивных электромагнитных помех в системах электроснабжения общего назначения. Основные показатели качества электроэнергии (ПКЭ): отклонение, колебание, синусоидальность, симметрия, провал, импульс напряжения и перенапряжение.

На сегодняшний день в Украине показатели качества электрической энергии почти не контролируются [1]. Электропередающие организации при выдаче технических условий на подключение потребителей электроэнергии и при заключении договоров о поставках электроэнергии не включают в них требования по показателям качества электроэнергии, не определяют условия осуществления контроля ПКЭ. Если контроль и проводится, то только формальный, без применения каких-либо мер по приведению показателей качества электрической энергии к уровню, определенному Государственным стандартом.

Это приводит к необоснованным экономическим потерям многих потребителей электроэнергии, что является следствием снижения эффективности использования промышленного и бытового электрооборудования, выхода его из строя.

При этом снижается надежность электроснабжения за счет ложных срабатываний устройств релейной защиты и автоматики, становится невозможным использование батарей конденсаторов и синхронных компенсаторов. Недоучет электроэнергии, обусловленный погрешностями счетчиков не в пользу электропередающих организаций, составляет до 4-5~%, а согласно проведенным исследованиям в реальных сетях погрешность измерения по отдельным счетчикам может составлять 20 % и более. По экспертным оценкам, прогнозируемый ущерб от снижения качества электрической энергии в целом по Украине составляет около 10 млрд грн. ежегодно и постоянно увеличивается.

К таким проблемам привело отсутствие нормативно-правовых и нормативно-технических актов, регламентирующих процедуру определения виновников ухудшения качества электрической энергии, определение объема такой энергии, порядок применения штрафных санкций и взаимной ответственности субъектов электроэнергетики и потребителей и т. п. [2].

При этом разработка мероприятий по обеспечению качества электроэнергии возможна только после оценки фактического состояния качества электроэнергии во всех узлах электрической сети. Поэтому в основе системы обеспечения качества электрической энергии должна быть система ее мониторинга [3].

Проведение мониторинга позволяет сформировать статистическую базу данных измерений, что в свою очередь позволяет прогнозировать процессы в электрической сети, определять ожидаемые уровни надежности электроснабжения и качества электроэнергии в будущем, планировать необходимые меры по обеспечению надежности электроснабжения и качества электроэнергии.

В настоящее время проведение мониторинга показателей качества электрической энергии происходит путем анализа накопленной статистической информации за определенный период времени. Это происходит потому, что процессы в электросети протекают мгновенно. Они могут быть только зафиксированы, а в дальнейшем может быть проведена их обработка и анализ. То есть показатели качества электрической энергии измеряются не напрямую, а путем обработки статистической информации.

Кроме этого, на сегодняшний день контроль качества электрической энергии носит кратковременный, периодический характер. В основном он выполняется при проведении периодических контрольных и других видов проверок с целью подтверждения соответствия показателей качества электрической энергии требованиям Государственного стандарта и договоров. Результаты таких кратковременных измерений не отражают реального состояния качества электроэнергии.

Кратковременный и периодический характер исследований существенно затрудняет разработку мероприятий, направленных на улучшение качества электроэнергии и повышение показателей надежности электроснабжения, и не позволяет в полной мере обеспечить качество электроэнергии в сети [4].

Для повышения надежности и информативности полученных результатов проведения мониторинга качества электроэнергии, а также для повышения оперативности управления качеством электрической энергии контроль её показателей должен проводиться непрерывно [5]. Создание при этом системы мониторинга качества электрической энергии в режиме реального времени позволит проводить своевременный контроль её показателей и их отклонений и выполнять соответствующие мероприятия по приведению показателей качества электроэнергии в соответствии с требованиями Государственного стандарта.

Однако внедрение систем мониторинга сдерживается рядом методических и технических причин. С технической точки зрения проблема связана с недостатками существующей измерительной техники - средств измерения, а также трансформаторов тока и напряжения. Обработка данных при проведении мониторинга выполняется с применением цифровых методов, базирующихся на стандартном дискретном преобразовании Фурье (ДПФ). При этом для сокращения времени, необходимого для проведения ДПФ, разработан алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ). Передача данных на средства их хранения и обработки выполняется с применением оптоволоконных линий или каналов связи [6]. С методической стороны проблема измерения показателей качества и количества электроэнергии связана с реализацией цифровой обработки и передачи данных в масштабе реального времени.

Алгоритм БПФ занимает почти монопольное положение среди алгоритмов спектрального оценивания, применяемых в стандартных измерительных системах, находящихся в эксплуатации в настоящее время. Однако алгоритмы Фурье имеют несколько источников методических погрешностей, которые приводят к снижению точности результатов гармонического анализа и к их качественному искажению [6].

Главным недостатком алгоритмов Фурье является ограниченность частотного разрешения и недостаточная точность оценки частоты отдельных гармонических компонент. В первом случае - это разрешающая способность разделения двух спектральных составляющих с близкими частотами, а во втором - правильность определения частоты обособленной гармонической компоненты. Для повышения точности проведения БПФ применяется ряд дополнительных математических операций. Так, для исключения эффекта рассеяния выполняется синхронизация частоты дискретизации с частотой исследуемого сигнала, дополнение нулями исходной выборки анализируемого сигнала, либо применяются временные или спектральные окна. Эффективным средством уменьшения спектральных утечек является также применение оконных функций в соответствии с интерполяционным алгоритмом.

Однако эти способы не обеспечивают увеличения частотного разрешения. Применение временных или спектральных окон позволяет уменьшить эффект рассеяния вследствие ухудшения частотного разрешения (в связи с исключением части информации об анализируемой функции), а при дополнении исходной выборки нулями увеличивается избирательность оценивания частот узкополосных спектральных пиков вследствие уменьшения неравномерности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и, соответственно, погрешностей, связанных с ее неравномерностью.

Решение указанной проблемы заключается в совершенствовании математического аппарата для проведения контроля показателей качества электроэнергии и в дальнейшем его программной реализации.

#### Материалы и результаты исследований

Наиболее распространенными в электрических сетях являются гармонические колебания, наглядные, понятные, они легко генерируются и позволяют объяснить большое количество параметров. Поэтому представление электрических сигналов в системе гармонических колебаний (синусов и косинусов) и их анализ (традиционный Фурье или частотный анализ) получили наибольшее распространение [7].

Любой параметр сигнала напряжения может нести полезную информацию о его свойствах. Таким образом, задачей обработки сигнала напряжения и определения показателей качества электрической энергии является выбор этих параметров и оценка их величин.

Преобразование Фурье представляет напряжение электросети в виде суммы гармонических составляющих с коэффициентами долевого участия этих составляющих. При определении гармонических составляющих напряжения с использованием преобразования Фурье проводится декомпозиция сигнала напряжения на комплексные экспоненциальные функции различных частот [8]. Процесс декомпозиции задается двумя выражениями:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-2j\pi f t} dt;$$
(1)

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) e^{-2j\pi f t} df.$$
 (2)

В представленных формулах x(t) – функция сигнала напряжения во времени, а X(t) – спектральное представление сигнала напряжения. При этом выражение (1) называется прямым преобразованием Фурье, а (2) – обратным преобразованием Фурье. Для проведения анализа гармонических колебаний напряжения экспоненциальная часть в выражениях (1) и (2) представляется в виде суммы синусов и косинусов.

То есть при проведении гармонического анализа напряжения электрической сети с использованием преобразования Фурье мы можем определить, присутствуют ли в системе гармонические составляющие и их амплитуды. Однако, поскольку тригонометрические функции определены на временной оси от минус бесконечности до плюс бесконечности, то время появления и период существования в системе высокочастотных составляющих остаются неизвестны. Кроме этого, два разных сигнала напряжения (стационарный и нестационарный) с одинаковыми спектрами высокочастотных компонент дают одинаковое преобразование Фурье.

Пример проведения гармонического анализа сигнала напряжения представлен на рис. 1. На рисунке представлен спектральный анализ сигнала напряжения, в котором кроме напряжения основной частоты (50 Гц) присутствуют высокочастотные компоненты 3 и 5 порядка (150 и 250 Гц соответственно). Из рисунка видно, что при проведении преобразования отсутствует временная информация о сигнале напряжения, т. е. нельзя определить, в какой момент времени в электрической сети появились высокочастотные компоненты, и продолжительность их существования [9].

Таким образом, применение преобразования Фурье для нестационарных сигналов, которым является сигнал напряжения, неэффективно. Преобразование Фурье может применяться для нестационарных сигналов напряжения, если нас интересует только частотная информация, а время существования спектральных составляющих неважно.

Для решения указанных недостатков при определении несинусоидальности напряжения можно использовать оконное преобразование Фурье (ОПФ). Его суть заключается в том, что нестационарный сигнал напряжения можно представить в виде частично-стационарного. При этом сигнал напряжения делится на определенные отрезки («окна») определенной длины T, в рамках которых его можно считать стационарным.



**Рис. 1.** Спектральный анализ напряжения с использованием преобразования Фурье

#### Fig. 1. Spectral analysis of voltage using Fourier transform

Данный метод дает нам не только частотное представление сигнала напряжения, как при преобразовании Фурье, но и определенное временное представление. Однако данный метод также имеет свои недостатки. Проблемы ОПФ имеют свою основу в таком явлении, как принцип неопределенности Гейзенберга. Данный принцип при применении к частотно-временному представлению сигнала напряжения говорит, что нельзя получить произвольно точное частотно-временное представление сигнала, т. е. нельзя определить, для какого момента времени какие спектральные компоненты присутствуют в сигнале напряжения. Единственное, что мы можем знать, так это временные интервалы, в течение которых в сигнале напряжения существуют полосы частот. Эта проблема называется проблемой разрешения.

Проблема ОПФ связана с шириной оконной функции, которая применяется. Эта ширина называется носителем функции. При применении преобразования Фурье временная информация о сигнале напряжения отсутствует. При ОПФ окно имеет конечную длину, накрывает только часть сигнала, поэтому частотное представление ухудшается. Узкое окно обеспечивает лучшее временное представление, а более широко – частотное. Проблема в том, что необходимо выбрать одну ширину окна для всего интервала существования сигнала напряжения, тогда как различные его отрезки могут потребовать применения окон различной длины.

В современной практике для проведения оценки гармонического состава сигналов существует широкое многообразие методов: преобразование Гилберта, распределение Вигнера, преобразования Уолша, вейвлет-преобразования и др. [10].

Большинство привычных методов проведения гармонического анализа напряжения электросети разработаны для постоянных периодических значений напряжения и тока. К сожалению, на практике нагрузки всегда имеют динамический характер, и нарушения показателей качества электроэнергии происходит случайно.

На сегодняшний день все чаще для анализа нестационарных сигналов, в том числе и сигналов напряжения, применяется вейвлет-преобразование [11]. Это преобразование раскладывает первичный сигнал напряжения во времени на отдельные частотные диапазоны, и каждая из этих групп является частью выходного сигнала напряжения.

Проведение вейвлет-преобразования сигнала напряжения по сравнению с преобразованием Фурье позволяет получить не только информацию о гармоническом составе напряжения, но и определить, в какие моменты времени которые гармонические составляющие появляются в сети. Такой подход становится особенно эффективным, когда в системе существуют высокочастотные колебания короткой длины и достаточно широкие низкочастотные колебания. На практике электрические сигналы являются именно такими.

На сегодняшний день вейвлет-преобразование широко применяется для анализа нестационарных сигналов во многих областях науки и техники, в частности в медицине, сейсмологии, для обработки, анализа и кодирования радио- и электрических сигналов, изображений, при исследовании свойств поверхностей кристаллов и нано объектов и т. д. [12].

Весомый вклад в развитие вопроса применения вейвлет-анализа сигналов внесли И. Добеши, С. Малла, А. Гросман, В. Свелденс, А. Луис, В.П. Дьяконов, Н.К. Смоленцев, К. Чуи, А.М. Трахтман, Л.А. Залмазон, И.М. Дремина, А.В. Иванов, В.А. Нечитайло, А. Петров, Е. Бурнаева, В. Грибунин, С.В. Дворников, А.А. Аббакумов, С.В. Карпенко и др.

Аналогично преобразованию Фурье прямое вейвлет-преобразование определяется как сумма по всей длительности сигнала, умноженного на масштабируемые сдвинутые версии вейвлет-функции:

$$WT(\tau, a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int x(t) \psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt,$$
(3)

где  $\tau$  – коэффициент масштаба или параметр расширения; a – параметр сдвига или шаг сдвига;  $\psi(t)$  – функция преобразования, которая называется материнским вейвлетом или базисной функцией.

При этом выражение (3) называется прямое вейвлет-преобразование.

На сегодняшний день существует достаточно широкое разнообразие функций, которые используются в качестве базисных, в частности вейвлеты Морле, Хаара, Добеши [13]. После выбора базисной функции проводятся расчеты, которые начинаются с масштаба s=1 и продолжаются при увеличении величины s, т. е. анализ начинается с более высоких частот и продолжается в сторону низких частот.

Однако полное превращение обычно не требуется, поскольку реальные сигналы напряжения имеют высокочастотные колебания ограниченной полосы частот [14]. В частности, ГОСТ Р 54149–2010 регламентирует проведение оценки гармонических составляющих напряжения электросети до 40-й гармоники. Поэтому число масштабов может быть ограничено.

Вейвлет перемещается в начало сигнала в точку t=0. Базисная функция с масштабом «1» перемножается с сигналом напряжения и интегрируется на всем часовом интервале. Интервал множится на константу  $1/\sqrt{s}$  для нормализации, то есть для того, что бы сигнал напряжения на каждом масштабе имел одинаковую энергию.

Вейвлет масштаба s=1 потом сдвигается вдоль сигнала напряжения на величину  $\tau$  до точки  $t=\tau$ , и процедура повторяется. Получаем еще одно значение, которое отвечает параметрам  $t=\tau$ , s=1.

Указанная процедура повторяется до тех пор, пока вейвлет-преобразование не достигнет конца сигнала напряжения. Таким образом, получаем набор коэффициентов представления для масштаба s=1.

Если в электросети присутствуют гармонические составляющие, которые отвечают поточному значению масштаба *s*, то произведение базового вейвлета на сигнал напряжения в интервале, в котором эта гармоническая составляющая присутствует, дает относительно большое значение. В противном случае – произведение мало или равно нулю. После этого увеличиваем *s* на некоторое значение.

В качестве исследуемого сигнала рассмотрена функция

$$x(t) = \sqrt{2} \left( \frac{220\sin(\omega t - 19,91^{\circ}) + 55\sin(3\omega t - 35^{\circ})}{+30\sin(5\omega t + 110^{\circ}) + 120\sin(7\omega t + 19^{\circ})} \right),$$

имеющая первую, третью, пятую и седьмую гармоники.

Расчет гармонических групп проведен с помощью ДПФ и вейвлет-анализа с различными типами вейвлетов. Результаты вычислений представлены в табл. 1. В качестве вейвлет-функции использованы вейвлеты Добеши, Хаара и Морле. Как видно из табл. 1, результаты определения гармонических групп по алгоритму ДПФ и вейвлет-анализу сопоставимы в случае отсутствия шума и различного рода искажений.

Таблица 1. Результаты проведения гармонического анализа исследуемого сигнала

Частотная	і группа oup		Вейвлет-анализ Wavlet analysis				
полоса, Гц Frequency band, Hz	ническая irmonic gi	ДПФ DFT	Добеши Daubechies		Xaapa	Морле	
	Гармо На		db2	db9	Hddi	ivioriet	
25-75	1	220,001	220,001	220,86	219,05	220,03	
125-175	3	55,006	55,004	55,009	54,98	55,01	
225-275	5	29,61	30,009	30,067	29,48	30,01	
325-375	7	120,006	119,896	120,12	120,16	120,015	
Суммарное значение Total value		258,27	258,267	259,10	257,51	258,35	
Погрешность, % Error, %		0,015	0,016	-0,3	0,309	-0,0155	

**Table 1.** Results of harmonic test for the signal under study

Исследуем результаты определения гармонических групп при наличии искаженного сигнала в электрических сетях. Для этого в электрический сигнал x(t) введем искажения таким образом, что данный шум будет вызывать изменения частотного образа сигнала во всем интервале частот, которые распределяются по всей частотной оси. Следовательно, их обнаружение по спектру становится практически невозможным.

Результаты расчета гармонических групп зашумленного сигнала с помощью ДПФ (без применения оконных функций) и вейвлет-анализа приведены в табл. 2. Сравнивая полученные результаты, видим, что применение пакетного вейвлет-преобразования для гармонического анализа искаженного сигнала в электрических сетях является более предпочтительным по сравнению с ДПФ.

Таблица 2. Результаты проведения гармонического анализа зашумленного сигнала

 Table 2.
 Results of harmonic test for noisy signal

Частотная	і группа roup		Вейвлет-анализ Wavlet analysis				
полоса, Гц Frequency band, Hz	иническая armonic gi	ДПФ DFT	Добе Daube	еши chies	Xaapa Haar	Морле Morlet	
	Гармс На		db2	db9		wonet	
25-75	1	220,9	220,13	221,00	221,65	220,09	
125-175	3	56,08	55,09	56,40	56,48	55,10	
225-275	5	30,61	30,1	30,67	31,45	30,21	
325-375	7	121,1	120,06	121,19	121,36	120,055	
Суммарное значение Total value		259,89	258,48	259,10	260,84	258,35	
Погрешность, % Error, %		-0,612	-0,0658	-0,306	-0,979	-0,058	

С целью дальнейшего развития вопроса применения вейвлет-преобразования для контроля показателей качества электрической энергии авторами статьи на основе анализа частотно-пространственных свойств электрических сигналов была разработана система идентификации нарушений показателей качества электрической энергии путем контроля коэффициентов детализации на различных уровнях вейвлет-преобразования сигнала напряжения.

Для выполнения указанного исследования было проведено компьютерное моделирование процессов в электрической сети в программном комплексе Simulink от Matlab [15]. При проведении моделирования была выполнена имитация отклонений различных показателей качества электрической энергии от нормируемых значений – создана несинусоидальность напряжения, отклонения и колебания напряжения, провал напряжения, импульс напряжения, перенапряжение.

С целью проведения дальнейшего анализа отклонения показателей качества электрической энергии от нормируемых значений была выполнена декомпозиция сигнала напряжения с использованием вейвлет-преобразования [16].

Результаты проведенного анализа в дальнейшем легли в основу разработанной системы идентификации нарушений показателей качества электрической энергии.

Так, было определено, что при появлении в системе колебания напряжения наибольшие значения имеют вейвлет-коэффициенты 3-го уровня разложения (рис. 2). При устойчивом отклонении напряжения от нормируемого значения максимальные значения вейвлет-коэффициентов наблюдаются также на 3-м уровне декомпозиции.



Fig. 2. Voltage fluctuation

Ухудшение синусоидальности напряжения в электросети проявляется на 4-м уровне декомпозиции сигнала напряжения (рис. 3).



Fig. 3. Voltage unsinusoidality

Появление в сети провала напряжения или перенапряжения приводит к увеличению значения вейвлет-коеффициентов на 7-м и 8-м уровнях разложения (рис. 4, 5).



Рис. 4. Провал напряжения

#### Fig. 4. Power failure

При появлении в сети импульса напряжения наибольшие значения вейвлет-коэффициентов наблюдаются на 5-м уровне декомпозиции сигнала напряжения (рис. 6).

В результате проведенной работы были выполнены вейвлет-преобразования смоделированных

сигналов напряжения и показана возможность выявления искажений показателей качества электрической энергии, а также определения начала и конца искажения ПКЭ путем проведения анализа коэффициентов детализации на различных уровнях декомпозиции сигнала напряжения.



Fig. 5. Overvoltage



Рис. 6. Импульс напряжения

#### Fig. 6. Voltage pulse

При этом было обнаружено, что при наличии каких-либо искажений показателей качества электроэнергии происходит мгновенное изменение амплитуды коэффициента детализации первого уровня вейвлет-преобразования с последующим восстановлением её до нулевого уровня. Это дает возможность определять время появления и период существования искажения ПКЭ в сети.

При необходимости определения конкретного показателя качества, который ухудшился, нужно проводить дальнейшее разложение и анализ коэффициентов на других уровнях. Уровень детализации зависит от показателя качества электроэнергии, который ухудшается.

Как видно из проведенных расчетов, наиболее высокий уровень декомпозиции, на котором отображается информация о нарушении ПКЭ, – восьмой уровень. Нет необходимости выполнять декомпозицию на более высоких уровнях.

Кроме того, следует отметить, что на практике реальные сигналы напряжения в электросети, как правило, имеют в своем составе не только полезную информацию, но и остатки некоторых посторонних сигналов – шумы [17]. Поэтому при применении системы идентификации отклонений ПКЭ предлагаем проводить предварительную очистку сигнала напряжения от шума, что является одной из наиболее актуальных задач цифровой обработки сигналов.

Очистка электрического сигнала от шума является типичной задачей предварительной обработки сигнала и подготовки данных к дальнейшей интерпретации – проведение его анализа и исследование свойств. Основной задачей на данном этапе является отсеивание остаточных (шумовых) компонент сигнала, которые не несут в себе полезной информации [18].

Зашумленный сигнал в общем виде можно представить следующим образом:

$$s(n) = f(n) + \sigma e(n), \tag{4}$$

где f(n) – полезный сигнал;  $\sigma$  – уровень шума; e(n) – белый шум – стационарная случайная последовательность, которая имеет постоянный спектр на всех частотах. Целью очистки электрического сигнала от шума есть уменьшение значения шума e(n) и его влияния на сигнал f(n).

При этом выражение (4) представляет общую формулу сигнала.

При проведении вейвлет-анализа сигнала напряжения удаление шума из сигнала выполняют путем обработки коэффициентов детализации, поскольку шумовая компонента, которая имеется в сигнале напряжения, лучше описана в коэффициентах детализации.

Шумовая компонента в сигнале напряжения представляет сигнал, меньший по модулю, чем основной [19]. Поэтому самый простой способ удаления шума из сигнала напряжения – сделать нулевыми значения коэффициентов детализации, которые ниже определенного предельного уровня. Эта процедура называется предельной обработкой коэффициентов.

На сегодняшний день вопрос проведения очистки сигнала от шума широко освещен не только в литературе, но и в современных технических средствах его проведения. В частности, Matlab позволяет при проведении вейвлет-анализа сигналов напряжения дополнительно проводить их очистку от шума [20].

Для этого в утилите Wavelet Toolbox можно выполнить вейвлет-анализ сигналов напряжения, в частности полученных в результате моделирования электрических сетей, или сигналов напряжения, полученных при проведении измерений в реальных электрических сетях.

Пример проведения очистки сигнала напряжения от шума представлен на рис. 7. Сигнал напряжения был получен при проведении измерений показателей качества электрической энергии в электрической сети бытового потребителя с использованием регистратора качества электрической энергии. То есть мощность шумов, информационных сигналов и различных искажений в такой электрической сети минимальна.



**Рис. 7.** Очистка от шума сигнала напряжения электросети бытового потребителя

Очистка на 1 и 2 уровнях детализации вообще не выполнялась, так как значения коэффициентов детализации на этих уровнях достаточно малы. На других уровнях очистка была проведена таким образом, чтобы оставить большую часть детализированной информации для проведения дальнейшего ее анализа.

#### Выводы

Поскольку большую часть времени показатели качества электрической энергии находятся в пределах нормируемых значений, проводить мониторинг ПКЭ мы можем путем контроля значений коэффициентов детализации 1-го уровня декомпозиции сигнала напряжения, которые большую часть времени имеют нулевые значения (с учетом очистки сигнала напряжения от шума). Это позволяет существенно увеличить скорость проведения контроля ПКЭ и уменьшить количество информации, необходимой для дальнейшего хранения.

Кроме этого, применение разработанной системы идентификации нарушений показателей качества электрической энергии при проведении мониторинга ПКЭ позволяет контролировать сразу несколько показателей качества электроэнергии в режиме реального времени. Это вызвано отсутствием необходимости проводить сначала сбор статистической информации, а лишь потом ее обработку и анализ, а также позволяет своевременно применять мероприятия для улучшения качества электрической энергии.

На основании представленной методологии выявления нарушений качества электрической энергии при проведении мониторинга ПКЭ в дальнейшем может быть разработана процедура определения виновников ухудшения качества электрической энергии.

*Fig. 7.* Voltage signal denoising in electrical supply network of a domestic consumer

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Топливно-энергетический комплекс Украины: настоящее и будущее. Проблемные вопросы обеспечения и контроля качества электрической энергии (методологическое обеспечение и приборы измерения параметров качества электроэнергии на современном этапе): матер. Круглого стола IX Междунар. форума. – Киев, 20–22 сентября 2011. – Министерство энергетики и угольной промышленности Украины: Изд-во ГП «Национальная энергетическая компания «Укрэнерго», 2011. – 31 с.
- Праховник А.В., Денисенко Н.А., Волошко А.В., Харчук А.Л. К вопросу измерения и оценки показателей качества электрической энергии // Энергетика и электрификация. – 2012. – № 3. – С. 21–27.
- Гендельман Б., Кричевский М. Обоснование выбора устройств и параметров для мониторинга, контроля и анализа качества электрической энергии в современной энергетике // SATEC LTD. 2012. URL: http://www.satec-global.ru/upload/kachestvo-elektroenergii.pdf (дата обращения: 12.01.2014).
- Кузнецов Н.М., Семенов А.С. Разработка системы мониторинга для измерения показателей качества электроэнергии на горных предприятиях // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 4 (Ч. 2). – С. 295–299.
- Karaarslan I., Iskender A. DSP based power factor correction converter to reduce total harmonic distortion of input current for improvement of power quality // Electrical Engineering. – December 2011. – V. 93. – Iss. 4. – P. 247–257.
- ARM and DSP Based Device for Power Quality Monitoring / Genghuang Yang, Feifei Wang, Shigang Cui, Li Zhao // Advances in Electronic Engineering, Communication and Management. V. 2. Lecture Notes in Electrical Engineering. - 2012. - V. 140. -P. 163-168.
- Волошко А.В. Выполнение гармонического анализа с помощью вейвлет-преобразования // Электронное моделирование. – 2012. – № 4. – С. 65–77.
- Волошко А.В., Харчук А.Л., Вишнявская Ю.С. К вопросу использования кратно-масштабного анализа для формирования базы данных автоматизированной системы коммерческого учета электроэнергии // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2011. № 5 (87). С. 29–39.
- Волошко А.В., Харчук А.Л. К вопросу использования вейвлетпреобразования для определения и оценки показателей качес-

тва электрической энергии // Энергетика: экономика, технологии, экология. – 2013. – № 1 (32). – С. 30–36.

- 10. Kaiser G. A Friendly Guide to Wavelets. 2011. 300 p.
- Wong M.W. Wavelet Transforms and Filter Banks Discrete Fourier Analysis // Pseudo-Differential Operators. 2011. V. 5. P. 61–66.
- К вопросу применения кратно-масштабного анализа для сжатия и восстановления графика электрической нагрузки / А.В. Волошко, Д.О. Іванько, К.Ю. Гура, Д.К. Міщенко // Электроника и связь. 2010. № 4. С. 59–64.
- Asars E., Grab E. Petersons Analysis of wavelet estimation of self-similar traffic parameters in the Simulink model // Automatic Control and Computer Sciences. - 2013. - V. 47. - Iss. 3. -P. 132-138.
- Анохин В., Ланнэ А. MATLAB для DSP. Ч. 1. Моделирование аналого-цифрового преобразования. URL: http://www.chipinfo.ru/literature/chipnews/200002/3.html (дата обращения 26.02.2014).
- 15. Балаков Ю.Н. Значение новых стандартов ГОСТ Р 51317.4.30-2008 (МЕК 61000-4-30) и ГОСТ Р 51317.4.7-2008 (МЕК 61000-4-7:2002) для работ по оценке и мониторингу качества электрической энергии // Энергобезопасность и энергосбережение. - 2009. - № 4. - С. 10-14.
- Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в Mathlab. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 304 с.
- Дремин И.М., Иванов О.В., Нечитайло В.А. Вейвлеты и их использование // Успехи физических наук. 2001. Т. 171. № 5. С. 465–501.
- Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. 1-е изд. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 288 с.
- Georgakaki D., Mitsas C.L., Polatoglou H.N. Spectral Analysis and Allan Variance in the Case of Phase Noise // Journal of concrete and applicable mathematics. – 2011. – V. 9. – № 3. – P. 270–277.
- Damelin S.B., Miller W. (Jr.). The Mathematics of Signal Processing. 2012. URL: http://assets.cambridge.org/97811076/01048/frontmatter/9781107601048\_frontmatter.pdf (дата обращения: 02.03.2014).

Поступила 26.03.2014 г.

UDC 621.311

## ON THE ISSUE OF MONITORING POWER QUALITY

#### Anatoliy V. Voloshko,

Cand. Sc., National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», 115, Borshchagovskaya street, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: a-voloshko@yandex.ua

#### Andrei L. Kharchuk,

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», 115, Borshchagovskaya street, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: Elselogin@yahoo.com

The relevance of the discussed issue is caused by the need to increase economic efficiency and regime security function in electric networks by improving the quality of electrical energy. One of the ways to solve this issue is the development of existing and new methods and tools for monitoring the quality of electric energy, which improves the efficiency of energy use.

The main aim of the study is to develop the methods to increase the effectiveness of monitoring the quality of electric energy in power systems by increasing the speed and accuracy of its implementation, as well as improvements in the analysis of the information received. The methods used in the study: systems analysis, methods of mathematical analysis, wavelet transform, Fourier transform, Hilbert transform, Wigner distribution, Walsh transform to analyze the using the software package MatLab, Simulink, computer simulation, holding threshold filtering voltage curves if there are noise and redundant information signals in voltage curves, experiments.

**The results.** The authors have developed the method for monitoring the quality of electric energy by controlling the wavelet coefficients of voltage curve expansion. This method is based on the fact that any disturbance system, including violation of quality of electrical power, leads to changes in detailing wavelet expansion coefficients of the voltage curve at different decomposition levels. Use of this method allows you to monitor simultaneously several indicators of quality of electric energy in real time, as well as to conduct timely the measures to ensure the quality of electric power – in contrast to the existing monitoring systems that perform analysis of quality of electric energy by processing and analyzing previously recorded information.

#### Key words:

Quality of electrical energy, monitoring, Fourier-transform, wavelet-transform, identification of deviations of electrical energy quality indicators.

#### REFERENCES

- Toplivno-energeticheskiy kompleks Ukrainy: nastoyashchee i budushchee. Problemnyie voprosyi obespecheniya i kontrolya kachestva elektricheskoy energii (metodologicheskoe obespechenie i pribory izmereniya parametrov kachestva elektroenergii na sovremennom etape). Materialy kruglogo stola IX Mezhdunarodnogo foruma «Toplivno-energeticheskiy kompleks Ukrainyi: nastoyaschee i buduschee» [Proc. IX Int. Forum Fuel and Energy Complex of Ukraine: Present and Future]. Kiev, 2011. 31 p.
- Prakhovnik A.V., Denisenko N.A., Voloshko A.V., Kharchuk A.L. K voprosu izmereniya i otsenki pokazateley kachestva elektricheskoy energii [On the issue of measurement and evaluation of quality of electric energy]. *Energetika i elektrifikatsiya*, 2012, no. 3, pp. 21–27.
- Gendelman B., Krichevskiy M. Obosnovanie vybora ustroystv i parametrov dlya monitoringa, kontrolya i analiza kachestva elektricheskoy energii v sovremennoy energetike [Justification of the choice of devices and parameters for monitoring, control and analysis of the quality of electricity in modern power]. SATEC LTD, 2012. Available at: http://www.satec-global.ru/upload/kachestvo-elektroenergii.pdf (accessed 12 January 2014).
- Kuznetsov N.M., Semenov A.S. Razrabotka sistemy monitoringa dlya izmereniya pokazateley kachestva elektroenergii na gornyykh predpriyatiyakh [Development of a monitoring system to measure the quality of electricity in mines]. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2013, no. 4 (P. 2), pp. 295–299.
- Karaarslan I., Iskender A. DSP based power factor correction converter to reduce total harmonic distortion of input current for improvement of power quality. *Electrical Engineering*, December 2011, vol. 93, Iss. 4, pp. 247–257.
- 6. Genghuang Yang, Feifei Wang, Shigang Cui, Li Zhao. ARM and DSP Based Device for Power Quality Monitoring. Advances in Electronic Engineering, Communication and Management.

Vol. 2. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2012, vol. 140, pp. 163–168.

- Voloshko A.V. Vypolnenie garmonycheskogo analiza s pomoshchyu veyvlet-preobrazovaniya [Performing harmonic analysis using wavelet transform]. *Electronic modeling*, 2012, no. 4, pp. 65–77.
- Voloshko A.V., Kharchuk A.L., Vishnyavskaya Yu.S. K voprosu ispolzovaniya kratno-masshtabnogo analiza dlya formirovaniya bazy dannykh avtomatizirovannoy sistemy kommercheskogo ucheta elektroenergii [On the issue of using multiresolution analysis for database automated system for commercial electricity metering]. *Energy saving. Power engineering. Energy audit*, 2011, no. 5 (87), pp. 29–39.
- Voloshko A.V., Kharchuk A.L. K voprosu ispolzovaniya veyvletpreobrazovaniya dlya opredeleniya i otsenki pokazateley kachestva elektricheskoy energii [On the issue of using wavelet transform to identify and assess the quality of electric energy]. *Power engineering: economics, technique, ecology*, 2013, no. 1 (32), pp. 30–36.
- 10. Kaiser G. A Friendly Guide to Wavelets, 2011, 300 p.
- Wong M.W. Wavelet Transforms and Filter Banks Discrete Fourier Analysis. *Pseudo-Differential Operators*, 2011, vol. 5, pp. 61-66.
- Voloshko A.V., Ivanko D.O., Gura K.Yu., Mishchenko D.K. K voprosu primeneniya kratno-masshtabnogo analiza dlya szhatiya i vosstanovleniya grafika elektricheskoy nagruzki [Application of multiresolution analysis for compression and decompression schedule of electric load]. *Electronics and Communications*, 2010, no. 4, pp. 59–64.
- Asars E., Grab E. Petersons Analysis of wavelet estimation of self-similar traffic parameters in the Simulink model. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2013, vol. 47, Iss. 3, pp. 132-138.

- Anokhin V., Lanne A. MATLAB dlya DSP. Chast 1. Modelirovanie analogo-tsifrovogo preobrazovaniya [MATLAB for DSP. P. 1. Modeling of analog-to-digital conversion]. Available at: http://www.chipinfo.ru/literature/chipnews/200002/3.html (accessed 26 February 2014).
- Balakov Yu.N. Znachenie novykh standartov GOST R 51317.4.30-2008 (MEK 61000-4-30) i GOST R 51317.4.7-2008 (MEK 61000-4-7:2002) dlya rabot po otsenke i monitoringu kachestva elektricheskoy energii [The value of new GOST R 51317.4.30-2008 (IEC 61000-4-30) and GOST R 51317.4.7-2008 (IEC 61000-4-7: 2002) for the assessment and monitoring of quality of electric energy]. Energobezopasnost i energosberezhenie, 2009, no. 4, pp. 10-14.
- Smolentsev N.K. Osnovy teorii veyvletov. Veyvlety v Mathlab [Fundamentals of the theory of wavelets. Wavelets in Matlab]. Moscow, DKM Press, 2005. 304 p.

- Dremin I.M., Ivanov O.V., Nechitaylo V.A. Veyvlety i ikh ispolzovanie [Wavelets and their uses]. Advances in Physical Sciences, 2001, vol. 171, no. 5, pp. 465–501.
- Chernykh I.V. Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink [Simulation of electrical devices in Matlab, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow, DMK Press, 2007. 288 p.
- Georgakaki D., Mitsas C.L., Polatoglou H.N. Spectral Analysis and Allan Variance in the Case of Phase Noise. *Journal of concre*te and applicable mathematics, 2011, vol. 9, no. 3, pp. 270–277.
- Damelin S.B., Miller W. (Jr.). The Mathematics of Signal Processing. 2012. Available at: http://assets.cambridge.org/97811076/01048/frontmatter/9781107601048\_frontmatter.pdf (accessed 02 March 2014).

Received: 26 March 2014.

УДК 621.3.013.62;621.314.21;621.314.222.8

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ ДЕЙСТВИИ НА НИХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ СО СТОРОНЫ СЕТИ

## Никонец Алексей Леонидович,

аспирант кафедры «Электрические станции» Национального Университета «Львовская политехника», Украина, 79013, г. Львов, ул. С. Бандеры, 12. E-mail: nykonets@gmail.com

#### Венгер Владимир Петрович,

аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий, городов и сельского хозяйства» Национального Университета «Львовская политехника», Украина, 79013, г. Львов, ул. С. Бандеры, 12. E-mail: vol.venher@gmail.com

## Венгер Виктор Петрович,

аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий, городов и сельского хозяйства» Национального Университета «Львовская политехника», Украина, 79013, г. Львов, ул. С. Бандеры, 12. E-mail: venherviktor@gmail.com

**Актуальность работы.** На данном этапе развития сетей стран СНГ приоритетной является проблема повышения надежности работы трансформаторов, основная часть парка которых давно выработала свой ресурс.

**Цель работы:** сформулировать причины несоответствия используемых наукой методов исследования существу исследуемой проблемы и обосновать возможные направления по усовершенствованию методов исследования.

Методы исследования: частотные методы натурного эксперимента и анализа электрических цепей.

**Результаты.** Причиной несоответствия используемых наукой методов исследования существу проблемы является допущение о возможности раздельного рассмотрения электрического и магнитного полей единого электромагнитного поля. Совместное рассмотрение единого электромагнитного поля показывает, что линия с распределенными параметрами (в качестве которой выступают обмотки и их части) является неоднородной.

**Выводы.** Адекватное отображение реальных физических процессов в обмотках трансформатора в математических моделях невозможно без моделирования как собственных сопротивлений рассеяния обмоток и их частей, так и сопротивлений взаимоиндукции между ними с учетом нарушения в реальных трансформаторах принципа взаимности взаимоиндукции. Разработан метод реализации функций частотных характеристик комплексных сопротивлений, в котором предложено перейти от реализации функции двух независимых переменных  $Z(p)=Z(\omega)=R(\omega)+jX(\omega)$  к реализации двух независимых функций одной переменной  $Z_R(\omega)=R(\omega)$  и  $Z_x(\omega)=X(\omega)$ . Метод исключает необходимость аппроксимации Z(p) как отношения двух полиномов, не имеющих общих корней. Корректное использование методов теории расчета цепей с сосредоточенными параметрами позволяет проводии взаимоиндукции между его продольными элементами. Имеющиеся в мировой технической литературе публикации об электромагнитных процессах в крупных трансформаторах при внутренних резонансах не могут быть признаны как достоверные, если их результаты получены с использование теории расчета электрических цепей с сосредоточенными параметрами без внесения наистромагнитных процессах в крупных трансформаторах при внутренних резонансах не могут быть признаны как достоверные, если их результаты получены с использование теории расчета электрических цепей с сосредоточенными параметрами без внесения наистромагнитных процессах в крупных трансформаторах при внутренних резонансах не могут быть признаны как достоверные, если их результаты получены с использованием теории расчета электрических цепей с сосредоточенными параметрами без внесения необходимых корректие.

#### Ключевые слова:

Трансформатор, резонансные перенапряжения, электромагнитные процессы, продольная изоляция, витковая изоляция.

## Анализ результатов выполненных исследований по изучению явления внутреннего резонанса

Методология любого исследования должна быть адекватна сути проблемы. Предмет нашего исследования – трансформатор – объект с распределенными параметрами, у которого между продольными элементами обмоток и между обмотками разных фаз существует явление взаимоиндукции. По сути исследование электромагнитных процессов в трансформаторе – задача по исследованию параметров электромагнитного поля, существующего в средах с разными электрическими свойствами, на границах которых должны выполняться определенные условия (граничные условия) [1]. Сложность количественного математического описания процессов требовала упрощения первоначальной, подлежащей решению, физической задачи.

Применительно к промышленным трансформаторам упрощение было достигнуто за счет раздельного рассмотрения магнитных и электрических полей, что, как следствие, привело к разработке теории расчета полей рассеяния [2] и методов выбора их изоляции [3–7]. Эти методы не привели к повышению надежности работы трансформаторов, но, до определенного этапа, считались приемлемыми, так как с применением метода проб и ошибок все же давали результат, удовлетворявший практику. Ситуация изменилась, когда возникла практическая необходимость создания сверхмощных трансформаторов на сверхвысокие напряжения, повреждения которых уже не могли быть экономически приемлемыми.

Повреждения трансформаторов на сверхвысокие напряжения (СВН) связывали с резонансом в обмотках, однако такого рода повреждения сравнительно редки. Тем не менее, если другие процессы нельзя было считать причиной повреждения трансформатора, резонанс рассматривался как возможная причина. Резонансные характеристики крупных трансформаторов исследуются с конца 60-х гг. XX столетия. В связи с этим проводились обширные исследования явлений в обмотках трансформаторов при различных конфигурациях энергосистемы и при воздействии определенного вида колебательных перенапряжений. Для изучения этих явлений в начале 70-х гг. была создана рабочая группа IEEE (США), а в 1979 г. – РГ 12–07 СИГРЭ, выпустившая отчет 12–14 [8].

Возрастающее количество повреждений изоляции в трансформаторах в последние годы мотивировало СИГРЭ инициировать (в 2008 г.) новую рабочую группу (A2/C4. 39), чья сфера деятельности включает оценку типов электрических переходных взаимодействий между трансформатором и сетью.

Исследования под эгидой СИГРЭ продолжаются и в настоящее время [9, 10]. Исследован дополнительно один из возможных источников резонансного возбуждения обмоток – быстрые переходные процессы (до нескольких МГц) в элегазовых подстанциях. Последние публикации продолжают наметившуюся тенденцию детального учета геометрического описания конструкции трансформатора. Так как эта информация – собственность производителя, делается вывод о сложности такого анализа. Как альтернативный подход предлагается использовать модели трансформатора в виде «черного (серого) ящика», так как они не требуют информации о геометрии трансформатора и способны воспроизводить поведение трансформатора с высокой степенью точности. Модели в виде «черного ящика» обычно получают с помощью снятия частотных характеристик с последующей аппроксимацией снятых функций. Такие модели могут быть реализованы с помощью программ моделирования электромагнитных переходных процессов [11] через обобщенную электрическую схему или с помощью численного интегрирования уравнений состояния [12, 13].

Подводя итоги обзора выполненных исследований, следует констатировать, что более чем за 50 лет исследований ученым всего мира не удалось сформулировать предложений по корректировке методов изготовления и высоковольтных испытаний продольной изоляции трансформаторов, обеспечивающих надежную эксплуатацию трансформаторов в условиях развития в обмотках резонансных явлений. Единственная причина – несоответствие используемых наукой методов исследования существу исследуемой проблемы. Без понимания физических процессов, которые происходят в обмотках и изоляции трансформатора, невозможно правильно выбрать методы исследования, а следовательно, и разработать рекомендации по повышению надежности работы.

С 2005 г. начинаются исследования внутреннего резонанса на Украине [14]. Предлагаются конкретные способы неразрушающей диагностики предаварийного состояния электрооборудования с обмотками высокого напряжения. На этом этапе изучается классический вариант явления внутреннего резонанса между индуктивностью обмотки трансформатора и емкостью его главной изоляции. Проводятся экспериментальные исследования частотных характеристик трансформатора как носителей обобщенной информации о свойствах различных элементов конструкции, разрабатывается математическая модель трансформатора, с ее помощью изучаются электромагнитные процессы внутри трансформатора при действии на него перенапряжений со стороны сети. Важно отметить, что на этом этапе исследований не возникло никаких неразрешимых проблем методологического характера.

Проблемы начались при изучении параметров электромагнитных процессов в произвольно выбранной конкретной точке обмотки. Суть проблемы состояла в том, что при попытке реализации экспериментальных частотных характеристик в соответствии с известными канонами ТОЭ [15] результаты параметров режима, полученные с помощью синтезированных математических моделей, *не совпадали* с результатами экспериментальных исследований! Это был критический этап исследований. Уже на этом этапе экспериментально был установлен факт неравномерного распределения напряжения 50 Гц вдоль обмотки ВН в режиме короткого замыкания трансформатора [14].

В [16] впервые установлен механизм возникновения перенапряжений между частями обмотки трансформатора – резонанс между напряжениями взаимоиндукции частей обмотки, который обусловлен обменом мощности между частями обмотки по путям замыкания магнитных потоков вне магнитопровода. При появлении любых перенапряжений со стороны сети внутри трансформатора всегда развиваются перенапряжения, которые принципиально будут иметь значения бо́льшие, чем приложенные.

В [17] исследовалось распределение напряжения вдоль обмотки ВН в диапазоне частот 50-100000 Гц и обоснована необходимость использования для учета влияния взаимоиндукции в объекте с распределенными параметрами методами теории цепей наряду с классическими параметрами (элементами) электрический цепи R, L, C дополнительных параметров -R, -L, -C.

В [18] исследованы процессы при действии на обмотку стороннего магнитного потока. Показано впервые, что сторонний магнитный поток способен в отключенной обмотке вызывать резонансные процессы. Задачи исследований – сформулировать причины несоответствия используемых наукой методов исследования существу исследуемой проблемы и обосновать возможные направления по усовершенствованию методов исследования.

#### Изложение основных результатов исследования

Причины несоответствия используемых наукой методов исследования существу проблемы

Для решения поставленной задачи важны не столько факты, установленные в [16-18], сколько причина, по которой эти факты были неизвестны, то есть отдельное рассмотрение магнитного поля без увязки его с электрическим полем в трансформаторе (наличие частичных емкостей между витками, а также между витками и корпусом трансформатора). В результате реальная картина магнитных полей рассеяния в трансформаторе принципиально отличается от картины, которую дает существующая теория [2], что делает линию с распределенными параметрами (в качестве которой выступает обмотка) неоднородной. Причем, как следует из [14], этот эффект проявляется уже на частоте 50 Гц. Из отмеченного следует, что все попытки детального описания конструкции трансформатора и составления на этой основе соответствующей программной реализации, такие, например, как [9, 10, 19, 20], теоретически несостоятельны.

Классическое раздельное рассмотрение влияния магнитных и электрических полей предполагает [19, 20] достаточность при математическом моделировании процессов учета наличия магнитных связей между магнитопроводом и обмотками, падения напряжения на сопротивлениях рассеяния от протекания токов нагрузки, а также однородности цепей с распределенными параметрами. Моделирование процессов в обмотках, результат которого изложен в [16–18] с применением подходов [19, 20], принципиально невозможно.

Таким образом, общепринятое допущение о раздельном учете магнитных и электрических полей для задач рассматриваемого класса оказалось теоретически несостоятельным.

С практической точки зрения следует признать достаточность количественного анализа параметров процессов в ограниченном (пусть и достаточно большом) числе точек внутри объема трансформатора, что должно принципиально упростить научную задачу. Такая постановка задачи предполагает замену отдельных частей объекта с распределенными параметрами конечным числом эквивалентных двухполюсников с сосредоточенными параметрами, характеристики которых определяются частотными методами. Это должно сделать корректным использование методов теории расчета цепей с сосредоточенными параметрами и обеспечить учет взаимного влияния магнитных и электрических полей. Под эквивалентными параметрами двухполюсников мы понимаем такие параметры, которые обеспечивают адекватность параметров электромагнитных процессов реального объекта с распределенными параметрами и модели трансформатора с сосредоточенными параметрами относительно выбранных точек внутри трансформатора. Модель трансформатора следует рассматривать как «черный (серый) ящик».

Принципиально важным отличием свойств части реального объекта с распределенными параметрами от свойств конечного числа двухполюсников с сосредоточенными параметрами, которые эквивалентируют часть реального объекта, является неизменность величин тока каждого двухполюсника, чего нет в части реального объекта, где взаимоиндукция обеспечивается одной из составляющих полного тока. Это обстоятельство обеспечивает необходимость особого обоснования состава элементов двухполюсника для эквивалентирования свойств части реального объекта.

Принципиально мы во время эксперимента можем измерить ток на входе или выходе из обмотки. Общеизвестно, что значение тока внутри обмотки может быть больше тока на выходе за счет появления в обмотке уравнительной составляющей, которая вызывает добавочные потери. Ставя в соответствие току на входе другие параметры режима, которые мы измеряем в разных точках обмотки, получаем требуемые параметры *модели*, а не оригинала.

По сути, речь идет об адаптации теории расчета цепей с сосредоточенными параметрами к решению нового класса задач – исследованию параметров электромагнитных процессов в заданных точках объема объекта с распределенными параметрами при наличии взаимоиндукции между продольными элементами обмотки. Если говорить на языке математики, то вместо поиска общего решения полевой задачи – найти численными методами любое количество частных решений.

## Нарушение принципа взаимности взаимоиндукции в реальных трансформаторах

Решение одной проблемы всегда вызывает появление следующей. Каким образом следует в модели учесть установленные в [16–18] факты? Для ответа на этот вопрос необходимо понимать причины существования описанных в [16–18] явлений.

Из результатов [16–18] можно сделать предположение: если сторонний магнитный поток вызывает в обмотках резонансные процессы, то должно быть обратное влияние резонансных процессов в обмотках, под действием приложенного напряжения, на величину стороннего потока. При рассмотрении взаимного влияния сторонний магнитный поток более правильно назвать общим для двух разных обмоток потоком, или потоком взаимоиндукции. Подтверждение либо опровержение выдвинутой выше гипотезы поможет более четкому пониманию физики процесса, а следовательно, и математическому анализу количественной его стороны.



Рис. 1. Зависимость сопротивлений взаимоиндукции Х<sub>Мосн.ч.обм.вн</sub> и Х<sub>мнн</sub>, которые определяют величины дополнительных э.д.с., вносимых соответственно в контуры обмотки низкого напряжения (НН) и основной части обмотки высокого напряжения (ВН), от частоты источника питания

**Fig. 1.** Dependence of mutual induction resistance  $X_{M \text{ och. 4. of.M. BH}}$ and  $X_{M \text{ HH}}$ , which determine the value of additional e.m.f. introduced into low voltage winding circuit and the major part of the high voltage winding, on supply frequency



- Рис. 2. Зависимость сопротивлений взаимоиндукции Х<sub>Мосн.ч.обм.вн</sub> и Х<sub>мрег.ч.вн</sub>, которые определяют величины дополнительных э.д.с., вносимых соответственно в контуры основной и регулировочной части обмотки ВН, от частоты источника питания
- **Fig. 2.** Dependence of mutual induction resistance  $X_{M \text{ oct. 4. of M. BH}}$ and  $X_{M \text{ per. 4. BH}}$ , which determine the value of additional e.m.f. introduced into the circuits of high voltage winding major and control parts, on supply frequency

На рис. 1–3 представлены соответственно частотные характеристики сопротивлений взаимоиндукции между основной частью обмотки ВН и обмоткой НН ( $X_{M \text{ осн. ч. обм. ВН}}$  и  $X_{M \text{ нн}}$ ), между основной и регулировочной частями обмотки ВН ( $X_{M \text{ осн. ч. обм. ВН}}$ и  $X_{M \text{ рег. ч. ВН}}$ ), а также между регулировочной частью обмотки ВН и обмоткой НН ( $X_{M \text{ рег. ч. обм. ВН}}$  и  $X_{M \text{ HH}}$ ). Индекс в обозначении сопротивления  $X_{M}$  указывает название обмотки, на которую было подано напряжение источника в момент измерения напряжения на другой обмотке. Измерения проводились для фазы А трехфазного трансформатора мощностью 20 кВА, который и ранее использовался для экспериментальных исследований [16–18]. Методика измерения частотных характеристик описана в [14, 16, 17].



- Рис. 3. Зависимость сопротивлений взаимоиндукции Х<sub>Мрег.ч.обм.вн</sub> и Х<sub>мнн</sub>, которые определяют величины дополнительных э.д.с., вносимых соответственно в контуры обмотки НН и регулировочной части обмотки ВН, от частоты источника питания
- **Fig. 3.** Dependence of mutual induction resistance  $X_{M \text{ per. 4. 6}M, BH}$ and  $X_{M \text{ HH}}$ , which determine the value of additional e.m.f. introduced into the circuits of low voltage winding and control part of high voltage winding, on supply frequency

Сопротивления взаимоиндукции определялись в соответствии с рекомендациями ТОЭ [15] как отношение измеренного на обмотке напряжения к току другой обмотки, которая является источником магнитного потока. Мы, конечно, понимаем, что при частотах больше 50 Гц ток, который создает магнитный поток, отличается от тока, который был измерен, но с позиций рассмотрения трансформатора в качестве «черного ящика» считаем такой подход оправданным.

Как следует из рис. 1, 2, сопротивления взаимоиндукции не равны между собой, что нарушает основополагающий принцип взаимности взаимоиндукции, декларируемый ТОЭ [15]. Для опытов, результаты которых представлены на рис. 3, нарушения принципа взаимности не произошло. Для количественной оценки степени нарушения принципа взаимности на рис. 1, 2 построены графики разности сопротивлений взаимоиндукции, определенных разными способами. Эти зависимости впервые количественно демонстрируют возможную погрешность расчетов при использовании существующей теории цепей без ее адаптации к решению нового класса задач по исследованию электромагнитных процессов в объектах с распределенными параметрами при наличии взаимоиндуктивности между витками обмоток. Полученный экспериментальный результат заслуживает серьезного анализа.

3-U 17000 Fy 2.5 <u>3500 Гц</u> 2,15 32000 Fy 50000 Fu, 1,52 U(Осн.часть обмотки ВН) 1.5 85000 Fu 1500 Fu 30000 Fi UHH 70000 Fu 0.5 000 Гц. 0,46 19000 *Ги* 15000 T 1 1000 10000

Рис. 4. Частотные характеристики напряжений взаимоиндукции обмотки низкого напряжения U<sub>•нн</sub> и основной части обмотки BH U<sub>•осн.ч.ВН</sub> в относительных номинальных единицах

**Fig. 4.** Frequency curves of mutual induction voltage in low voltage winding U<sub>+HH</sub> and the main part of high voltage winding U<sub>+OCH,VBH</sub> in relative nominal units



**Рис. 5.** Частотные характеристики напряжений взаимоиндукции основной части обмотки высокого напряжения U-<sub>осн.ч.ВН</sub> и регулировочной части обмотки BH U-<sub>рег.ч.ВН</sub> в относительных номинальных единицах

**Fig. 5.** Frequency curves of mutual induction voltage in the main part of high voltage winding U<sub>voltvBH</sub> and control part of high voltage winding in relative nominal units



**Рис. 6.** Частотные характеристики напряжений взаимоиндукции регулировочной части обмотки высокого напряжения U-<sub>рег.ч.Вн</sub> и обмотки НН U-<sub>нн</sub> в относительных номинальных единицах

**Fig. 6.** Frequency curves of mutual induction voltage in control part of high voltage winding U<sub>\*per\_x,BH</sub> and low voltage winding U<sub>\*HH</sub> in relative nominal units

Чтобы понять причины нарушения принципа взаимности взаимоиндукции, напомним, что степень индуктивной связи двух катушек характеризуется коэффициентом связи K, определяемым как среднее геометрическое из отношений потока взаимной индукции M ко всему потоку катушки, то есть

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}},\tag{1}$$

где  $L_1$ ,  $L_2$  – индуктивности катушек.

Коэффициент связи К (1) всегда меньше единицы и возрастает с уменьшением потоков рассеяния катушек. Чтобы  $M_{12} \neq M_{21}$ , необходимо изменение по какой-либо причине значений  $L_1$  и  $L_2$ . Это возможно, если рассматривать L<sub>1</sub> и L<sub>2</sub> как эквивалентные величины, характеризующие процессы в реальных обмотках при частотах >50 Гц. Наглядное представление о взаимном влиянии магнитных потоков обмоток и общего потока взаимоиндукции дают результаты опытов по измерению напряжений взаимоиндукции (рис. 4-6). Магнитный поток, генерируемый током в обмотке НН, начиная с частоты в несколько сотен Гц, наводит в основной части обмотки ВН (рис. 4) напряжение больше номинального, которое при частоте 3500 Гц достигает значения 2,15. При частотах больше 3500 Гц в обмотке НН начинают развиваться собственные резонансные процессы. Эквивалентная индуктивность L обмотки НН начинает расти, что приводит (1) к уменьшению потока взаимной индукции М, который при частотах больше 15000 Гц становится практически равным нулю.

Если подать напряжение на основную часть обмотки ВН, то ток, протекающий по обмотке ВН, создаст поток, который в обмотке НН наводит (рис. 4) напряжение взаимоиндукции  $U_{\rm H}$ . При увеличении частоты более 3000 Гц в основной части обмотки ВН начинают развиваться резонансные процессы, которые приводят к уменьшению потока взаимоиндукции. На частоте 15000 Гц его величина составляет лишь 0,46 от номинального значения. В диапазоне частот 15-17 кГц в основной части обмотки ВН наступает резонанс напряжений взаимоиндукции частей обмотки ВН [16]. Поскольку в процессе развития резонансных процессов фазы напряжений на участках обмотки изменяются на противоположные, а в диапазоне частот 15-19 кГц сумма модулей этих напряжений превышает модуль приложенного к обмотке напряжения, увеличиваются не только магнитные потоки частей обмотки, но и магнитный поток между обмотками, что отразилось на кратности перенапряжений обмотки НН, которая на частоте 17 кГц достигла значения 2,46. Резонанс напряжений под действием внешнего магнитного потока наступает также и в обмотке НН. При дальнейшем увеличении частоты вплоть до 100 кГц в обмотке НН резонансные процессы продолжаются, достигая своего максимума на частоте 50 кГц.

В диапазоне частот 15–100 кГц возникает парадоксальная ситуация, когда магнитные потоки, создаваемые токами в обмотке НН, не достигают обмотки ВН, а потоки, создаваемые токами в обмотке ВН, достигают обмотку НН и вызывают в ней резонансные процессы.

Аналогичные процессы возникают также при магнитном взаимодействии между регулировочной и основной частями обмотки ВН (рис. 5). Принципиальным отличием в этом случае можно считать лишь другие резонансные частоты и кратности перенапряжений, которые возросли по сравнению с рис. 4 примерно в два раза.

Особая ситуация возникает при исследовании магнитного взаимодействия между регулировочной частью обмотки ВН и обмоткой НН (рис. 6). Из-за практического совпадения резонансных частот этих обмоток с ростом частоты наблюдается взаимное пропорциональное уменьшение роли магнитного взаимодействия между обмотками, что обеспечило в этом случае выполнение принципа взаимности взаимоиндукции (рис. 3).

Рассмотренные явления взаимного магнитного влияния разных обмоток и их частей характерны для всех без исключения типов оборудования с обмотками высокого напряжения. С практической точки зрения важно уметь определить возможные опасные резонансные частоты или их диапазоны, а также максимальные кратности перенапряжений на этих частотах. Для ответа на эти вопросы необходимо сравнить частотные характеристики собственных и взаимных сопротивлений разных обмоток или их частей с частотами, на которых возникают опасные перенапряжения. На рис. 7–9 представлены частотные характеристики собственных и взаимных сопротивлений, соответственно, между основной частью обмотки ВН и обмоткой НН, между основной и регулировочной частями обмотки ВН, между регулировочной частью обмотки ВН и обмоткой НН.



**Рис. 7.** Частотные характеристики собственных и взаимных сопротивлений основной части обмотки ВН Ż<sub>осн.ч.обм.ВН</sub>, Х<sub>М осн.ч.обм.ВН</sub> и обмотки НН

**Fig. 7.** Frequency curves of internal and mutual resistances of the main part of BH winding  $\dot{Z}_{\text{och-N-OGM-BH}}$ ,  $X_{\text{M och-N-OGM-BH}}$  and HH winding  $\dot{Z}_{\text{HH}}$ ,  $X_{\text{M HH}}$ 





**Fig. 8.** Frequency curves of internal and mutual resistances of the main part of BH winding  $\dot{Z}_{\text{octN-d6M,BH}}$ ,  $X_{M \text{ octN-d6M,BH}}$  and control part of BH winding  $\ddot{Z}_{\text{per-N-d6M,BH}}$ ,  $X_{M \text{ per-N-d6M,BH}}$ 

В общем случае кратность перенапряжений на какой-либо обмотке или ее части должна зависеть от величины магнитного потока, который пересекает эту обмотку, а также от характера резонансных процессов в самой обмотке. Величина внешнего, по отношению к обмотке, потока на заданной частоте зависит от значения сопротивления на данной частоте той обмотки, которая генерирует магнитный поток. Степень близости обмотки, в которой развиваются резонансные процессы, к резонансу характеризуют частотные характеристики сопротивления взаимоиндукции между обмотками, а также собственного сопротивления.



Рис. 9. Частотные характеристики собственных и взаимных сопротивлений регулировочной части обмотки ВН Ż<sub>регчобм.ВН</sub>, Х<sub>Мрегчобм.ВН</sub> и обмотки НН Ż<sub>нн</sub>, Х<sub>МНН</sub>

**Fig. 9.** Frequency curves of internal and mutual resistances of the control part of BH winding  $\dot{Z}_{per:M:OGM,BH}$ ,  $X_{M:per:M:OGM,BH}$  and HH winding  $\dot{Z}_{HH}$ ,  $X_{M:HH}$ 

Как видно из сравнения данных рис. 4 и 7, первый максимум перенапряжений на основной части обмотки ВН развился на частоте 1500 Гц, что соответствует резонансу напряжений как характеристики Z<sub>n</sub>, так и характеристики Z<sub>осп.ч.ВН</sub>. При этом характеристика X<sub>M НН</sub> также проходит через свой локальный минимум. Второй максимум перенапряжений на частоте 3,5 кГц с кратностью 2,2 практически совпадает с частотой резонанса напряжений характеристики Z<sub>n</sub> – 3,7 кГц.

Первый максимум перенапряжений на обмотке НН при частоте 17 кГц соответствует частоте резонанса напряжений частей обмотки ВН, а также частоте резонанса токов характеристик  $X_{M \text{ осн. ч. BH}}$  и  $Z_{\text{ в.}}$ . Далее в диапазоне 20–100 кГц идет серия перенапряжений меньшей кратности, пики которых соответствуют частичным максимумам характеристики  $X_{M \text{ осн. ч. BH}}$ .

Для пары «регулировочная и основная части» обмотки ВН (рис. 5 и 8) перенапряжения в основной части обмотки ВН с кратностью около 5 наступают при частоте 5 кГц, что соответствует абсолютному минимуму характеристики  $Z_{\text{per. 4. BH}}$ .

Для регулировочной части обмотки ВН перенапряжения с высокими кратностями на частотах 15,5; 20; 45; 65 кГц соответствуют частотным максимумам характеристики  $X_{M \text{ осн. ч. BH}}$  и частотным минимумам характеристики  $Z_{\text{осн. ч. BH}}$ .

#### Метод определения сопротивления обмоток и их частей

Условием, полностью гарантирующим адекватность модели, является как можно более точное воспроизведение экспериментальных частотных характеристик. Если о характере частотных характеристик собственных сопротивлений обмоток и их частей возможны дискуссии, то частотные характеристики сопротивлений взаимоиндукции по определению являются на всех частотах *чисто индуктивными*. Классическая теория цепей не в состоянии предложить аппарат для описания и реализации представленных в статье частотных характеристик сопротивлений взаимоиндукции.

Частотные характеристики элементов изоляции трансформатора отражают свойства проводимости и поляризации изоляции. Их экспериментальное определение и последующая математическая реализация [14] не вызывают принципиальных затруднений. Методика экспериментального определения параметров частотных характеристик для синтеза активных и реактивных составляющих сопротивлений моделей обмоток и их частей значительно сложнее. Требуется разработка эффективных методов их определения [9].

Схема замещения участка обмотки трансформатора представлена на рис. 10. Здесь  $\dot{I}_i$  – вектор тока участка обмотки;  $\Delta \dot{E}_i$  – вектор напряжения, наведенного на витках участка обмотки основным магнитным потоком магнитопровода;  $\dot{Z}_i$  – вектор сопротивления участка обмотки;  $\Delta \dot{U}_i$  – вектор падения напряжения на сопротивлении участка обмотки;  $\dot{U}_i$  – вектор напряжения на участке обмотки. Из рис. 10 следует:

$$\dot{Z}_i = \frac{\dot{U}_i - \Delta \dot{E}_i}{\dot{I}_i},\tag{2}$$



- **Рис. 10.** Схема замещения модели участка обмотки трансформатора
- *Fig. 10.* Equivalent circuit of the model of the transformer winding part

Как следует из (2), для определения комплексного сопротивления участка обмотки необходимо знать не только модули величин, но и фазы векторов уравнения (2).

Схема экспериментального определения значений сопротивления модели обмоток и их частей трехфазного трансформатора представлена на рис. 11.



**Рис. 11.** Схема экспериментального определения значений сопротивления модели обмоток и их частей трехфазного трансформатора

Fig. 11. The circuit of experimental determination of the values for a winding model resistance and their parts of the three-phase transformer

В качестве нагрузки обмотки HH используется конденсатор с емкостью C. Изменяя частоту источника питания  $e_A$ , добиваемся наступления режима резонанса напряжения для фазы A трансформатора. Измеряем с помощью миллиамперметра pA значение тока  $I_i$ , которое принимаем одинаковым с током всей обмотки. По условию резонанса трансформатор потребляет от источника питания только активную мощность. Следовательно, фаза тока  $I_i$  совпадает с фазой источника питания.

С помощью вольтметра  $pV_3$  измеряем значение напряжения на выбранном участке обмотки ВН (фаза A), а с помощью вольтметров  $pV_4$  и  $pV_5$  измеряем значения напряжения между выводами выбранного участка обмотки и корпусом. Фазу источника  $e_A$  принимаем совпадающей с осью действительных чисел. Тогда фазы напряжений, измеряемых приборами  $pV_3$  и  $pV_4$ , можно определить из построения треугольника напряжений в соответствии со вторым законом Кирхгофа.

Особо следует остановиться на методе определения модуля вектора  $\Delta \dot{E}_i$ . Поскольку обмотки фаз А и В находятся очень близко друг к другу в окне магнитопровода, и между ними существует магнитная связь по путям замыкания потоков вне магнитопровода, то на обмотках фазы В трансформатора будет наводиться напряжение не только изза замыкания магнитного потока в магнитопроводе фазы А через стержни магнитопровода фаз В и С, но также из-за наличия взаимоиндукции по путям замыкания потока вне магнитопровода. Это затрудняет определение вектора  $\Delta E_i$ . Поэтому было принято решение [18] закоротить обмотку НН фазы В, как наиболее близко расположенную к стержню магнитопровода фазы В. В этом случае модуль полного вектора  $\Delta \vec{E}$  можно определить, измеряя с помощью вольтметра  $pV_2$  напряжение на обмотке BH (фаза C), с учетом того, что  $\Delta \dot{E}_{A} = -\Delta E_{C}$ , а его часть  $\Delta E_i$  пересчитать через отношение витков *i*-го участка и всей обмотки. Так как трансформатор (фаза A) работает в режиме резонанса напряжений и его токи при заданной величине напряжения источника питания максимальны, обратным влиянием через магнитные связи по путям замыкания потока вне магнитопровода закороченной обмотки HH (фаза B) можно пренебречь.

Осталась последняя проблема – определение фазы вектора  $\Delta \dot{E}_i$ . Если с помощью вольтметра  $pV_6$  измерить значение напряжения между выводами A и C обмотки BH, то фазы напряжений, измеряемых приборами  $pV_5$ ,  $pV_6$  и  $pV_2$ , можно определить из построения треугольника напряжений.

Полная мощность, передаваемая из первичной обмотки трансформатора во вторичную обмотку:

 $\dot{S}_{\text{THH}} = \Delta \dot{E} I_A = \Delta E I_A \cos \varphi_{\Delta E} + j \Delta E \sin \varphi_{\Delta E} I_A = P_{\text{THH}} + j Q_{\text{THH}}$ , (3) где  $\Delta E$  – значение напряжения, измеряемое вольтметром  $pV_2$ .

Реактивная мощность, генерируемая конденсатором C, расходуется на компенсацию потерь реактивной мощности для создания магнитного потока в магнитопроводе, способного генерировать ЭДС  $\Delta E$ , а также в обмотках трансформатора. Для определения потерь реактивной мощности в магнитопроводе трансформатора проводится отдельно опыт работы трансформатора в режиме холостого хода. Для его реализации конденсатор емкостью Cотключается от обмотки НН. Ток холостого хода измеряется амперметром pA при напряжении источника питания  $e_A$ , достаточном для получения ЭДС  $\Delta E$ , а реактивная мощность холостого хода определяется из уравнения:

$$Q_{xx} = E_{Axx} I_{Axx} \,. \tag{4}$$

Реактивная мощность, расходуемая в обмотках трансформатора  $Q_{\text{обм}\Sigma}$ , определяется из уравнения:

$$Q_{\text{обм}} \Sigma = \frac{U_{\text{АНН}}^2}{X_G} - Q_{xx}.$$
 (5)

Теперь, зная величины  $Q_{\text{THH}}$  и  $Q_{\text{обм}\Sigma}$ , необходимо определить значения реактивной мощности, расходуемые в каждой из обмоток:

$$Q_{\rm HH} = Q_{\rm odms} \pm Q_{\rm THH}, \ Q_{\rm BH} = Q_{\rm odms} \mp Q_{\rm THH}.$$
(6)

Далее определяются значения  $X_{\rm HH}$  и  $X_{\rm BH}$  по значениям  $Q_{\rm HH}$  и  $Q_{\rm BH}$  и величине тока  $I_A$ . Полученные значения  $X_{\rm HH}$  и  $X_{\rm BH}$  могут быть использованы в качестве критерия для проверки полученных значений реактивной составляющей полного сопротивления  $\dot{Z}_i$  в соответствии с (2).

Значение *r*<sub>нн</sub> определяется из уравнения:

$$r_{\rm HH} = \frac{P_{\rm HH}}{I_A^2 k_T^2},\tag{7}$$

где  $k_T$  – коэффициент трансформации трансформатора.

Важно, что, измеряя величину активной составляющей полной мощности  $\dot{S}_{T}$  для разных частот, можно получить уникальную зависимость изменения потерь активной мощности в обмотках трансформатора от частоты. По нашим данным, таких измерений ранее никогда не проводилось, а нужда в такой информации огромна, так как позволяет учесть влияние высших гармоник в токе нагрузки.

Следует также указать, что в связи с отличием формы частотных характеристик сопротивления обмоток трансформатора и конденсатора при одном значении емкости *C* возможен резонанс на нескольких частотах. Полученные значения  $\dot{Z}_i$ , а также  $\dot{Z}_1$  относятся к случаю, когда нагрузочный ток протекает по обеим обмоткам трансформатора, то есть с учетом наличия взаимоиндукции между обмотками ВН и НН по путям замыкания магнитных потоков вне магнитопровода. Для случая, когда одна из обмоток отключена,  $\dot{Z}_i$ , а также  $\dot{Z}_{\rm HH}$  будут отличаться от полученных в соответствии с описанным методом.

Метод адаптации теории цепей к решению нового класса задач

ТОЭ [15] утверждает, что синтезом электрических цепей называют определение структуры электрических цепей и значений параметров входящих в них элементов по заданным частотным или временным свойствам цепей. Каким бы образом ни были заданы характеристики двухполюсника, четырехполюсника и т.п., они должны удовлетворять условию физической реализуемости. ТОЭ и раньше встречались с ситуациями, когда индуктивность L получалась с отрицательным знаком. В [15] даже излагается метод Бруне, который «состоит в том, чтобы три магнитно не связанные катушки, имеющие индуктивности  $L_1, L_2, L_3$ , одно из значений которых является отрицательным, заменить трансформатором, состоящим из двух катушек с индуктивностями  $L_4, L_5$ , между которыми имеется магнитная связь (взаимная индуктивность M)».

В нашем случае отрицательные значения параметров сопротивлений модели являются следствием взаимоиндукции в объекте с распределенными параметрами. Наличие взаимоиндукции между частями одной обмотки обуславливает появление в этих частях уравнительных токов, фазы которых сдвинуты на 180 электрических градусов, а отношение их значений определяется отношением числа витков в рассматриваемых частях. В результате протекания уравнительных токов на отдельных частях обмотки возникают падения напряжения с фазами, также сдвинутыми на 180 электрических градусов. В модели обмотки с сосредоточенными параметрами токи во всех частях обмотки одинаковы, что не позволяет стандартным образом учесть фазу падения напряжения. Остается единственный выход: принимать значения параметров сопротивлений частей обмоток в модели с разными знаками. Нам представляется требование ТОЭ о физической реализуемости модели избыточным. Достаточным условием следует признать условие математической реализуемости модели.

Изложенные в [15] методы синтеза предполагают, что все элементы модели должны быть физиче-

ские реализуемые. Кроме того, частотные характеристики должны аппроксимироваться отношением двух полиномов, что практически невозможно реализовать при диапазоне частот 50–100000 Гц.

Нами предлагается наряду с классическими параметрами (элементами) электрической цепи R, L, C [15] ввести дополнительно параметры (элементы) -R, -L, -C. Использование дополнительных параметров позволяет методами теории цепей решать новый класс задач по определению параметров электрических процессов в конкретных точках объекта с распределенными параметрами при наличии взаимоиндукции между продольными элементами обмотки.

Физический смысл вновь вводимых дополнительных параметров следующий:

-C – расчетная индуктивность, значение сопротивления которой изменяется обратно пропорционально от значения частоты, которая отображает влияние взаимоиндуктивности на фазу тока в части обмотки и величину обменной реактивной мощности между частями обмотки;

-L – расчетная емкость, значение сопротивления которой прямо пропорционально значению частоты, которая отображает влияние взаимоиндуктивности на фазу тока в части обмотки и величину обменной реактивной мощности между частями обмотки. Конкретное соотношение параметров – C и –L в расчетной схеме определяет направление передачи реактивной мощности из одной части обмотки в другую;

-*R* – расчетное для данной частоты активное сопротивление, которое отображает влияние взаимоиндукции на величину обменной активной мощности между частями обмотки.

## Метод реализации функций частотных характеристик комплексных сопротивлений

Задачей моделирования является реализация функции комплексного сопротивления модели части обмотки  $Z(p)=Z(j\omega)=R(\omega)+jX(\omega)$  для диапазона частот 50–100000 Гц. Критерием адекватности моделирования является среднеквадратическое отклонение значений реализуемой функции от требуемых значений, определенных частотными характеристиками  $R(\omega)$  и  $X(\omega)$ . Таким образом, реализуемая функция содержит две независимые переменные: частоту  $\omega$  и аргумент  $\varphi$ . Предложенный нами метод заключается в переходе от реализации функции двух независимых переменных  $Z(j\omega)=R(j)+jX(\omega)$  к реализации двух независимых функций одной переменной  $Z_R(\omega)=R(\omega)$  и  $Z_v(\omega)=X(\omega)$ .

Модель, отображающая зависимость  $R(\omega)$  или  $X(\omega)$ , представляет собой цепочку из n последовательно соединенных двухполюсников, каждый из которых состоит из параллельно соединенных элементов  $R_i$ ,  $L_i$  и  $C_i$ , где i=1...n. При этом данные двухполюсники имеют комплексное сопротивление, поэтому в модели  $R(\omega)$  неизбежно появляется реактивная составляющая  $jX_R(\omega)$ , а в модели (9)

 $X(\omega)$  – активная составляющая  $R_{\chi}(\omega)$ , каждая из которых вносит в соответствующую модель значительные погрешности. В результате обе функции приобретают комплексный вид:

 $Z_{R}(j\omega) = R(\omega) + jX_{R}(\omega), Z_{X}(j\omega) = R_{X}(\omega) + jX(\omega).$ (8)

В каждой из моделей необходимо устранить эти погрешности. Для этого модель  $R(\omega)$  делится на две части. Одна часть синтезируется по значению  $0,5R(\omega)$ . Результирующая функция первой половины имеет вид  $Z_{R1}(j\omega)=0,5R(\omega)+jX_R(\omega)$ . Вторая половина модели полностью копирует первую за исключением знаков элементов  $L_i$  и  $C_i$ , которые во всех двухполюсниках принимаются противоположными, тогда  $Z_{R2}(j\omega)=0,5R(\omega)-jX_R(\omega)$ . Обе половины модели соединяются последовательно; в результате

$$Z_{R}(j\omega) = Z_{R1}(j\omega) + Z_{R2}(j\omega) = 0,5R(\omega) + + jX_{R}(\omega) + 0,5R(\omega) - jX_{R}(\omega) = R(\omega).$$

Аналогично моделируется необходимое значение  $X(\omega)$ , при этом одна часть модели синтезируется по значению  $0.5X(\omega)$ , вторая половина полностью копирует первую со сменой знаков элементов  $R_i$  всех двухполюсников на противоположные. Обе половины также соединяются последовательно:

$$Z_{X}(j\omega) = Z_{X1}(j\omega) + Z_{X2}(j\omega) = R_{X}(\omega) +$$

$$j0,5X_{R}(\omega)-R_{X}(\omega)+j0,5X(\omega)=jX(\omega).$$
(10)

Таким образом, становится возможным независимое моделирование значений  $R(\omega)$  и  $X(\omega)$ .

Математическая реализация позволяет получить необходимый результат со среднеквадратической погрешностью на уровне 10 %, что достаточно для практических целей исследования.

Помимо решения данной задачи, предложенный метод впервые предоставляет возможность решения и других задач, например задачи учета изменения сопротивления проводника от частоты (поверхностный эффект).

#### Выводы

- Частотные характеристики сопротивлений взаимоиндукции имеют резонансный характер с ярко выраженными точками, которые соответствуют условиям как резонанса токов, так и резонанса напряжений обмоток, которые пересекаются магнитным потоком взаимоиндукции. Таким образом, тезис о взаимном влиянии общего магнитного потока между обмотками и потока рассеивания обмотки, которая пересекается общим магнитным потоком, можно считать доказанным.
- Поскольку в общем случае частотные характеристики собственных сопротивлений разных обмоток различны, должны быть различными и сопротивления взаимоиндукции, определенные разными способами.
- Величины перенапряжений на элементах обмоток определяются соотношением частей общего магнитного поток, замыкающегося вне и по магнитопроводу.

- 4. Адекватное отображение реальных физических процессов в обмотках трансформатора в математических моделях невозможно без моделирования как собственных сопротивлений рассеяния обмоток и их частей, так и сопротивлений взаимоиндукции между ними с учетом нарушения в *реальных* трансформаторах принципа взаимности взаимоиндукции.
- 5. Нарушение принципа взаимности взаимоиндукции обуславливает невозможность синтеза универсальной модели трансформатора, которая способна адекватно реагировать на любые воздействия со стороны сетей всех классов напряжения, к которым может быть подключен трансформатор.
- 6. Принципиально можно создать специализированную модель для исследования одного или группы родственных процессов при заданном виде воздействия.
- 7. Разработан метод определения значений сопротивлений моделей обмоток и их частей.
- 8. Математическая реализация моделей, синтезированных на основе методов теории расчета электрических цепей с сосредоточенными параметрами для анализа параметров процессов в объектах с распределенными параметрами невозможна без введения в теорию дополнительных параметров электрических цепей –*R*, –*L*, –*C* и дополнения традиционных методов моделирования магнитных связей через магнитопровод взаимоиндуктивными связями по путям замыкания потока за пределами магнитопровода.
- 9. Разработан метод реализации функций частотных характеристик комплексных сопротивлений, в котором предложено перейти от реализации функции двух независимых переменных  $Z(p)=Z(j\omega)=R(\omega)+jX(\omega)$  к реализации двух независимых функций одной переменной  $Z_R(\omega)=R(\omega)$  и  $Z_X(\omega)=X(\omega)$ , и который исключает необходимость аппроксимации Z(p) как отношения двух полиномов, не имеющих общих корней.
- 10. Корректное использование методов теории расчета цепей с сосредоточенными параметрами позволяет проводить анализ параметров электромагнитных процессов в конкретных точках объекта с распределенными параметрами при наличии взаимоиндукции между его продольными элементами. Имеющиеся в мировой технической литературе публикации об электромагнитных процессах в крупных трансформаторах при внутренних резонансах не могут быть признаны как достоверные, если их результаты получены с использованием теории расчета электрических цепей с сосредоточенными параметрами без внесения необходимых корректив.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. 8-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1986. – 263 с.
- Васютинский С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. – Л.: Энергия, 1970. – 432 с.
- Сапожников А.В. Уровни изоляции электрооборудования высокого напряжения. Нормы и методы испытания электрической прочности. – М.: Энергия, 1969. – 296 с.
- ГОСТ 1516.1–76\*. Электрооборудование переменного тока на напряжение от 3 до 500 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. – М.: 1985. – 61 с.
- ГОСТ 1516.2–97. Межгосударственный стандарт, Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции. – Киев: Госстандарт Украины, 1999. – 32 с.
- Руководство по защите электрических сетей 6–1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений. РД 153-34.3-35.125-99.
   2-е изд. Утверждено Первым заместителем председателя Правления РАО «ЕЭС России» О.В. Бритвиным 12.07.1999 г. – СПб.: Из-во ПЭИПК. 1999. – 333 с.
- ГОСТ 1516.3-96. Межгосударственный стандарт, электрооборудование переменного тока на напряжение от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. – Киев: Госстандарт Украины, 1999. – 54 с.
- Энергетика за рубежом. Трансформаторы. Перенапряжения и координация изоляции: переводы докладов Международной конференции по Большим электрическим система (СИ-ГРЭ-84) / под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 420 с.
- Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System. P. 1. Expertise. Joint Working Group A2/C4.39, Brochure 577A / «CIGRE», Apr. 2014.
- Electrical Transient Interaction Between Transformers and the Power System. P. 2. Case studies. Joint Working Group A2/C4.39, Brochure 577B / «CIGRE», Apr. 2014.
- Dommel H.W. Electromagnetic Transients Program. Reference Manual. (EMTP Theory Book). – Portland, OR: Bonneville Power Administration, 1986.

- Semlyen A., Dabuleanu A. Fast and accurate switching transient calculations on transmission lines with ground return using recursive convolutions // IEEE Trans. Power App. Syst. – Mar./Apr. 1975. – V. PAS-94. – № 2. – P. 1. – P. 561–575.
- Gustavsen B., Mo O. Interfacing convolution based linear models to an electromagnetic transients program // Int. Conf. Power Systems Transients. - Lyon, France, Jun. 4-7, 2007. - P. 6.
- 14. Физические явления внутреннего резонанса в электрооборудовании с обмотками высокого напряжения / И.Р. Бучковский, М.М. Молнар, А.Л. Никонец, Л.А. Никонец, М.Б. Сабат / под ред. Л.А. Никонца. – Львов: НВФ «Українські технології», 2012. – 167 с.
- Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники, электрические цепи. 8-е изд. М.: Высшая школа, 1984. 560 с.
- 16. Электромагнитные процессы и условия возникновения резонансных перенапряжений в обмотках трансформатора / М.Б. Сабат, А.Л. Никонец, В.П. Венгер, В.П. Венгер // Известия Томского политехнического университета. 2014. Т. 325. № 4. С. 91-102.
- Распределение воздействующих на трансформатор напряжений вдоль обмотки ВН / Л.А. Никонец, М.Б. Сабат, И.Р. Бучковский, Р.В. Бучковский, А.Л. Никонец, В.П. Венгер, В.П. Венгер // Электрические станции. 2014. № 2. С. 51–56.
- Никонец А.Л., Венгер В.П., Венгер В.П. Электромагнитные процессы в обмотках трансформатора при действии на него перенапряжений // Электрические станции. – 2014. – № 12. – С. 18–26.
- Математичне моделювання в електроенергетиці: підручник / О.В. Кириленко, М.С. Сегеда, О.Ф. Буткевич, Т.А. Мазур. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2010. – 608 с.
- Сегеда М.С., Черемних Є.В., Мазур Т.А. Математичне моделювання вільних коливань напруги в обмотках трансформаторів з урахуванням взаємоіндукції між витками під час імпульсних перенапруг // Науковий бюлетень Дніпропетровськ НГУ. – 2013. – № 1. – С. 68–76.

Поступила 20.08.0214 г.

UDC 621.3.013.62;621.314.21;621.314.222.8

## METHODS OF RESEARCHING ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN TRANSFORMER WINDINGS INFLUENCED BY POWER SYSTEM OVERVOLTAGE

## Aleksey L. Nykonets,

National University «Lviv Polytechnic», 12, St. Bandery Street, Lviv city, 79013, Ukraine. E-mail: nykonets@gmail.com

#### Vladimir P. Venger,

National University «Lviv Polytechnic», 12, St. Bandery Street, Lviv city, 79013, Ukraine. E-mail: vol.venher@gmail.com

#### Viktor P. Venger,

National University «Lviv Polytechnic», 12, St. Bandery Street, Lviv city, 79013, Ukraine. E-mail: venherviktor@gmail.com

**The relevance of the study.** At the present stage of development of CIS countries network the first-priority problem is the increase of operation reliability of transformers, the main part of which has been out of date long ago.

The main aim of the study is to state the main reasons of discrepancy between the research methods and the essence of the problem, which is under study, and to establish possible areas of improvement.

The methods used in the study: frequency methods of natural experiment and electrical circuit analysis.

**The results.** The reason of discrepancy between the used research methods and the essence of the problem is the assumption of possibility to consider electrical and magnetic fields of the single electromagnetic field separately. The combined consideration of the single electromagnetic field shows the distributed parameter line (which is represented by the windings and their parts) is heterogeneous. **Conclusions.** Adequate representation of real physical processes in transformer windings by mathematical models is impossible without modeling both intrinsic leakage resistance of windings and their parts and mutual induction resistance between these parts, taking into consideration the failure of reciprocity principle of mutual induction in real transformers. The authors have developed the method of implementing the functions of complex impedance frequency characteristic. The method proposes to move from implementation of function of two independent variables  $Z(p)=Z(j\omega)=R(\omega)+jX(\omega)$  to implementation of two independent functions of one variable  $Z_R(\omega)=R(\omega)=R(\omega)=R(\omega)$  approximation as a ratio of two polynomes, which do not have common roots. The correct usage of the methods of the calculation theory for electric circuit with lumped parameters allows analyzing the parameters of electromagnetic processes in specific points of the object with distributed parameters involving the interaction between its longitudinal elements. The existing world technical publications about electromagnetic processes in large transformers at internal resonances, cannot be called trustworthy, if the results described were obtained using the calculation theory of electric circuit with lumped parameters at interaction the orgeneous at interactions.

#### Key words:

Transformer, resonance overvoltage, electromagnetic processes, longitudinal insulation, turns insulation.

#### REFERENCES

- Bessonov L. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Elektromagnitnoe pole [Theory of electrotechnology. Electromagnetic field]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1986. 8<sup>th</sup> ed., revised and updated. 263 p.
- Vasyutinsky S. Voprosy teorii i rascheta transformatorov [Problems of transformer theory and computation]. Leningrad, Energiya Publ., 1970. 432 p.
- Sapozhnikov A.V. Urovni izolyatsii elektrooborudovaniya vysokogo napryazheniya. Normy i metody ispytania elektricheskoy prochnosti [Insulation levels of high-voltage electrical equipment. Standards and methods of electric strength test]. Moscow, Energiya Publ., 1969. 296 p.
- 4. GOST 1516.1-76\*. Elektrooborudovanie peremennogo toka na napryazhenie ot 3 do 500 kV. Trebovaniya k elektricheskoy prochnosti izolyatsii [State Standard 1516.1-76\*. Alternative current electrical equipment with rated voltage from 3 to 500 kV. Insulation electrical strength requirements]. Moscow, 1985. 61 p.
- GOST 1516.2-97. Mezhgosudarstvenny standart. Elektrooborudovanie i elektroustanovki peremennogo toka na napryazhenie 3 kV i vyshe. Obshchie metody ispytaniy elektricheskoy prochnosti izolyatsii [State Standard 1516.2-97. Interstate standard, AC electrical equipment and installations with rated voltage 3 kV and higher. Main test methods of electrical strength of insulation]. Kiev, State standard of Ukraine, 1999. 32 p.

- Rukovodstvo po zashchite elektricheskikh setey 6-1150 kV ot grozovykh i vnutrennikh perenapryazheniy. RD 153-34.3-35.125-99.
   2-e izd. Utverzhdeno Pervym zamestitelem predsedatelya Pravleniya RAO «EES Rossii» O.V. Britvinym 12.07.1999 g. [Manual on 6-1150 kV electrical network protection against lightning and internal overvoltage. RD 153-34.3-35.125-99, second edition, approved by the first vice-chairman of the board of «RAO EES Russia» O. Britvin 12.07.1999]. St-Petersburg, PEIPK Publ. house, 1999. 333 p.
- GOST 1516.3–96. Mezhgosudarstvenny standart, elektrooborudovanie peremennogo toka na napryazhenie ot 1 do 750 kV. Trebovaniya k elektricheskoy prochnosti izolyatsii [State Standard 1516.3–96. Interstate standard, alternative current electrical equipment with rated voltage from 1 to 750 kV. Insulation electrical strength requirements]. Kiev, State standard of Ukraine, 1999.
- Energetika za rubezhom. Transformatory. Perenapryazheniya i koordinatsiya izolyatsii: perevody dokladov Mezhdunarodnoy konferentsii po Bolshym elektricheskim sistemam (SIGRE-84) [Power engineering abroad. Transformers. Overvoltage and insulation management. Translations of international conference reports of big electrical systems (SIGRE-84)]. Eds. S. Lizunov, A. Lokhanin. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 420 p.
- Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System. P. 1. Expertise. Joint Working Group A2/C4.39, Brochure 577A / CIGRE, Apr. 2014.

- Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System. P. 2. Case studies. Joint Working Group A2/C4.39, Brochure 577B / CIGRE, Apr. 2014.
- Dommel H.W. ElectroMagnetic Transients Program. Reference Manual. (EMTP Theory Book). Portland, OR, Bonneville Power Administration, 1986.
- Semlyen A., Dabuleanu A. Fast and accurate switching transient calculations on transmission lines with ground return using recursive convolutions. *IEEE Trans. Power App. Syst.*, Mar./Apr. 1975, vol. PAS-94, no. 2, P. 1, pp. 561–575.
- Gustavsen B., Mo O. Interfacing convolution based linear models to an electromagnetic transients program. *Int. Conf. Power Sy*stems Transients. Lyon, France, Jun. 4–7, 2007. pp. 6.
- Buchkovsky I., Molnar M., Nykonets A., Nykonets L., Sabat M. Fizicheskie yavleniya vnutrennego rezonansa v elektrooborudovanii s obmotkami vysokogo napryazheniya [Physical phenomenon of internal resonance in electrical equipment with high voltage windings]. Monography. Ed. by L. Nykonets. Lviv, Ukrainian technologies Publ., 2012. 167 p.
- Bessonov L. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki, elektricheskie tsepi [Theory of electrotechnology, electrical circuits]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1984. 8<sup>th</sup> ed. 560 p.
- 16. Sabat M., Nykonets A., Venger V., Venger V. Elektromagnitnye protsessy i usloviya vozniknoveniya rezonansnykh perenapryazheniy v obmotkakh transformatora [Electromagnetic processes and conditions of appearance of resonance overvoltage in tran-

sformer windings]. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2014, vol. 325, no. 4, pp. 91–102.

- Nykonets L., Sabat M., Buchkovsky I., Buchkovsky R., Nykonets A., Venger V., Venger V. Raspredeleniye vozdeystvuyushchikh na transformator napryazheniy vdol obmotki VN [Voltage distribution influencing a transformer along high voltage winding]. *Electricheskie stantsii*, 2014, no. 2, pp. 51–56.
- Nykonets A., Venger V., Venger V. Elektromagnitnye protsessy v obmotkakh transformatora pri deystvii na nego perenapryazheniy [Electromagnetic processes in transformer windings influenced by overvoltage]. *Electricheskie stantsii*, 2014, no. 12, pp. 18-26.
- Kirilenko O.V., Segeda M.S., Butkevich O.F., Mazur T.A. Matematychne modelyuvannya v elektroenergetytsi [Mathematical modelling in power engineering]. Lviv, National university «Lviv Polytechnic» Press, 2010. 608 p.
- 20. Segeda M.S., Cheremnyh E.V., Mazur T.A. Matematychne modelyuvannya vilnykh kolyvan naprugy v obmotkakh transformatoriv z urakhuvannyam vzaemoinduktsii mizh vytkamy pid chas impulsnykh perenaprug [Mathematical modelling of voltage free oscillation in transformer windings taking into consideration mutual induction between turns under the influence of impulse overvoltage]. Scientific bulletin of Dnepropetrovsk NGU, 2013, no. 1, pp. 68–76.

Received: 20 August 2014.

УДК 534.2:539

## КОЭФФИЦИЕНТЫ ПУАССОНА ЩЕЛОЧНО-ГАЛОИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ. Ч. Ш. ГАЛОГЕНИДЫ КАЛИЯ

## Беломестных Владимир Николаевич,

д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры естественнонаучного образования Юргинского технологического института (филиала) ТПУ, Россия, 652050, г. Юрга, ул. Ленинградская, 26. E-mail: bvnilat@yandex.ru

#### Соболева Эльвира Гомеровна,

канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры естественнонаучного образования Юргинского технологического института (филиала) ТПУ, Россия, 652050, г. Юрга, ул. Ленинградская, 26. E-mail: sobolevaeno@mail.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью изучения особенностей температурного поведения коэффициентов Пуассона v<sub>ski</sub> в галогенидах калия КХ (X=F,Cl,Br,I). Детальное исследование позволит восполнить пробел в изучении данных объектов. Цель работы: получение коэффициентов Пуассона моно- и поликристаллов КСІ, КВг, КІ в температурной области их существо-

вания и КF при Т≤300 К; выявление закономерностей между анизотропными коэффициентами поперечной деформации v<sub><№</sub>, модулями сдвига G<sub><hki></sub> и модулями Юнга E<sub><hki></sub> для галогенидов калия KX (X=F,Cl,Br,I).

**Методы исследования.** На основе известных экспериментальных значений постоянных жесткости с<sub>ії</sub> определены анизотропные и изотропные для поликристаллов коэффициенты Пуассона галогенидов калия КF, KCl, KBr, KI.

Результаты. Определены коэффициенты Пуассона моно- и поликристаллов KCl, KBr, KI в температурной области их существования и КF при T≤300 К. На примере галогенидов калия подтверждены ранее установленные в галогенидах лития и натрия (до температурных точек упругой изотропии) виды неравенств между анизотропными коэффициентами Пуассона v<110,110>>v<10,10>>v<10>>><10,10>>v<10,00>>v<10,00>> v<10,00>> температуры два анизотропных коэффициента Пуассона (v<110.110>, v<11>) в галогенидах калия уменьшаются, два других (v<100>, v<110,001>) увеличиваются, средний (v) демонстрирует слабую температурную зависимость (незначительный рост). Установлено, что все анизотропные модули сдвига G<nkr> и Юнга E<nkr> в кристаллах КХ с повышением их температуры уменьшаются.

Table 1.

#### Ключевые слова:

Коэффициент Пуассона, кристалл, упругие свойства, анизотропия, галогениды калия.

Кристаллы галогенидов калия (КF, КСl, КВr, КІ) как объекты исследования являются логическим продолжением опубликованных результатов [1, 2] по коэффициентам Пуассона кристаллов галогенидов лития и натрия. В указанных работах кроме некоторых общих закономерностей для анизотропных коэффициентов Пуассона v<sub><hk/>></sub>, свойственных обеим группам кристаллов, были обнаружены отдельные интересные особенности. Например, в кристалле LiF при определенных условиях V<sub>shk</sub> принимают отрицательные значения (признак ауксетичности [3-7]), а в кристаллах NaX (X=F,Cl,Br,I) при изменении температуры происходит смена видов неравенств между V<sub><hk/> в</sub> соответствующих точках их упругой изотропии. Необходимость исследования температурного поведения коэффициентов Пуассона V<sub><hk/>b</sub> в галогенидах калия KX (X=F,Cl,Br,I) обусловлена восполнением пробела в изучении данных объектов.

В табл. 1 приведены некоторые физические свойства кристаллов галогенидов калия при стандартных условиях. Значения упругих параметров таблицы показывают, что все кристаллы КХ существенно анизотропны (фактор упругой анизотропии А значительно меньше единицы), из чего можно ожидать относительно высокой разницы между численными значениями  $V_{< hk >}$  в каждом кристалле. Из четырех кристаллов доля центрального взаимодействия между ионами выше в КСl и КBr (соотно-

Таблица 1.	Чекоторые физические свойства галогенидов к	a-
	ия (300 K) [8–13]	

Свойство/Feature	KF	KCl	KBr	KI
Плотность, 10³, кг/м³ Density, 10³, kg/m³	2,53	1,98	2,75	3,13
Компоненты тензора упругой жесткости <i>с<sub>і</sub>,</i> ГПа Elastic stiffness tensor components <i>c<sub>і</sub>,</i> hPa				
C <sub>11</sub> C <sub>12</sub> C <sub>44</sub>	65,80 14,90 12,80	39,80 6,20 6,25	34,50 5,40 5,08	27,55 4,70 3,80
Температура плавления, К Melting temperature, К	1130	1049	1003	959
Температура Дебая, К Debye temperature, К	313	222	165	120
Соотношение Коши $\Delta = c_{12}/c_{44}$ Cauchy relation $\Delta = c_{12}/c_{44}$	1,16	0,99	1,06	1,24
Фактор упругой анизотропии A=2c <sub>44</sub> /(c <sub>11</sub> -c <sub>12</sub> ) Elastic anisotropy factor	0,50	0,37	0,35	0,33

(300 K) [8–13]

Several physical features of potassium halogenides

шение Коши  $\Delta$  наиболее близко к единице). Следует также учесть, что в зависимости от отдельных свойств кристаллов в их ряду КF------КВr----КІ заметно отклонение для кристалла KCl (пониженное значение плотности, постоянная жесткости  $c_{12}$  меньше постоянной жесткости  $c_{44}$ , тогда как в КF, КBr и KI явно совсем наоборот,  $c_{12} > c_{44}$ ).

В работе использовались справочные сведения по упругим постоянным монокристаллов галогенидов калия [11, 12]. При этом диагональные компоненты матрицы постоянных жесткости с11 И С44 В современных условиях измеряются с высокой точностью (относительная погрешность десятые доли процента). Недиагональная компонента с<sub>12</sub> не измеряется непосредственно ни одним из известных методов, а ее значение является малой величиной, определяемой разностью больших величин [10]. Погрешность с<sub>12</sub> составляет проценты и даже десятки процентов. В связи с этим представленные в табл. 2 значения коэффициентов Пуассона как результат комбинаций постоянных жесткости с11, с12 и с44 следует считать выполненными с погрешностью не хуже  $\pm 10$  %.

Для исследуемой группы кристаллов табл. 2 демонстрирует анизотропные  $v_{<hk}$ , средние v, усредненные  $\tilde{v}$  коэффициенты Пуассона и параметр Грюнайзена ү (мера ангармонизма межатомных колебаний в решетке и нелинейности сил межатомного взаимодействия) при комнатной температуре. Расчетные соотношения для указанных величин были опубликованы нами ранее [1]. Из приведенных в табл. 2 данных следует, что действительно между коэффициентами Пуассона в основных кристаллографических направлениях кубической решетки каждого галоидного кристалла калия наблюдается существенная анизотропия, например, в КІ отношение  $v_{<110.1\overline{1}0>}/v_{<110.001>}$  достигает 8,9. В кристаллах КСl, КВr и КI анизотропные коэффициенты Пуассона  $v_{<110,1\bar{1}0>}$  превышают предельное значение среднего коэффициента Пуассона *v*=0,5 для изотропных твердых тел. При продольно-поперечных деформациях кристаллов KX в направлениях <100,001> коэффициенты Пуассона минимальны, но положительны (продольное удлинение образца сопровождается обычным сужением в поперечном направлении). В кристаллах КХ неравенство между анизотропными коэффициентами Пуассона имеет следующий вид:  $V_{<110}$   $V_{<110} > V_{<110} > V_{<100} > V_{<100}$  (следствие того, что фактор упругой анизотропии для них A < 1, табл. 1). Коэффициенты Пуассона поликристаллов КХ (v и *v*) близки к типичным значениям этого коэффициента  $\tilde{v} \approx 0.3$  для изотропных твердых тел.

**Таблица 2.** Коэффициенты Пуассона и параметр Грюнайзена кристаллов галогенидов калия (300 К)

**Table 2.**Poisson ratios and Gruneisen parameter for the crystals of potassium halogenides (300 K)

Кристалл Crystal	V<100>	V<110,001>	V<110,1Ī0>	V<111>	v	<i>V~</i>	γ
KF	0,185	0,116	0,486	0,323	0,275	0,277	1,626
KCI	0,135	0,069	0,558	0,340	0,273	0,275	1,615
KBr	0,135	0,066	0,580	0,349	0,280	0,282	1,654
KI	0,146	0,068	0,603	0,360	0,292	0,294	1,724

Параметры Грюнайзена исследуемых кристаллов по своим величинам не выделяют галогениды калия среди других твердых тел. Минимальное значение  $\gamma$  для KCl в группе кристаллов KX свидетельствует о некоторой относительно лучшей гармонизации взаимодействия ионов калия и хлора в решетке по сравнению с остальными парами партнеров по взаимодействию.

Температурные изменения коэффициентов Пуассона кристаллов галогенидов калия приведены на рисунке, *a* (КF), *б* (КCl), *в* (КBr), *г* (КI). В двух исследуемых кристаллах, КСl и КВr, *с* увеличением температуры наблюдаются одинаковые по виду зависимости для всех коэффициентов Пуассона как и соответствующие изменения от температуры коэффициентов Пуассона ранее изученных кристаллов галогенидов лития [1] и натрия [2]. Два анизотропных коэффициента Пуассона ( $v_{<110,110>}$ ,  $v_{<111>}$ ) при этом монотонно уменьшаются, два других ( $v_{<110,001>}$ ,  $v_{<100>}$ ) возрастают, вследствие чего средний (v) слабо зависит от температуры (медленный рост) на всей температурной шкале существования кристаллов хлорида и бромида калия.

Для монокристалла КF экспериментальные значения постоянных жесткости  $c_{ij}$  известны только в ограниченном диапазоне температур (T $\leq$ 300 K) [10, 14]. Поэтому на рисунке, *а* коэффициенты Пуассона фторида калия ограничены низкотемпературной областью, из вида которых можно все же судить об их обычном температурном поведении.

Частичные отклонения от обычного вида температурных изменений коэффициентов Пуассона можно наблюдать лишь в случае кристалла KI (рисунок, *г*) на кривых  $v_{<100>}(T)$  и v(T) при T>300 К. Физическую причину смены характера продольнопоперечного деформирования вдоль граней куба монокристалла KI ( $v_{<100>}$ ) в области комнатных температур и выше по сравнению с другими галогенидами щелочных металлов назвать трудно. Возможно, дело в неточности получения экспериментальных данных по  $c_{ii}$  монокристалла KI в высокотемпературной области (заметим, сведений по *с*<sub>іі</sub> для КІ удивительно мало). Что касается уменьшения изотропного коэффициента Пуассона v в KI при нагревании после комнатных температур, то здесь, понятно, превалирует суммарно аналогичные вклады от трех  $V_{<110.1\overline{1}0>}$ ,  $V_{<101>}$ ,  $V_{<100>}$  против одного медленно возрастающего V<sub><110.001></sub>.

Помимо результатов по анизотропии коэффициентов Пуассона  $v_{<hk}$ , и по их температурным изменениям в группе кристаллов КХ интерес представляют сведения о модулях сдвига  $G_{<hk}$ , и модулях Юнга  $E_{<hk}$ , в трех основных кристаллографических направлениях <100>, <110>, <111> в соответствующих температурных интервалах. Полученные нами данные такого содержания представлены в табл. 3–6. При этом были использованы экспериментальные значения постоянных податливости  $s_{ij}$  исследуемых кристаллов из [14–18] (расчетные формулы приведены в [2, 19, 20]). Из приведенных в таблицах величин  $G_{<hk}$ (T) и



**Рисунок.** Температурные изменения коэффициентов Пуассона кристаллов КХ: 1)  $v_{<100>}$ ; 2)  $v_{<110,00>}$ ; 3)  $v_{<110,110>}$ ; 4)  $v_{<110>}$ ; 5) v (поликристалл). a) КF; б) КСI; в) КBr; г) КI

**Figure.** Temperature change of Poisson coefficients of KX crystals 1)  $v_{<100>}$ ; 2)  $v_{<10,00>}$ ; 3)  $v_{<10,10>}$ ; 4)  $v_{<110}$ ; 5) v (polycrystalline). a) KF; b) KCl; c) KBr; d) KI

 $E_{<hkc}(T)$  однозначно следует: 1) между анизотропными модулями упругости кристаллов КХ выполняются неравенства вида  $G_{<100>}{<}G_{<110>}{<}G_{<111>}$ для модулей сдвига и  $E_{<100>}{<}E_{<110>}{<}E_{<111>}$ для модулей Юнга; 2) с повышением температуры кристаллов все 6 их модулей упругости монотонно уменьшаются. Аналогичные закономерности наблюдались нами ранее в кристаллах галогенидов натрия [2].

**Таблица 3.** Анизотропные упругие модули кристалла KF **Table 3.** Anisotropic elastic modulus of KF crystal

Т	G<100>	G<110>	G<111>	E<100>	E<110>	E<111>
K	Гпа/hPa					
4,2	13,36	18,69	21,56	71,63	40,59	35,46
100	12,89	17,77	20,34	67,29	39,18	34,39
200	12,73	17,18	19,45	62,74	38,29	33,88
300	12,80	17,05	19,17	60,50	38,07	33,87

**Таблица 4.** Анизотропные упругие модули кристалла KCl **Table 4.** Anisotropic elastic modulus of KCl crystal

Т	G<100>	G<110>	G<111>	E<100>	E<110>	E<111>			
K		ГПа/һРа							
4,2	6,63	10,10	12,30	47,24	21,17	17,88			
100	6,55	9,91	12,00	45,19	20,82	17,65			
200	6,48	9,64	11,50	42,30	20,43	17,42			
300	6,25	9,11	10,70	38,12	19,47	16,74			
400	6,13	8,80	10,30	35,34	18,86	16,32			
500	5,97	8,33	9,59	31,90	18,16	15,86			
600	5,80	7,84	8,89	28,55	17,40	15,40			
700	5,64	7,32	8,12	25,06	16,61	14,93			
800	5,47	6,77	7,36	21,76	15,73	14,40			
900	5,30	6,24	6,62	18,83	14,87	13,89			
1000	5,12	5,72	5,95	16,29	13,97	13,33			
1049	5,06	5,30	5,38	13,67	12,89	12,65			

#### Выводы

- 1. Определены коэффициенты Пуассона моно- и поликристаллов КСІ, КВг, КІ в температурной области их существования и КF при Т≤300 К.
- 2. На примере галогенидов калия подтверждены ранее установленные в галогенидах лития [1] и натрия [2] (до температурных точек упругой изотропии) виды неравенств между анизотропными коэффициентами Пуассона  $v_{<110,110}>v_{<111}>v_{<100}>v_{<110,010}$ , модулями сдвига  $G_{<100}>G_{<110}>G_{<111}$  и модулями Юнга  $E_{<100}>E_{<110}>E_{<110}$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беломестных В.Н., Соболева Э.Г. Коэффициенты Пуассона щелочно-галоидных кристаллов. Ч. І. Галогениды лития // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 320. – № 2. – С. 137–139.
- Беломестных В.Н., Соболева Э.Г. Коэффициенты Пуассона щелочно-галоидных кристаллов. Ч. II. Галогениды натрия // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 323. – № 2. – С. 140–142.
- 3 Negative Poisson's ratio as a common feature of cubic metals / R.H. Baughman, J.M. Shacklette, A.A. Zakhidov, S. Staf-

Габлица 5	. Анизотропные упругие модули кристалла KBr
Table 5.	Anisotropic elastic modulus of KBr crystal

Т	G<100>	G<110>	G<111>	E<100>	E<110>	E<111>		
K		ГПа/hPa						
4,2	5,38	8,34	10,20	40,82	17,40	14,60		
100	5,20	8,07	9,88	39,28	16,77	14,07		
200	5,18	7,84	9,47	36,13	16,54	14,00		
300	5,08	7,53	8,97	33,04	16,05	13,70		
400	4,95	7,10	8,30	29,03	15,38	13,30		
500	4,82	6,70	7,70	26,67	15,01	13,10		
600	4,65	6,24	7,04	23,53	14,31	12,66		
700	4,55	5,91	6,56	21,05	13,73	12,29		
800	4,39	5,43	5,88	17,86	12,87	11,76		
900	4,24	4,98	5,28	15,15	11,98	11,19		
1003	4,10	4,45	4,58	12,30	10,99	10,61		

**Таблица 6.** Анизотропные упругие модули кристалла KI **Table 6.** Anisotropic elastic modulus of KI crystal

Т	G<100>	G<110>	G<111>	E<100>	E<110>	E<111>		
K		ГПа/hPa						
4,2	3,68	5,97	7,53	33,53	12,20	10,07		
100	3,69	5,87	7,31	31,32	12,16	10,09		
200	3,68	5,72	7,02	28,69	12,00	10,05		
300	3,80	5,70	6,84	26,18	12,18	10,33		
400	3,66	5,48	6,56	24,39	11,59	9,87		
500	3,54	5,23	6,22	22,22	11,03	9,45		
600	3,44	4,96	5,80	19,42	10,43	9,02		
700	3,36	4,68	5,38	16,67	9,81	8,62		
800	3,17	4,30	4,88	14,29	8,98	8,00		
900	3,13	4,00	4,41	11,76	8,34	7,59		
959	24,39	9,98	7,01	3,04	4,75	3,83		

- 3. С повышением температуры два анизотропных коэффициента Пуассона (v<sub><110,110></sub>, v<sub><111></sub>) в галогенидах калия уменьшаются, два других (v<sub><100></sub>, v<sub><110,001></sub>) увеличиваются, средний (v) демонстрирует слабую температурную зависимость (незначительный рост). Исключение составляет ход кривых v<sub><100</sub>.(Т) и v(Т) в КІ при температурах выше комнатных (наблюдается спад). Причина такого поведения непонятна.
- 4. Все анизотропные модули сдвига  $G_{<\!hk\!\land}$  и Юнга  $E_{<\!hk\!\land}$  в кристаллах КХ с повышением их температуры уменьшаются.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 13-08-98014 р\_сибирь\_а на проведение фундаментальных научных исследований.

strom // Nature. - 1998. - V. 392. - № 6674. - P. 362-365.

- 4. Lakes R.S. Foam structures with a negative Poisson's ratio // Science. 1987. V. 235. N $_2$  4792. P. 1038–1040.
- Материалы с отрицательным коэффициентом Пуассона. (Обзор) / Д.А. Конек, К.В. Войцеховски, Ю.М. Плескачевский, С.В. Шилько // Механика композитных материалов и конструкций. – 2004. – Т. 10. – № 1. – С. 35–69.
- Беломестных В.Н., Соболева Э.Г. Особенности поведения коэффициентов Пуассона ауксетичных материалов // Вестник Бурятского государственного университета. – 2013 – № 3. – С. 79–87.

- Гольдштейн Р.В., Городцов В.А., Лисовенко Д.С. Ауксетическая механика кристаллических материалов // Изв. РАН. МТТ. – 2010. – № 4. – С. 43–62.
- Воробьев А.А. Механические и тепловые свойства щелочно-галоидных монокристаллов. – М.: Высшая школа, 1968. – 272 с.
- Кучин В.А., Ульянов В.Л. Упругие и неупругие свойства кристаллов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 136 с.
- Упругие и акустические свойства ионных, керамических диэлектриков и высокотемпературных сверхпроводников / В.Н. Беломестных, Ю.П. Похолков, В.Л. Ульянов, О.Л. Хасанов. – Томск: STT, 2001. – 226 с.
- Свойства неорганических соединений. Справочник / Ефимов А.И. и др. – Л.: Химия, 1983. – 392 с.
- Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник. Л.: Химия, 1977. 376 с.
- Беломестных В.Н., Теслева Е.П. Ангармоническое эффекты в твердых телах (акустические аспекты). – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 151 с.
- Францевич И.Н., Воронов Ф.Ф., Бакута С.А. Упругие постоянные и модули упругости металлов и неметаллов. Справочник. – Киев: Наукова думка, 1982. – 286 с.

- Физическая акустика/ Т. З. Динамика решетки / под ред. У. Мэзона. – М.: Мир, 1968. – 391 с.
- Simmons G., Wang K. Single Crystal Elastic Constants and Calculated Aggregate Properties: handbook. Cambridge MA, MIT, 1971. 370 p.
- Никаноров С.П., Кардашев Б.К. Упругость и дислокационная неупругость кристаллов. – М.: Наука. 1985. – 250 с.
- Лейбфрид Г., Людвиг В. Теория ангармонических эффектов в кристаллах / пер. с англ. под ред. В.Л. Бонч-Бруевича. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1963. – 280 с.
- Асадов Ю.Г., Насиров В.И. Исследование кинетики полиморфного α↔β превращения в монокристаллическом нитрате калия // Кристаллография. – 1972. – Т. 17. – № 5. – С. 991–994.
- Беломестных В.Н., Соболева Э.Г. Акустические, упругие и неупругие свойства кристаллов галогенатов натрия. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 276 с.

Поступила 31.05.2014 г.

UDC 534.2:539

## POISSON RATIOS OF ALKALI-HALOID CRYSTALS. P. III. POTASSIUM HALOGENIDE

### Vladimir N. Belomestnykh,

Dr. Sc., Yurga Institute of Technology, TPU affiliate, 26, Leningradskaya street, Yurga, 652050, Russia. E-mail: bvnilat@yandex.ru

#### Elvira G. Soboleva,

Cand. Sc., Yurga Institute of Technology, TPU affiliate, 26, Leningradskaya street, Yurga, 652050, Russia. E-mail: sobolevaeno@mail.ru

Relevance of the work is determined by the necessity of studying the thermal behavior of Poisson ratios  $v_{\text{chkp}}$  in potassium halogenides KX (X=F, Cl, Br, I). The detailed research will allow filling the void in the scientific knowledge concerning the given objects. **The aim of the research** is to obtain the Poisson ratios of KCl, KBr, KI mono- and polycrystals for temperature region of their existen-

ce and those of KF under T $\leq$ 300 K; to identify the regularities between anisotropic Poisson ratios  $v_{<hkc}$ , shear moduli  $G_{<hkc}$  and Young moduli  $E_{<hkc}$  for potassium halogenides KX (X=F,Cl,Br,I).

**Methods of research**. Based on the known experimental values of stiffness constants  $c_{ij}$  the authors have determined the anisotropic and isotropic (for polycrystals) Poisson ratios of potassium halogenides KF, KCl, KBr, KI.

**Results.** The Poisson ratios for mono- and polycrystals of KCl, KBr, KI were found for temperature region of their existence and for KF under T≤300 K. On the example of potassium halogenides the authors proved the inequations between the anisotropic Poisson ratios  $v_{<10,100} > v_{<10,000} >$ 

#### Key words:

Poisson's ratio, crystal, elastic properties, anisotropy, potassium halides.

The research was financially supported by RFBR grant no. 13–08–98014 p\_сибирь\_a for fundamental scientific research.

#### REFERENCES

- Belomestnykh V.N., Soboleva E.G. Koeffitsienty Puassona shchelochno-galoidnykh kristallov. Ch. I. Galogenidy litiya [Poisson's ratio of alkali-halide crystals. P. I. Litium halide]. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2011, vol. 320, no. 2, pp. 137–139.
- Belomestnykh V.N., Soboleva E.G. Koeffitsienty Puassona shchelochno-galoidnykh kristallov. Ch. II. Galogenidy natriya [Poisson's ratio of alkali-halide crystals. P. II. Chlorides of sodium]. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2013, vol. 323, no. 2, pp. 140–142.
- Baughman R.H., Shacklette J.M., Zakhidov A.A., Stafstrom S. Negative Poisson's ratio as a common feature of cubic metals. *Nature*, 1998, vol. 392, no. 6674, pp. 362–365.
- Lakes R.S. Foam structures with a negative Poisson's ratio. Science, 1987, vol. 235. no. 4792, pp. 1038–1040.
- Konek D.A., Voytsekhovskiy K.V., Pleskachevskiy Yu.M., Shilko S.V. Materially s otritsatelnym koeffitsientom Puassona. (Obzor) [Materials with negative Poisson's ratio. (Review)]. Composite Mechanics and design, 2004, vol. 10, no. 1, pp. 35–69.
- Belomestnykh V.N., Soboleva E.G. Osobennosti povedeniya koeffitsientov Puassona auksetichnykh materialov [Features of behavior Poisson's ratio of auxetic]. Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta, 2013, no. 3, pp. 79–87.
- Goldshteyn R.V., Gorodtsov V.A., Lisovenko D.S. Aukseticheskaya mekhanika kristallicheskikh materialov [Auxetics mechanics of crystalline materials]. *Mechanics of Solids*, 2010, no. 4, pp. 43–62.
- Vorobev A.A. Mekhanicheskie i teplovye svoystva shchelochno-galoidnykh monokristallov [Mechanical and thermal properties of alkali-halide crystals]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1968. 272 p.
- Kuchin V.A., Ulyanov V.L. Uprugie i neuprugie svoystva kristallov [Elastic and inelastic properties of crystals]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 136 p.
- Belomestnykh V.N., Pokholkov Yu.P., Ulyanov V.L., Khasanov O.L. Uprugie i akusticheskie svoystva ionnykh, keramicheskikh dielektrikov i vysokotemperaturnykh sverkhprovodnikov [Elastic

and acoustic properties of ionic ceramic insulators and high-temperature superconductors]. Томск, STT Publ., 2001. 226 p.

- 11. Efimov A.I. Svoystva neorganicheskikh soedineniy [Properties of inorganic compounds]. Leningrad, Khimiya Publ., 1983. 392 p.
- Rabinovich V.A., Khavin Z.Ya. Kratkiy khimicheskiy spravochnik [Brief chemical Handbook]. Leningrad, Khimiya Publ., 1977. 376 p.
- Belomestnykh V.N., Tesleva E.P. Angarmonicheskie effekty v tverdykh telakh (akusticheskie aspekty) [Anharmonic effects in solids (acoustic aspects)]. TOMCK, TPU Publ. house, 2009. 151 p.
- Frantsevich I.N., Voronov F.F., Bakuta S.A. Uprugie postoyanny i moduli uprugosti metallov i nemetallov [Elastic constants and modulus of elasticity of metals and non-metalls]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1982. 286 p.
- Fizicheskaya akustika [Physical acoustics]. Dinamika reshetki [Vol. 3. Lattice dynamics]. Ed. by U. Mezon. Moscow, Mir Publ., 1968. 391 p.
- Simmons G., Wang K. Single Crystal Elastic Constants and Calculated Aggregate Properties: handbook. Cambridge MA, MIT, 1971. 370 p.
- Nikanorov S.P., Kardashev B.K. Uprugost i dislokatsionnaya neuprugost kristallov [Elasticity and dislocation inelasticity of crystals]. Moscow, Nauka Publ., 1985. 250 p.
- Leybfrid G., Lyudvig V. *Teoriya angarmonicheskikh effektov v* kristallakh [The theory of inharmonic effects in crystals]. Transl. from English. Ed. by V.L. Bonch-Bruevich. Moscow, Foreign literature Press, 1963. 280 p.
- Asadov Yu.G., Nasirov V.I. Issledovanie kinetiki polimorfnogo α↔β prevrashcheniya v monokristalicheskom nitrate natriya [Investigation of kinetics of polymorphic α↔β transformation in monocrystalline of potassium nitrate]. Crystallography Reports, 1972, vol. 17, no. 5, pp. 991–994.
- Belomestnykh V.N., Soboleva E.G. Akusticheskie, uprugie i neuprugie svoystva kristallov galogenatov natriya [Acoustic, elastic and inelastic properties of crystals of sodium halogenate]. Tomsk, TPU Publ. house, 2009. 276 p.

Received: 31 May 2014.

#### УДК 620.179.13

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ МЕТАЛЛОВ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

#### Куриленко Георгий Алексеевич,

д-р техн. наук, профессор кафедры прочности летательных аппаратов Новосибирского государственного технического университета, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: teormech@ngs.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения точности прогнозирования процесса накопления и развития повреждаемости при циклических нагрузках.

**Цель работы:** устранение некоторых противоречий известных энергетических методов исследования повреждаемости на основе разработанного термодинамического подхода, который позволил существенно повысить точность прогнозирования усталостного процесса.

Рассмотрена термодинамика макроупругого деформирования и предложен новый критерий накопления и развития повреждаемости – приращение удельной энтропии за цикл колебаний, которое разложено на функциональные части. Как известно, энтропия – это такой параметр, который в механике сплошной среды наиболее полным образом учитывает все необратимые процессы, происходящие в исследуемом объекте, т. е. диссипацию энергии. Важным является также то обстоятельство, что поскольку энтропия является функцией состояния, то ее изменение при переходе объекта в новое состояние (в отличие, скажем, от изменения энергии) характеризует диссипативные процессы независимо от того, каким конкретным образом этот переход совершился, т. е. этот параметр объективно и однозначно отражает необратимость процесса, в том числе и процесса накопления и развития повреждаемости. Следует также заметить, что физический смысл имеет не сама энтропия, поскольку она определяется с точностью до произвольной постоянной, а разность энтропий при переходе тела из состояния 1 в состояние 2.

**Результаты.** Такой подход позволил учесть на феноменологическом уровне буквально все, что происходит в очаге повреждаемости, разрешить противоречия традиционных энергетических методов и разработать практические способы прогнозирования основных характеристик циклической прочности деталей машин, повысившие точность прогнозирования и упростившие его технологию.

#### Ключевые слова:

Изменение температуры, приращение удельной энтропии, предел выносливости, долговечность, очаг повреждаемости.

Исследование повреждаемости металлов при циклических нагрузках является весьма актуальной задачей в инженерном деле [1–5]. Основная прикладная сторона этой проблемы – прогнозирование циклической прочности деталей машин [6–8]. Традиционный способ решения этого вопроса статистический, когда разрушается часть деталей из произведенной партии и по полученной информации делается вероятностный прогноз на всю партию деталей.

Но для особо ответственных деталей такой подход неприемлем. Поэтому в последние десятилетия появились различные способы неразрушающего прогнозирования циклического ресурса изделий [9–12]. В основе этих способов, как правило, лежит энергетический подход, согласно которому из всей рассеянной за цикл колебаний энергии  $\Delta W^{(1n)}$  выделяется та часть, которая идет на развитие повреждаемости  $\Delta W_n^{(1n)}$ , через которую затем и рассчитывается циклический ресурс детали.

Но существующие способы разложения диссипированной энергии являются неполными и требуют доработки. Так, у С.Е. Гуревича и А.П. Гаевого [13] рассеянная энергия  $\Delta W^{(1n)}$  разложена на тепловую  $\Delta W^{(1n)}_{r}$  и повреждающую  $\Delta W^{(1n)}_{n}$  части

$$\Delta W^{(1\mu)} = \Delta W_T^{(1\mu)} + \Delta W_n^{(1\mu)}$$

При этом не выделена скрытая энергия деформации  $\Delta W_p^{(1n)}$ , вызывающая неопасное движение дислокаций, поэтому при расчете  $\Delta W_n^{(1n)}$  в области малых амплитудных напряжений, когда доля

 $\Delta W_p^{\rm (in)}$  особенно возрастает, получается большая погрешность, отмечаемая самими авторами.

В.В. Федоров [14] разложил диссипированную энергию  $\Delta W^{(1n)}$  по схеме, изображенной на рис. 1. Здесь приняты обозначения:  $\Delta W_q^{(1n)}$  – часть рассеянной энергии, перешедшей в тепло;  $\Delta W_{\rm cxp}^{(1n)}$  – изменение скрытой энергии деформации;  $\Delta W_T^{(1n)}$  – часть тепловой энергии, накопленной в теле;  $\overline{\Delta W_a^{(1n)}}$  – энергия теплообмена.

<sup>3</sup>Но при такой схеме выделить энергию  $\Delta W_n^{(1n)}$  довольно затруднительно, т. к. она входит и в  $\Delta W_{cxp}^{(1n)}$  и в  $\Delta W_q^{(1n)}$ .

Кроме того, при энергетическом подходе  $\Delta W_n^{(1n)}$ всегда рассчитывается как разность между всей диссипированной энергией в очаге повреждаемости и отведенной из очага энергией, а это довольно близкие величины, поэтому получается большая погрешность расчета, что ведет к недостаточной точности прогнозирования циклического ресурса.

В соответствии с поставленной целью повышения точности исследования усталостного процесса макроупругое деформирование рассматривается в тесном единстве с термодинамикой микропластических деформаций, т. к. работа подавляющего большинства конструктивных элементов протекает номинально в пределах упругого деформирования. При этом пластические деформации в макрообъеме работающих деталей отсутствуют, но происходит микропластическое деформирование отдельных зерен металла, связанное с выделением тепла.



**Рис. 1.** Схема разложения диссипированной энергии по *В.В. Федорову* 

#### Fig. 1. Decomposition scheme of heat of dissipation by V.V. Fedorov

Запишем уравнение энергии, которое для квазистатических необратимых процессов имеет вид:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{1}{T} \left( \frac{dq}{dt} + \sigma_{ij}^{(D)} \frac{d\varepsilon_{ij}}{dt} \right).$$
(1)

Здесь  $\frac{dS}{dt}$  и  $\frac{dq}{dt}$  – соответственно скорости изме-

нения удельной энтропии и количества тепла; *Т* – температура в рассматриваемый момент времени;

 $\frac{d\varepsilon_{ij}}{dt}$  – скорость изменения тензора деформаций;

 $\sigma_{ii}^{(D)}$  – тензор диссипативных напряжений.

Представим выражение для подсчета энтропии системы в виде [15]:

$$S = S_0(T) + K\alpha_v \varepsilon_{ee}, \qquad (2)$$

где  $S_0(T)=c_0\ln(T/T_0)$  отражает чисто тепловую сторону задачи, а  $S'=K\alpha_v\varepsilon_{ee}$  связывает поле деформаций с температурным полем.

В формуле (2) 
$$\alpha_v = 3\alpha$$
,  $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$ , и с помо-

щью этой формулы в [15] получена связь между изменением температуры нагружаемого тела и приложенной нагрузкой (эффект Томсона) – эффект снижения температуры при упругой деформации:

$$\Delta T = -\frac{T\alpha\sigma_{ee}}{c_{p}}.$$
 (3)

Для адиабатических процессов dq=0 и скорость производства энтропии, как это следует из (1), полностью определяется диссипативной функцией

$$dS = \frac{1}{T} \sigma_{ij}^{(D)} d\varepsilon_{ij}.$$
 (4)

Следует заметить, что понятие энтропии, строго говоря, относится только к медленно протекающим равновесным процессам. Но такие процессы являются идеализированными и в действительности точно никогда не реализуются. Но к ним можно подойти сколь угодно близко. Очень многие реальные процессы, идущие с конечными скоростями, можно считать приблизительно квазистатическими (квазиравновесными). Именно такими являются процессы медленного накопления и развития повреждаемости при многоцикловой усталости, исследование которой является наиболее актуальной задачей.

Известно, что даже при весьма малых амплитудах колебаний зависимость между напряжениями  $\sigma$  и деформациями  $\varepsilon$  в металлах не остается линейной и при представлении ее в координатах  $\sigma$ – $\varepsilon$  наблюдается замкнутая петля механического гистерезиса, площадь которой представляет диссипированную за цикл колебаний энергию, через которую и рассчитывается приращение всей произведенной за цикл удельной энтропии  $\Delta S$ <sup>(In)</sup> по формуле (4).

Рассмотрим колебательный процесс, связанный с реализацией одноосного напряженного состояния. Выражения, описывающие изменение напряжений и деформаций во времени, имеют вид

$$\sigma = \sigma_a \sin(\omega t), \ \varepsilon = \varepsilon_a \sin(\omega t - \varphi). \tag{5}$$

Здесь  $\sigma_a$  и  $\varepsilon_a$  – амплитудные напряжения и деформации соответственно;  $\omega$  – угловая частота деформирования;  $\varphi$  – угол сдвига фазы.

Продифференцируем первое выражение (5)

$$d\sigma = \sigma_a \cos(\omega t) d(\omega t). \tag{6}$$



Рис. 2. Петля гистерезиса

#### Fig. 2. Hysteresis loop

Считая, что температура T практически не изменяется за цикл, определим  $\Delta S^{(1\pi)}$  по формуле (4) с учетом (5), (6) и закона Гука:

$$\Delta S^{(1u)} = \frac{1}{T} \int_{0}^{2\pi} \varepsilon d\sigma = -\frac{1}{T} \pi E \varepsilon_a^2 \sin \varphi.$$
 (7)

Амплитудную деформацию можно представить в виде

$$\varepsilon_a = \varepsilon_y + \frac{\Delta \varepsilon_u}{2},\tag{8}$$

где  $\varepsilon_y$  и  $\Delta \varepsilon_{\pi}$  – соответственно упругая и неупругая части деформации, как это видно на петле гистерезиса, показанной на рис. 2.

Учитывая связи  $\sin \varphi$  с неупругой деформацией  $\Delta \varepsilon_{\mu}$  и коэффициентом поглощения энергии  $\psi$ :

$$\sin \varphi = -\frac{\Delta \varepsilon_{_{H}}}{2\varepsilon_{_{a}}}, \ \psi = 4K_{_{\Phi}} |\sin \varphi|, \tag{9}$$

где  $K_{\phi}$  – коэффициент формы петли гистерезиса (для эллиптической петли, которой можно аппроксимировать наблюдавшуюся в нашем эксперименте петлю,  $K_{\phi}=\pi/2$ ), получим из формулы (7) с учетом (8) и (9):

$$\Delta S^{(1u)} = \frac{\pi \psi E \varepsilon_a^2}{4T K_{\phi}}.$$
 (10)

Разложим поток энтропии  $\Delta S^{(1n)}$ , производимый в очаге накопления и развития повреждаемости и рассчитанный по формуле (10), на функциональные части в соответствии со схемой, изображенной на рис. 3.



**Рис. 3.** Разложение потока энтропии на функциональные части

#### Fig. 3. Decomposition of entropy flow to functional parts

На схеме приняты обозначения:  $\Delta S_2^{(1n)}$  – приращение за цикл колебаний той части производимой энтропии, которая вызывает непосредственный нагрев очага повреждаемости;  $\Delta S_{1n}^{(1n)}$  – поток энтропии, идущий на накопление повреждаемости, т. е. на зарождение и развитие микротрещины;  $\Delta S_{1p}^{(1n)}$  – часть производимой энтропии, связанная с неопасными деформациями в очаге;  $\Delta S_q^{(1n)}$  – поток энтропии, рассеиваемой в окружающую среду в виде тепла.

Формула для расчета  $\Delta S_2^{(1\pi)}$  известна в литературе [15]:

$$\Delta S_2^{(1u)} = c_v \ln(T_2 / T_1) \approx c_v \frac{T_2 - T_1}{T_1}.$$
 (11)

Здесь  $c_v$  – удельная теплоемкость;  $T_1$  и  $T_2$  – температуры очага повреждаемости соответственно в начале и конце рассматриваемого цикла колебаний.

Оставшаяся часть приращения энтропии

$$\Delta S_1^{(1\mu)} = \Delta S^{(1\mu)} - \Delta S_2^{(1\mu)} = \Delta S_{1p}^{(1\mu)} + \Delta S_{1n}^{(1\mu)}.$$
(12)

При разложении потока энтропии  $\Delta S_1^{(1n)}$  на  $\Delta S_{1p}^{(1n)}$  и  $\Delta S_{1n}^{(1n)}$  будем опираться на идеи, заложенные в деформационных критериях усталостного разрушения [1, 16], а именно, исходить из того, что при работе до предела выносливости (т. е. при  $\Delta \varepsilon_n \leq \Delta \varepsilon_R$ , где  $\Delta \varepsilon_R$  – неупругая часть деформации, соответствующая нагружению с амплитудными напряжениями, находящимися на уровне предела выносливости) производится только «неопасная энтро-

пия». При работе за пределом выносливости  $(\Delta \varepsilon_n > \Delta \varepsilon_R)$  часть энтропии, которая соответствует неупругой деформации  $\Delta \varepsilon_{nn} = \Delta \varepsilon_n - \Delta \varepsilon_R$ , расходуется на необратимые процессы накопления усталостных повреждений, а оставшаяся часть, соответствующая неупругой деформации  $\Delta \varepsilon_R$ , является неопасной.

Так же как в формуле (10), выразим соответствующие потоки энтропии через коэффициент поглощения энергии очага повреждаемости  $\psi$ , который представим в виде

$$\psi = \psi_R + \Delta \psi, \tag{13}$$

где  $\psi_{R}$  – коэффициент поглощения энергии, соответствующий работе при амплитудных напряжениях  $\sigma_{a}$ , равных пределу выносливости  $\sigma_{R}$ .

В соответствии с (10) произведенная за цикл колебаний энтропия

$$\Delta S^{(1n)} = (\psi_R + \Delta \psi) \frac{\pi E \varepsilon_a^2}{4T K_{\phi}}.$$
 (14)

С другой стороны,

Į

$$\Delta S^{(1u)} = \Delta S_{1p}^{(1u)} + \Delta S_{1n}^{(1u)} + \eta \Delta S_2^{(1u)}.$$
 (15)

сопоставляя правые части (14) и (15), легко ви-  
цеть, что слагаемое 
$$\psi_R \frac{\pi E \varepsilon_a^2}{4 T K_{\phi}}$$
 включает в себя  $\Delta S_{1n}^{(1n)}$ 

и часть 
$$\Delta S_2^{_{
m (In)}}$$
, а слагаемое  $\Delta \psi \, rac{\pi E arepsilon_a^2}{4 T K_{\Phi}}$  включает  $\Delta S_{_{
m In}}^{_{
m (In)}}$ 

и оставшуюся часть  $\Delta S_2^{(1n)}$ , т. к. нагрев очага происходит от обоих потоков энтропии:  $\Delta S_{1n}^{(1n)}$  и  $\Delta S_{1n}^{(1n)}$ . Чтобы подчеркнуть разделение теплового слагаемого  $\Delta S_2^{(1n)}$  на две части, перед ним введен параметр

$$\eta = \frac{\Delta \psi + \psi_R}{\psi} = \frac{(\psi - \psi_R) + \psi_R}{\psi} = 1$$

С учетом формул (12)–(15) выражения для подсчета соответствующих приращений удельной энтропии (выраженных через коэффициент поглощения энергии  $\psi$ ) будут иметь вид:

$$\Delta S_{1p}^{(1n)} = \frac{\pi \psi E \varepsilon_a^2}{4TK_{\phi}}, \ \Delta S_{1n}^{(1n)} = 0. \ (\text{при } \sigma_a \leq \sigma_R)$$
$$\Delta S_{1p}^{(1n)} = \frac{\pi \psi_R E \varepsilon_a^2}{4TK_{\phi}} - c_v \frac{\psi_R}{\psi} \ln \frac{T_2}{T_1}, \tag{16}$$

$$\Delta S_{\ln}^{(\ln)} = \frac{\pi(\psi - \psi_R) E \varepsilon_a^2}{4TK_{\phi}} - c_{\nu} \frac{(\psi - \psi_R)}{\psi} \ln \frac{T_2}{T_1}.$$
(при  $\sigma_a > \sigma_R$ )

В этих формулах 
$$T = \frac{T_1 + T_2}{2}$$
. Формула (11) для

подсчета  $\Delta S_2^{_{(1\pi)}}$  остается без изменений.

#### Обсуждение полученных формул

Энтропия как функция состояния является наиболее полной диссипативной функцией, поскольку она учитывает интегральным образом все факторы, влияющие на процесс накопления и развития повреждаемости в самом очаге повреждаемости, включая температуру. Поэтому использование приращения энтропии в качестве индикатора развития повреждаемости позволило повысить точность прогнозирования усталостной прочности.

Следует заметить также, что разложение потока энтропии на функциональные части, которые можно рассчитать по формулам (11) и (16), позволило устранить отмеченные выше недостатки энергетических теорий, а именно: выделить поток энтропии, идущий на развитие повреждаемости  $\Delta S_{1n}^{(1n)}$ , и поток энтропии, связанный с неопасными деформациями  $\Delta S_{1n}^{(1n)}$ . И самое главное, получены удобные для практического применения формулы для расчета всех потоков энтропии.

Кроме того, теперь видна физическая корректность феноменологической формулы (3), показывающей снижение температуры при упругом деформировании (эффект Томсона) и приводящей, следовательно, к уменьшению энтропии объекта ( $\Delta S_2^{(1n)} < 0$ ), что вроде бы противоречит второму началу термодинамики. Теперь этому есть объяснение:  $\Delta S_2^{(1n)} = \Delta S_{1n}^{(1n)} + \Delta S_{2n}^{(1n)} \geq 0$  ( $\Delta S_{1n}^{(1n)} = 0$  при упругом деформировании).

#### Практическое использование результатов работы

Результатом проведенных исследований явилось решение ряда актуальных задач прикладного характера в области прогнозирования усталостной прочности на основе предложенного энтропийного критерия накопления повреждаемости в очаге разрушения. При решении каждой конкретной задачи используется наиболее адекватная ей часть потока энтропии. Эти задачи можно сформулировать следующим образом:

- Разработан метод ускоренного прогнозирования индивидуального предела выносливости деталей по кинетике приращения удельной энтропии ΔS<sub>2</sub><sup>(In)</sup> в очаге накопления повреждаемости [17]. Кривая ΔS<sub>2</sub><sup>(In)</sup>=f(σ<sub>a</sub>) в районе физического предела выносливости имеет резкий излом, абсцисса которого и соответствует индивидуальному пределу выносливости испытываемой детали.
- Разработан метод прогнозирования циклической долговечности как «бездефектных» (без начальных трещин) деталей по кинетике ΔS<sub>1n</sub><sup>(1n)</sup>, так и деталей, имеющих исходные надрезы [18, 19]. При расчете долговечности «бездефектной» детали предварительно определяется

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Механика разрушения и прочность материалов. Справочное пособие: в 4 т. Т. 4 / О.Н. Романив, С.Я. Ярема, Г.Н. Никифорчин, Н.А. Махутов, М.М. Стадник. – Киев: Наукова думка, 1990. – 679 с.
- Особенности разрушения малоуглеродистой стали в условиях сдвига, отрыва и смешанных мод нагружения / А.П. Солдатенков, Л.Р. Ботвина, М.Р. Тютин, В.П. Левин, Н.А. Жарко-

ее истинный предел выносливости и коэффициент поглощения энергии на уровне предела выносливости. Эти параметры по разработанной методике определяются с высокой точностью и достоверностью. Затем рассчитывается удельная повреждающая энергия за цикл  $\Delta W_n^{(1n)}$  через поток удельной повреждающей энтропии  $\Delta S_{1n}^{(1n)}$ , по которой и прогнозируется циклическая долговечность. Погрешность прогнозирования при этом не превышала 30 %, что в разы меньше погрешности прогнозирования по стандартной методике [1].

- 3. Предложен более точный термографический метод определения усилия  $P_q$ , при котором происходит страгивание трещины при вязком и упруго-вязком разрушении, по которому можно рассчитывать характеристики статической трещиностойкости металлов. График зависимости растягивающей образец силы P от  $\Delta S_2^{(1n)}$ , подсчитываемой в кончике развивающейся трещины, в районе усилия  $P_q$  имеет характерную площадку [20]. По предложенному методу разброс определяемых характеристик трещиностойкости уменьшается на 10...20 % и также уменьшается на 40...50 % время испытания.
- 4. Разработаны практические методы неразрушающего контроля циклической прочности серийно выпускаемых деталей в производственных условиях и испытательные стенды для их реализации [19]. Результаты работы внедрены на ряде крупных предприятий нашей страны в виде действующих испытательных стендов, вписанных в технологические цепочки контроля качества материалов и деталей машин (завод «Сибтекстильмаш» (Новосибирск), Московский машиностроительный завод «Опыт»).

#### Выводы

Разработан термодинамический способ исследования повреждаемости металлов. В качестве критерия используется приращение удельной энтропии за цикл колебаний в очаге повреждаемости. Энтропия – это функция состояния, которая наиболее полным образом учитывает все необратимые процессы, происходящие в исследуемом объекте.

На основе этого критерия разработаны практические методики определения основных характеристик усталости металлов и неразрушающего контроля циклической прочности деталей машин, при этом повышается точность и упрощается технология контроля.

ва //Деформация и разрушение материалов. – 2012. – № 6. – С. 2–10.

- Федотов В.П. Термодинамический подход к моделированию диаграммы нагружения // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2013. – № 2. – С. 53–62.
- Штремель М.А. О единстве в многообразных процессах усталости // Деформация и разрушение материалов. – 2011. – № 6. – С. 1–12.
- Нажьяр Ф., Сигард Ж., Дувал Р. Современные технологии на основе инфракрасной термографии для обнаружения дефектов в материалах // Современные инфракрасные технологии и их приложения: Труды IV Междунар. конф. – Флоренция, 1997. – С. 287–296.
- Гольцев В.Ю., Маркочев В.М. Методика исследования процесса роста усталостных трещин при постоянном размахе коэффициента интенсивности напряжений // Деформация и разрушение материалов. – 2012. – № 7. – С. 43–47.
- Булах П.А. Исследование развития процесса накопления повреждений в металле при циклическом нагружении в условиях сложного напряженного состояния // Проблемы прочности. – 2011. – № 2. – С. 122–127.
- Романов А.Н. Распространение трещин усталости и единая кривая циклической трещиностойкости конструкционных материалов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2013. – № 5. – С. 47–57.
- Вавилов В. Температурные неразрушающие испытания: краткая история и современное состояние // Количественная Инфракрасная Термография: Труды Европейского семинара № 27. – Чатени-Малабри, Франция, 1992. – С. 179–194.
- Вибротермический контроль полимерных композитов / Г. Буссе, М. Бауэр, В. Риппел, Д. Ву // Количественная Инфракрасная Термография: Труды Европейского семинара № 27. – Чатени-Малабри, Франция, 1992. – С. 154–159.
- Шмидт Ж. Изучение процесса трещинообразования в хрупких волокнистых композитах с использованием инфракрасной термографии и акустической эмиссии // Современные инфракрасные технологии и их приложения: Труды Междунар. конф. – Флоренция, 1995. – С. 263–271.
- Гончар А.В., Руденко А.Л., Мишакин В.И. Исследование микропластических деформаций конструкционной стали на начальном этапе усталостного нагружения методами неразру-

шающего контроля // Деформация и разрушение материалов. - 2012. - № 7. - С. 37-42.

- Гуревич С.Е., Гаевой А.П. Методика экспериментального определения разрушающей энергии при циклическом нагружении // Заводская лаборатория. – 1973. – № 9. – С. 1110–1114.
- Федоров В.В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твердых тел. – Ташкент: Фан, 1979. – 167 с.
- 15. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. М.: Наука, 1987. 246 с.
- 16. Махутов Н.А., Макаренко И.В., Макаренко Л.В. Исследование механизма и кинетики разрушения поверхностных разноориентированных полуэллиптических трещин при сложном напряженно-деформированном состоянии с помощью деформационных критериев нелинейной механики разрушения // Проблемы прочности. – 2013. – № 4. – С. 91–97.
- Куриленко Г.А. Способ определения предела выносливости: а.с. СССР № 1499167, МКИ<sup>4</sup> G 01 N 3/32; заявл. 12.12.1985; опубл. 07.08.1989, Бюл. № 29. – 6 с.
- Куриленко Г.А. Прогнозирование циклического ресурса деталей с макротрещинами термографическим методом // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 321. – № 2. – С. 36–39.
- Куриленко Г. Современное исследование усталости металлов с помощью инфракрасной техники // Современные инфракрасные технологии и их приложения: Труды Междунар. конф. – Флоренция, 1995. – С. 253–262.
- Куриленко Г.А. Исследование трещиностойкости металлов термографическим методом // Обработка металлов. – 2010. – № 3 (48). – С. 41–44.

Поступила 27.01.2014 г.

UDC 620.179.13

# INVESTIGATION OF METAL DAMAGE BY THERMODYNAMIC METHOD

## Georgy A. Kurilenko,

Dr. Sc., Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Avenue, Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: teormech@ngs.ru

The relevance of the discussed issue is caused by the need to increase the accuracy of predicting accumulation and development of damage under cycling load.

**The main aim of the study** is to resolve some contradictions of traditional energy-sensitive methods of studying damage on the basis of the developed thermodynamic approach which essentially increases the accuracy of predicting the fatigue process.

The author has considered macroelastic deformation thermodynamics and proposed a new criterion of accumulation and development of damage. This criterion is divided into functional parts increment of specific entropy for one cycle of oscillation. Entropy is such parameter, which takes into account all nonreversed changes in testing object best of all. It is important as well, that as entropy is the state function, its change at object state transition characterizes all dissipative processes without regard for including accumulation and development of damage, independently of the detailed changes in the object. It should be noted as well that not the entropy itself has physical sense, but entropy difference at object transfer from state 1 to state 2.

**The results.** Such approach allowed taking into account on formal level almost everything that happens in a damage domain, solving contradictions of traditional energy-sensitive methods and elaborating the practical methods to predict the main characteristics of cyclic durability of machine details. These characteristics improved the accuracy in prediction and simplified its technology.

#### Key words:

Change of temperature, increment of specific entropy, endurance limit, longevity, damage domain.

#### REFERENCES

- Romaniv O.N., Yarema C.Ya., Nikiforchin G.N., Makhutov N.A., Stadnik M.M. Mekhanika razrusheniya i prochnost materialov. Spravochnoe posobie [Mechanics of destruction and strength of materials. Reference book]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1990. 679 p.
- Soldatenkov A.P., Botvina L.R., Tyutin M.R., Levin V.P., Zharkova N.A. Osobennosti razrusheniya malouglerodistoy stali v usloviyakh sdviga, otryva i smeshannykh mod nagruzheniya [Peculiarities of low-carbon steel destruction under conditions of displacement, alienation and mixed modes of loading]. Deformatsiya i razrushenie manerialov – Deformation and destruction of materials, 2012, no. 6, pp. 2–10.
- Fedotov V.P. Termodinamicheskiy podkhod k modelirovaniyu diagrammy nagruzheniya [Thermodynamic approach to model of loading diagram]. Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin – Problems of machine-building and reliability of machines, 2013, no. 2, pp. 53-62.
- Shtremel M.A. O edinstve v mnogoobraznykh protsessakh ustalosti [On unity in various fatigue processes]. Deformatsiya i razrushenie materialov – Deformation and destruction of materials, 2011, no. 6, pp. 1–12.
- Najar F., Sigard J., Duval R. Sovremennye tekhnologii na osnove infrakrasnoy termografii dlya obnaruzheniya defektov v materialakh [Advanced technology to detect flaw in materials by Infrared thermography]. Sovremennye infrakrasnye tekhnologii i ikh prilogeniya. Trudy IV Mezhdunarodnoy konferentsii [Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Workshop. Advanced Infrared technology and applications]. Firenze, 1997. pp. 287–296.
- Goltsev B.Yu., Markochev V.M. Metodika issledovaniya protsessov rosta ustalostnykh treshshchin pri postoyannom razmakhe koeffitsienta intensivnosti napryazheniy [Method for investigating the increase of fatigue flaw under constant amplitude KIN]. Deformatsiya i razrushenie materialov – Deformation and destruction of materials, 2012, no. 7, pp. 43–47.
- Bulakh P.A. Issledovanie razvitiya protsessa nakopleniya povrezhdeniy v metalle pri tsiklicheskom nagruzhenii v usloviyakh slozhnogo napryazhennogo sostoyania [Investigation of increasing damage development in metal under complex tension]. Problemy prochnosti – Problems of strength, 2011, no. 2, pp. 122–127.
- Romanov A.N. Rasprostranenie treshchin ustalosti i edinaya krivaya tsiklicheskoy treshchinostoykosti konstruktsionnykh materialov [Spreading of fatigue cracks and common curve of cyclic cracking]. Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin – Problems of machine-building and reliability of machines, 2013, no. 5, pp. 47–57.
- Vavilov V. Temperaturnye nerazrushayushchie ispytaniya: kratkaya istoriya i sovremennoe sostoyanie [Thermal non destructive testing: short history and state-of-art]. Kolichestvennaya Infrakrasnaya Termografiya QIRT 92. Trudy Evropeiskogo Seminara [Proc. of the Eurotherm Seminar no. 27. Quantitative Infrared Thermography QIRT 92]. Chatenay-Malabry, France, 1992. pp. 179-194.
- Busse G., Bauer M., Rippel W., Wu D. Vibrometricheskiy control polimernykh kompozitov [Lockin vibrothermal inspection of polymer composites]. Kolichestvennaya Infrakrasnaya Termografiya QIRT 92. Trudy Evropeiskogo Seminara [Proc. of the

Eurotherm Seminar no. 27. Quantitative Infrared Thermography QIRT 92]. Chatenay-Malabry, France, 1992. pp. 154–159.

- 11. Schmidt J. Izuchenie protsessa treshchinoobrazovaniya v khrupkikh voloknistykh kompozitakh c ispolzovaniem infrakrasnoy termografii i akusticheskoy emissii [Infrared thermography and acoustic emission analysis study of the fracture process in short fibre composites materials]. Sovremennye infrakrasnye tekhnologii i ikh prilozheniya. Trudy Mezhdunarodnoy konferentsii [Proc. of the International Workshop. Advanced Infrared technology and applications]. Firenze, 1995. pp. 263-271.
- 12. Gonchar A.V., Rudenko A.L., Mishakin V.V. Issledovanie mikroplasticheskikh deformatsiy konstruktsionnoy stali na nachalnom etape ustalostnogo nagruzheniya metodami nerazrushayushchego kontrolya [Investigation of micro-plasticity deformations of constructional steel at the first fatigue stage by nondestructive check methods]. Deformatsiya i razrushenie materialov – Deformation and destruction of materials, 2012, no. 7, pp. 37–42.
- Gurevich S.E., Gaevoy A.P. Metodika eksperimentalnogo opredeleniya razrushayushchey energii pri tsiklicheskom nagruzhenii [Method of experimental definition of destruction energy under cyclic loading]. Zavodskaya laboratoriya – Plant laboratory, 1973, no. 9, pp. 1110–1114.
- Fedorov V.V. Termodinamicheskie aspekty prochnosti i razrusheniya tverdykh tel [Thermodynamic aspects of durability and destruction of solid objects]. Tashkent, Fan Publ., 1979. 167 p.
- Landau L.D., Lifshits E.M. *Teoriya uprugosti* [Theory of elasticity]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 246 p.
- 16. Makhutov N.A., Makarenko I.V., Makarenko L.V. Issledovanie mekhanisma i kinetiki razrusheniya poverkhnostnykh raznoorientirovannykh poluellipticheskikh treshchin pri slozhnom napryazhenno-deformirovannom sostoyanii s pomoshchyu deformatsionnykh kriteriev nelineynoy mekhaniki razrusheniya [Investigation of mechanism and kinetics of destruction of surface different oriented semielliptical cracks under complex tension by deformation criterions of nonlinear destructive mechanics]. Problemy prochnosti – Problems of strength, 2013, no. 4, pp. 91–97.
- Kurilenko G.A. Sposob opredeleniya predela vynoslivosti [The way of definition of endurance limit]. Author Certif. USSR, no. 1499167, 1989.
- Kurilenko G.A. Prognozirovanie tsiklicheckogo resursa detaley s makrotreshchinami termograficheskim metodom [Forecasting the cycle life of components with macrocracks by the thermographic method]. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2012, vol. 321, no. 2, pp. 36–39.
- Kurilenko G. Sovremennoe issledovanie ustalosti metallov s pomoshchyu infrakrasnoy tekhniki [Advanced Infrared examining of metal fatigue]. Sovremennye infrakrasnye tekhnologii i ikh prilozheniya. Trudy Mezhdunarodnoy konferentsii [Proc. of the International Workshop. Advanced Infrared technology and applications). Firenze, 1995. pp. 253–262.
- Kurilenko G.A. Issledovanie treshchinostoykosti metallov termograficheskim metodom [Research of metal crack resistance by thermographic method]. Obrabotka metallov – Work of metals, 2010, no. 3 (48), pp. 41–44.

Received: 27 January 2014.

УДК 548.4.001:621.791.052.08:620.179.16

# ДИАГНОСТИКА ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ СВАРКЕ

## Апасов Александр Михайлович,

доцент кафедры «Металлургия черных металлов» Юргинского технологического института (филиала) Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 652055, г. Юрга, ул. Ленинградская, д. 26. E-mail: mchmyti@rambler.ru

Проведен анализ условий и выявлены причины зарождения дефектов, начиная с уровня кристаллической решетки и заканчивая формированием микротрещины на различных этапах процесса сварки, начиная от нагрева свариваемых кромок и заканчивая кристаллизацией металла сварного шва из аустенитной стали. С учетом математического моделирования установлена генетическая связь вакансий с дефектами более высокого структурного уровня и определены условия их дальнейшего развития вплоть до появления микротрещин. Выявлены дополнительные причины дефектообразования, уточнен механизм разрушения сварных соединений в процессе сварки, и рекомендован акустико-эмиссионный метод его диагностики. Получено аналитическое выражение, связывающее линейные размеры трещины, образующейся при сварке цилиндрических изделий из однородных металлов, с параметрами кристаллизации металла сварного соединения. На основе математического моделирования процесса кристаллизации металла при сварке и микроструктурного анализа установлено, что зарождение трещины начинается в корне сварного шва. При этом длина образующейся трещины тем больше, чем меньше ширина сварного шва, а также чем ниже температура околошовной зоны. С другой стороны, длина образующейся трещины тем меньше, чем шире зона формирования шва и выше температура околошовной зоны. При увеличении температуры подогрева свариваемых кромок длина трещины уменьшается. Для экспериментального исследования было использовано явление акустической эмиссии (АЭ). С целью определения энергетических параметров спектра АЭ при трещинообразовании в процессе сварки был применен многоканальный амплитудный анализатор, с помощью которого получены амплитудные распределения сигналов АЭ от различных составляющих процесса сварки и дефектообразования: производственных шумов, электромагнитных помех, движения сварочной головки, зажигания и горения сварочной дуги, плавления и кристаллизации металла шва, трещинообразования. Было установлено, что разделение сигналов АЭ от процессов плавления, кристаллизации и дефектообразования осуществляется по амплитудному признаку, а селекцию сигналов АЭ от источников зарождающихся трещин производят по числу импульсов АЭ в пределах каждого канала анализатора. Определены условия, не допускающие зарождение трещин.

#### Ключевые слова:

Металлы, железо, дефект, вакансия, гранецентрированная кубическая решетка, объемно-центрированная кубическая решетка, теплоемкость, градиент температуры, свариваемые кромки, кристаллизация, пора, микротрещина, сигнал, акустическая эмиссия.

#### Введение

Несмотря на достигнутый высокий уровень развития технологий в области специального машиностроения, избежать аварий изделий, которые могут приводить к весьма серьезным последствиям, удается не всегда [1, 2]. Отказ в работе или разрушение сварных соединений, являющихся самым слабым звеном конструктивных элементов, практически неизбежно завершают функционирование любого изделия и могут привести к необратимым гуманитарным и экологическим последствиям. Поэтому очень важно уже на этапе технологического процесса изготовления деталей и узлов изделий обеспечить их особое качество в дальнейшем. Основные результаты, полученные при решении данной проблемы, были опубликованы в работах [3-5]. Тем не менее, существует определенная неясность в механизме окончательной трансформации пор в макроскопическую трещину, формирования свободных поверхностей и наступления этапа разрушения. Поэтому есть необходимость в дополнительном изучении процесса разрушения неразъемных соединений при сварке.

Известно, что особое качество может быть достигнуто только при обязательном условии соблюдения высокой степени физической однородности (полное отсутствие дефектов различного структурного уровня), химической однородности (максимальный уровень диспергирования химических элементов и их соединений по всему объему металла) и структурной однородности металлов и сплавов [6]. Это, в свою очередь, будет гарантировать реальным изделиям и конструкциям такие механические, физические, химические и другие свойства, информативные параметры которых будут максимально приближены к их теоретическим значениям.

В связи с этим особое качество изделий закладывается уже на атомном и наноуровне формирования структуры.

Следовательно, основной задачей, решаемой в данной работе, является исследование физической природы источников зарождения, формирования и развития трещин в процессе сварки, который можно подразделить на этапы: нагрев, плавление металла свариваемых кромок и кристаллизация расплавленного металла в канале сварки на примере аустенитных сталей.

## Исследование процесса зарождения и формирования дефектных структур на нано-, микро- и мезоуровнях при сварке

Стали аустенитного класса имеют гранецентрированную кубическую решетку (ГЦК), которая является следствием перекрывания внешних валентных *s*-орбиталей, имеющих строго сферическую симметрию и отвечает наиболее плотному заполнению пространства атомами [7].

Группа  $O_h$  всех преобразований симметрии куба имеет восемь зеркально-поворотных преобразований  $S_6$  и  $S_6^5$ , а также шесть зеркально-поворотных преобразований  $C_4\sigma_h$  и  $C_4^3\sigma_h$  вокруг осей четвертого порядка [8]. При кубической плотной упаковке атомов отсутствуют дефекты в кристаллической решетке и реализуется идеальное отношение

$$c/a = \sqrt{8/3} = 1,6330$$

где c – удвоенное расстояние между плотноупакованными плоскостями [9]; a – кратчайшее расстояние между соседними атомами в слое, равное металлическому диаметру.

На этапе нагрева свариваемых кромок при повышении температуры из-за увеличения амплитуды колебаний атомов происходит тепловое расширение, т. е. увеличение параметра кристаллической решетки. При низких температурах от 0  $^{\circ}$ К до температуры Дебая  $\theta$  тепловое расширение происходит нелинейно. При высоких температурах, от температуры Дебая почти до температуры плавления, увеличение параметра решетки *a*, изменение длины *l* и объема *V* имеют для большинства металлов линейный характер (рис. 1) [10].

Амплитуда колебаний атомов до температуры  $\theta$  пропорциональна  $T^3$ , а выше  $\theta$  соответствует уравнению

$$A = \sqrt{kT / Ed_{\rm met}},$$

где  $d_{\text{мет}}$  – межатомное расстояние.

Увеличение параметра *a*, длины *l* и объема *V* металла свариваемых кромок с повышением температуры отвечает формулам:

$$a = a_0 T$$
,  $l = l_0 + (1 + \alpha T)$ ,  $V = V_0 + (1 + \beta T)$ ,

где β≈3α.

При приближении к температуре плавления параметр решетки продолжает возрастать линейно, а длина и объем металла увеличиваются ускоренно за счет повышения числа вакансий. Равновесная концентрация вакансий определяется выражением

$$C_{v} = 3[(\Delta l / l) - (\Delta a / a)].$$

Для чистых металлов равновесная концентрация вакансий повышается с возрастанием температуры и перед плавлением достигает 0,02–0,1 %.

Изменение теплоемкости металлов при низких температурах имеет нелинейный характер (рис. 2).

Основываясь на модели независимых гармонических колебаний атомов в кристаллической решетке, А. Эйнштейн получил следующую формулу для средней энергии осциллятора

$$\bar{E} = h\nu / (e^{h\nu/kT} - 1).$$



**Рис. 1.** Изменение объёма металла при повышении температуры

Fig. 1. Change in metal volume at temperature rise



температуры

Fig. 2. Change in metal heat capacity at temperature rise

Формула характеризует возрастание теплоем-

кости  $C_v$  по экспоненте  $e^{-kT}$  в области низких температур (от 0 °К до  $\theta_E$ ) и асимптотическое приближение  $C_v$  к теоретическому значению  $C_v=3R\cong 6$  кал/моль-град (закон Дюлонга-Пти) в области высоких температур, когда  $\overline{E}\cong kT$ .

Более точное изменение теплоемкости описывает модель Дебая. По Дебаю, при низких температурах, когда происходит возбуждение длинноволновых акустических фононов,

$$C_{v} = 234 N k (T / \theta)^{3}.$$

Таким образом, теплоемкость возрастает пропорционально  $T^3$  При высоких температурах теплоемкость возрастает пропорционально E, приближаясь к теоретическому значению 3R.

При плавлении металла свариваемых кромок межатомное расстояние почти не изменяется. Следовательно, можно считать, что приращение объема при плавлении происходит исключительно за счет повышения концентрации вакансий, т. е.  $\Delta C_{\rm nn}^{v} \approx \Delta V_{\rm nn}$ . Температуру плавления можно считать критической температурой  $T_{\rm кp}$ , при которой амплитуда колебаний и их энергия в решетке достигают критического значения, при котором начинается массовое «выскакивание» атомов из узлов и образование пар вакансия – внедренный атом.

Если известны энергии образования вакансий  $E_{f}^{v}$  и внедренного атома  $E_{f}^{i}$ , а также увеличение концентраций вакансий или электронных пар при плавлении  $\Delta C_{nn}^{v} = \Delta V_{nn}$ , то теплота плавления должна быть равна

$$\Delta H_{\rm nn} = \Delta C_{\rm nn} (E_f^{\nu} + E_f^{i}).$$

Для железа  $\Delta V=4,0$  %,  $E_{j}^{\nu}=1,14$  эв и  $E_{j}^{\mu}=2,5$  эв. Расчетное значение теплоты плавления железа  $\Delta H_{n\pi}^{\mu}=0,1456$  эв=3,54 ккал/г·ат. Экспериментальное значение  $\Delta H_{n}^{\mu}=3,63$  ккал/г·ат. Близость расчетных и экспериментальных значений теплоты плавления подтверждает правильность гипотезы о том, что увеличение объема при плавлении происходит в основном из-за образования вакансий, т. е. что  $\Delta C_{n\pi}^{\nu}=\Delta V_{n\pi}$ .

С переходом состояния жидкого металла от  $T_{\rm пл}$  до  $T_{\rm кип}$  объем возрастает почти линейно, причем несколько быстрее, чем в твердом состоянии [10]. Так как амплитуда тепловых колебаний атомов в жидком металле также должна линейно зависеть от температуры, возможное возрастание межатомного расстояния  $d_{\rm мет}$ , или радиуса первой координационной сферы в упорядоченной жидкости, можно считать экстраполяцией теплового расширения решетки и возрастания  $d_{\rm мет}$  в твердом состоянии (рис. 1). Если известен объем жидкого металла при  $T_{\rm пл}$  и  $T_{\rm кип}$ , то можно определить повышение средней равновесной концентрации вакансий при нагреве жидкого металла до  $T_{\rm кип}$ .

Оценим размеры кластера, образующегося при плавлении металлов. При этом предполагается, что увеличение концентрации вакансий при плавлении  $\Delta C_{n\pi}^v = \Delta V_{n\pi}$ . Изменение объема металлов при плавлении в среднем составляет 2–3 %. Из данных, представленных на рис. 3, следует, что концентрация вакансий c=2-3 % при их равномерном распределении достигается в кластере радиусом 3–4 координационные сферы, содержащем 40–55 атомов. Это соответствует минимальному радиусу кластера, равному двум металлическим диаметрам ( $d_{wer}$ ).

Вакансии мигрируют из объема кластеров на периферию, образуя неупорядоченную жидкость с высокой концентрацией вакансий. Внутри кластеров сохраняется ближний порядок, отвечающий кристаллической структуре металла. Следовательно, после плавления металлы представляют собой двухкомпонентную жидкость, в которой около половины атомов находятся в кластерах с упорядоченной структурой, а остальной объем представляет неупорядоченную жидкость (рис. 3).

Правильность данной модели жидкого металла подтверждается резким (в 1,5–3 раза) увеличением электросопротивления и таким же падением теплопроводности при плавлении оболочек неупорядоченной жидкости, окружающих сферически упорядоченные зоны, т. е. кластеры.



**Рис. 3.** Концентрация вакансий в кластере в зависимости от его радиуса

#### Fig. 3. Hole concentration in cluster depending on its radius

При  $T_{\text{ил}}$  теплоемкость  $C_p \rightarrow \infty$  из-за затрат энергии на образование пар вакансия – внедренный атом. Теплоемкость металла после плавления обычно меньше, хотя для ряда металлов  $C_{p_{\pi}} > C_{p_{\pi}}$ , чем перед плавлением. При дальнейшем повышении температуры теплоемкость большинства металлов понижается, а затем вновь возрастает. Сложный ход изменения теплоемкости можно связать с различным поглощением тепла кластерами и вакансионной жидкостью, доля которой возрастает с повышением температуры.

Исследованию структуры жидких металлов и сплавов посвящено большое число работ, в частности обобщенных в монографиях [11–15]. Поскольку кристаллическая структура металлов возникает вследствие множественного перекрывания валентных орбиталей и образования металлических связей, то следует ожидать, что после плавления атомы сохранят в основном свое электронное строение, и перекрывание внешних валентных орбиталей приведет к определенному ближнему порядку расплава.

Железо имеет объемно-центрированную кубическую (ОЦК) высокотемпературную модификацию перед плавлением ( $\delta$ -Fe). Она возникает при высоких температурах вследствие расщепления и перекрывания  $3d^6$  оболочек. Поскольку дальнейшее возбуждение расщепленных  $3d^6$  оболочек железа невозможно из-за больших затрат энергии на отрыв или коллективизацию электронов заполненных  $3d^6$  оболочек ( $\Delta E_{\rm Fe}=J_{3d}-J_{4S}=14,5$  эв), при плавлении железо должно сохранять ОЦК ближний порядок и только при сильном перегреве жидкости (на 150–200 °С) могут переходить в почти полностью неупорядоченную жидкость. Плавле

ние железа с сохранением ОЦК-структуры было предположено в работе [16]. Экспериментально по изменению плотности и других свойств авторами был обнаружен структурный переход в жидком железе при 1650–1700 °С, истолкованный как переход  $\mathcal{H}_{\text{опк}} \rightarrow \mathcal{H}_{\text{гпк}}$ .

Исследования магнитной восприимчивости показали, что жидкое железо, переохлажденное в область устойчивости  $\gamma$ -Fe (910–1392 °C), всегда кристаллизуется не в ГЦК  $\gamma$ -фазу, а в ОЦК  $\delta$ -фазу, переходящую в  $\gamma$ -фазу при дальнейшем охлаждении [17].

В процессе кристаллизации расплавленного металла свариваемых кромок кластеры, имеющие внутреннее кристаллическое строение и ближний порядок, в процессе кристаллизации выделяются из двухкомпонентной жидкости и выстраиваются в направлении, противоположном максимальному температурному градиенту [18]. Жидкость с высокой концентрацией вакансий, перемещаясь впереди обоих фронтов кристаллизации, вытесняется в центральную часть сварного шва. Вакансии, соединяясь между собой линейно или в плоскости, образуют поры и частично дислокации [19]. Большая же часть вакансий по Б.Я. Пинесу [20] распределена в объеме кристаллизующегося металла неравномерно. Их больше около поры и меньше вдали от поры. При этом концентрация вакансий вблизи поверхности поры и радиус поры связаны соотношением

$$\zeta_r = \zeta_0 + \alpha / r, \tag{1}$$

где  $\alpha = (2\sigma/kT)(\Omega\zeta_0); \zeta_r - концентрация вакансий у поверхности поры; <math>\zeta_0$  – равновесная концентрация вакансий; r – радиус кривизны поры;  $\sigma$  – поверхностное натяжение; k – постоянная Больцмана; T – температура, °К;  $\Omega$  – атомный объем.

В состоянии равновесия в конденсированном теле распределение вакансий описывается согласно уравнению

$$N_{\rm B} = N_0 \exp(-U_{\rm B} / kT),$$
 (2)

где  $N_{\rm B}$  – количество вакантных узлов;  $N_{\rm 0}$  – количество всех узлов;  $U_{\rm B}$  – энергия образования вакансий.

Из уравнения (2) следует, что

$$\xi_0 = N_{\rm B} / N_0 = \exp(-U_{\rm B} / kT),$$

где  $\zeta_0$  – равновесная концентрация вакансий.

Величина энергии образования вакансии может быть оценена с помощью простейшей модели, согласно которой энергия образования вакансии расходуется на создание ее поверхности, т. е.

$$U_{\rm B} \cong 4\pi r_{\rm B}^2 \sigma$$
,

где  $\sigma$  – поверхностная энергия твердого (конденсированного) тела при температуре  $T_i$  (°К), дин/см;  $r_{\rm B}$  – радиус вакансии, см.

Изменение радиуса пор со временем выражается уравнением

$$dr / d\tau = (D_{\rm B} / r)(\Delta - \alpha / r), \tag{3}$$

где  $D_{\rm B}$  – коэффициент диффузии вакансий;  $\tau$  – время, сек;  $\Delta$  – пересыщение концентрации вакансий;

$$\Delta r = \zeta_r - \zeta_0. \tag{4}$$

Из формул (1) и (4) следует, что пересыщение вакансий вблизи пор радиуса *r<sub>i</sub>* равно

$$\Delta r_i = \frac{2\sigma}{r_i} \frac{\Omega}{kT} \zeta_0.$$

При каждом пересыщении есть такие поры, которые находятся в равновесии с вакансиями в кристаллической решетке и с течением времени не изменяют своих размеров, т. е. для них уравнение (3) имеет вид

$$dr \,/\, d\tau = 0. \tag{5}$$

Решая уравнение (3) при условии (5), находим радиус равновесных пор

$$r^* = \frac{2\sigma\Omega}{kT} \frac{\zeta_0}{\Delta}.$$
 (6)

Из соотношения (6) следует, что при условии  $r > r^*$  пора растет, при  $r < r^*$  пора растворяется или поглощается более крупными порами, при  $r = r^*$  пора находится в состоянии равновесия с концентрацией вакансий и не изменяет своих размеров. Другими словами, «...среднее пресыщение вакансиями не должно существенно сказываться на кинетике диффузионного зарастания пор в субмикронеоднородных телах...» [21]. Следовательно, для протекания процесса коалесценции пор при кристаллизации металла необходима вполне определенная величина пресыщения вакансий [21].

Приведенные уравнения позволяют рассчитать процесс коалесценции пор и предвидеть направление изменения их размеров. Уравнения справедливы при отсутствии внешней нагрузки, так как она уменьшает коалесценцию.

В дальнейшем процесс слияния и увеличения размеров пор может быть следствием непосредственного движения пор при росте кристаллов в процессе кристаллизации. Схема такого перемещения показана на рис. 4.



- **Рис. 4.** Схема слияния (столкновения) пор, движущихся вместе с границами кристаллов
- Fig. 4. Diagram of coalescence (collision) of pores moving with crystal boundaries

# Анализ процесса разрушения сварного соединения на макроуровне

Одной из главных причин, снижающих технологическую прочность изделий, являются трещины, образующиеся при сварке. В качестве адекватной модели трещинообразования рассмотрен процесс сварки реальных изделий, сварной шов которых формируется без присадочного материала только за счет расплавления металла свариваемых кромок и является поэтому однородным. В связи с этим представляют определенный интерес ответы на следующие вопросы:

- 1. Где и каким образом зарождаются трещины при сварке?
- Как размеры образующейся трещины зависят от параметров кристаллизации металла сварного шва?
- 3. Каковы условия предотвращения трещин?

Для получения исчерпывающего ответа на поставленные вопросы рассмотрим (рис. 5) процессы сварки и кристаллизации металла сварного шва изделия из однородного металла с толщиной стенки  $\delta$  с учетом интенсивного отвода тепла из околошовной зоны. Такая постановка задачи имеет наибольшую практическую ценность.



**Рис. 5.** Схема кристаллизации металла в поперечном сечении сварного шва: 1 – зона сплавления; 2 – столбчатый кристалл

В первый момент времени после начала сварки имеет место резкий температурный скачок: от температуры жидкого металла в зоне формирования шва до температуры охлажденных в результате теплоотвода кромок деталей [22]. По границе сплавления с основным металлом – 1 (рис. 5) группируются беспорядочно ориентированные в двухкомпонентной жидкости центры кристаллизации (кластеры, имеющие внутреннее кристаллическое строение и ближний порядок), образуя сплошной слой, из-за интенсивного охлаждения околошовной зоны. Эти центры начинают расти и продвигаться внутрь расплава металла с двух сторон сварного шва, образуя монокристаллы. Перед фронтом кристаллизации монокристаллов перемещается неупорядоченная жидкость с высокой концентрацией вакансий, которая вытесняется в центральную часть сварного шва. Вакансии сливаются в би-, три-, тетравакансии, образуют поры, сначала субмикроскопические, а затем и более крупные. Так как теплопроводность монокристаллов неодинакова по различным направлениям, то очевидно, что из всех центров, появившихся на границе сплавления, быстрее всего растут те кристаллы, у которых направление наибольшей теплопроводности совпадает с максимальным температурным градиентом, т. е. перпендикулярно к границе сплавления. Эти кристаллы распространяются в расплав в виде столбцов. Получающаяся при этом картина схематически представлена на рис. 5. В зоне соприкосновения противоположно растущих столбчатых кристаллов – 2 (рис. 5) образуются неплотности в виде пор.

Так как концентрация вакансий обратно пропорциональна радиусу поры, то возникает направленный диффузионный поток вакансий от поверхности мелких к поверхности крупных пор, увеличивающий объем последних, поскольку свободная энергия системы убывает вследствие уменьшения поверхности пор при увеличении их размеров, а сама система переходит из возбужденного состояния в стационарное. Это положение подтверждается также В.И. Бетехтиным и А.Г. Кадомцевым в работе [23], где стоком для вакансий будут несплошности более крупного размера (под несплошностями авторы понимают поры и трещины). Следует напомнить, что согласно классификации дефектов [23], микротрещинами называют трещины, по длине равные поперечному размеру одного или нескольких зерен (10-100 мкм).

Согласно теории Ф. Макклинтока [24] и с учетом релаксации термоупругих напряжений при кристаллизации металла сварного соединения происходит дальнейший рост размеров пор и их последующее слияние в процессе перехода системы из возбужденного в стационарное состояние. Это приводит к постепенному формированию источников свободных поверхностей с образованием микротрещины, которая трансформируется в трещину. Она является впоследствие причиной разрушения сварного шва. Трещина зарождается и начинает подрастать в корне шва, постепенно распространяясь вдоль осевой линии поперечного сечения сварного соединения.

Установим математическую зависимость линейных размеров трещины от параметров процесса кристаллизации металла сварного шва.

Возьмем грань кристаллита с площадью s(рис. 5) на границе зоны сплавления, проведем ось x перпендикулярно к этой грани и обозначим через v скорость роста этой грани. В течение малого промежутка времени  $d\tau$  на грани нарастает слой толщиной dx, причем

$$dx = v d\tau. \tag{7}$$

Обозначим через  $\rho$  теплоту кристаллизации,  $\gamma$ плотность кристаллита. В течение промежутка времени  $d\tau$  из жидкого состояния при температуре кристаллизации объём  $dV = s \cdot dx$  или масса  $dM = \gamma dV = \gamma s \cdot dx$  перейдут в твердое состояние.

С учетом формулы (7) вследствие такого перехода выделяется количество теплоты плавления и затвердевания, равное

$$dQ_1 = \rho dM = \rho \gamma s dx \tag{8}$$

или, исходя из соотношения (8), получим

*Fig. 5.* Scheme of metal crystallization in welded joint cross section: 1 – weld area; 2 – column crystal

$$dQ_1 = \rho \gamma \, svd \, \tau. \tag{9}$$

При кристаллизации теплота отводится преимущественно от грани кристаллита через границу сплавления в основной металл. Если обозначим через  $\lambda$  коэффициент теплопроводности кристаллита в направлении, перпендикулярном к растущей грани, а через  $\frac{dT}{dx}$  – температурный градиент, то согласно уравнению Фурье количество теплоты, отводимой вследствие теплопроводности, равно

 $dQ_2 = \lambda s \frac{dT}{dx} d\tau.$  (10)

Так как необходимым условием кристаллизации со скоростью v является  $dQ_1=dQ_2$ , то из (9) и (10) имеем

$$\rho\gamma svd\tau = \lambda s \frac{dT}{dx} d\tau, \qquad (11)$$

откуда, при соблюдении условия (11), следует

$$v = \frac{\lambda}{\rho \gamma} \frac{dT}{dx}.$$
 (12)

При условии постоянства времени кристаллизации, равного  $\tau = \tau_{xp}$ , формулу (12) можно представить в виде (рис. 6)

$$v = \frac{x}{\tau} = \frac{x}{\tau_{\rm Kp}} = \frac{\lambda}{\rho\gamma} \frac{dT}{dx}.$$
 (13)



Рис. 6. Геометрическое представление поперечного сечения сварного шва: φ – угол наклона линии сплавления к осевой линии поперечного сечения сварного шва, град; I – длина кристаллита, м; L – длина трещины, м

**Fig. 6.** Geometrical representation of welded joint cross section: φ is the work angle of a weld line to a center line of a welded joint cross section, deg.; I is the crystal length, m; L is the crack length, m

Из соотношения (13) следует, что

$$x\frac{dx}{\tau_{\rm KP}} = \lambda \frac{dT}{\rho\gamma} \tag{14}$$

или с учетом формулы (14) имеем

$$\frac{1}{\tau_{\rm kp}} \int_{0}^{t} x dx = \frac{\lambda}{\rho \gamma} \int_{T_0}^{T_{\rm kp}} dT, \qquad (15)$$

где l – длина кристаллита, м;  $T_0$  – температура на границе сплавления с основным металлом, °C;  $T_{\rm sp}$  – температура кристаллизации, °C.

После интегрирования соотношения (15) получим:

$$\frac{l^2}{2\tau_{\rm mr}} = \frac{\lambda(T_{\rm kp} - T_0)}{\rho\gamma}.$$

Следовательно

$$l = \sqrt{\frac{2\lambda\tau_{\rm kp}(T_{\rm kp} - T_0)}{\rho\gamma}}.$$
 (16)

Тогда линейный размер трещины с учетом формулы (16) определится следующим образом (рис. 6):

$$L = \frac{l}{\sin\varphi} = \frac{1}{\sin\varphi} \sqrt{\frac{2\lambda\tau_{\rm kp}(T_{\rm kp}T_0)}{\rho\gamma}},$$
 (17)

где  $\varphi$  – угол наклона линии сплавления к осевой линии поперечного сечения сварного шва, град.

Из формулы (17) следует, что длина образующейся трещины

1) тем больше, чем меньше угол  $\varphi$ , т. е. чем меньше ширина сварного шва, а также чем ниже температура околошовной зоны  $T_0$ ;

2) тем меньше, чем шире зона формирования шва и выше температура околошовной зоны  $T_0$ . При увеличении температуры подогрева свариваемых кромок длина трещины уменьшается и при  $T_0=T_{\rm кр}$  последняя отсутствует вообще.

## Обсуждение результатов эксперимента, анализа сигналов акустической эмиссии от источников зарождения, формирования и развития трещин при сварке и микроструктуры в области трещинообразования

Процесс трещинообразования сварного соединения [25] в результате охлаждения околошовной зоны жидким азотом (с целью получения максимального значения градиента температур) при сварке характеризуется резким увеличением числа импульсов акустической эмиссии (АЭ) в 70-80 каналах амплитудного анализатора (рис. 7). Это свидетельствует об очень высокой энергетике процесса зарождения, развития и формирования трещин по сравнению с плавлением и кристаллизацией металла при сварке

Максимальное число импульсов АЭ N=606, амплитуда которых равна 356,24 мВ, приходится на 73 канал [25]. На рис. 8 представлено амплитудное распределение сигналов АЭ от процессов плавления и кристаллизации металла в канале сварки, характеризующих качественно сформированный сварной шов.

Наличие трещин в сварном шве подтверждено металлографическими исследованиями [25]. На рис. 9 и 10 представлены фотографии микроструктуры стали 08Х18Н10Т с трещиной в корне сварного шва при различном увеличении, выполненные с экрана австрийского микроскопа фирмы «REICHERT», а на рис. 11 – фотография той же трещины, наблюдаемой в сканирующем растровом электронном микроскопе РЭМ-200.

Для того чтобы произвести селекцию сигналов АЭ при сварке от электромагнитных помех, шума от истечения защитного газа аргона из гоNΣ

N<sub>Σ</sub>



**Рис. 7.** Амплитудное распределение сигналов АЭ от трещинообразования при сварке в результате охлаждения околошовной зоны жидким азотом. Время цикла 55,5 с (2 об.). L<sub>лат</sub>=240 мм, I<sub>са</sub>=40А





1 3 5 7 9 11 13 15 17 19 21 25 25 27 29 51 55 55 57 59 41 45 45 47 49 51 55 55 57 59 01 05 05 07 09 11 15 15 17 19 81 Номер канала

**Рис. 8.** Амплитудное распределение сигналов АЭ в зависимости от величины тока сварки  $I_{ca}$ . Время цикла 55,5 с (2 об.).  $L_{par}=240 \text{ мм}, I_{ca}=46A$ 

**Fig. 8.** Amplitude distribution of acoustic emission signals depending on welding current value  $I_{weld}$ . Cycle time is 55,5 s (2 rev.).  $L_{sens}$ =240 mm,  $I_{weld}$ =46A

релки, шумов от механического движения сварочной головки, процессов плавления и кристаллизации металла шва, зарождения и развития трещин, параметры режима сварки были максимально унифицированы: датчик АЭ устанавливался на расстоянии 240 мм от шва, время цикла составило 55,5 с (2 оборота сварочной головки ГНС-70М). При этих равных условиях выяснилось, что разделение сигналов АЭ при сварке от сопровождающих помех, шумов, процессов плавления, кристаллизации и дефектообразования осуществляется по амплитудному признаку. Регистрация параметров сигналов АЭ на ИАС-4 проводилась в диапазоне частот от 0,1 до 1,0 мГц с порогом дискриминации на уровне собственных шумов аппаратуры. Скорость протяжки ленты соответствовала 2,5 м/с.

Следует отметить, что параллельно сигнал со входа измерителя акустических сигналов ИАС-4 поступал на анализатор спектра СК4–59, с экрана которого осуществлялась скоростная съёмка сигнала с помощью регистрирующей фотокамеры РФК-5 со скоростью 9 кадров в секунду [25]. Из проведенного анализа кинограмм видеоимпульсов следует, что наиболее вероятный диапазон частот сигналов АЭ от возникающих трещин лежит в интервале 400–700 кГц.

Решение поставленной задачи позволило в дальнейшем на основе полученных теоретических и опытных данных разработать метод [26], основанный на приеме и разделении суммарного сигнала акустической эмиссии (АЭ), несущего информацию о возникающих дефектах, на сигналы АЭ, характеризующие источники зарождающихся непроваров и трещин. На основе сформированных в реальном масштабе времени управляющих сигналов образующиеся в процессе сварки зоны непроваров через систему обратной связи дополнительно проплавляют, а источники уже зарождающейся трещины в процессе сварки уничтожают мощным импульсом излучения оптического квантового генератора.



**Рис. 9.** Микроструктура стали 08X18H10T с трещиной в корне сварного шва

*Fig. 9.* Microstructure of 08X18H10T steel with a crack in welded joint root

Использование разработанной технологии позволит:

- оперативно проводить контроль качества сварных швов в процессе сварки в реальном масштабе времени;
- получать бездефектные сварные соединения.



**Рис. 10.** Микроструктура стали 08X18H10T с трещиной в корне сварного шва

Fig. 10. Microstructure of 08X18H10T steel with a crack in welded joint root



**Рис. 11.** Микроструктура стали 08X18H10T с трещиной в корне сварного шва: в режиме с модуляцией; микроскоп РЭМ-200

*Fig. 11.* Microstructure of 08X18H10T steel with a crack in welded joint root: in the mode with modulation; microscope *REM-200* 

#### Выводы

Диагностика процесса зарождения, формирования и развития дефектов, проведенная от уровня кристаллической решетки вплоть до возникновения макротрещин на стадиях нагрева, плавления и кристаллизации металла шва

- установила факт, что перед фронтом кристаллизации монокристаллов (столбчатых кристаллов) перемещается неупорядоченная жидкость с высокой концентрацией вакансий, которая вытесняется в центральную часть сварного шва. Вакансии сливаются в би-, три-, тетравакансии, образуют поры, сначала субмикроскопические, а затем и более крупные;
- 2) уточнила механизм разрушения сварных соединений в процессе сварки, согласно которому

зародышевые микронесплошности (поры) являются следствием протекания направленного диффузионного потока вакансий от поверхности мелких к поверхности крупных пор при кристаллизации металла сварного шва;

- позволила сделать заключение о том, что релаксации термоупругих напряжений, возникающих при сварке, на растущих порах в результате их коалесценции, приводит к зарождению микротрещин, перерастающих впоследствие в макротрещины;
- констатировала, что длина образующейся макротрещины тем меньше, чем шире зона формирования шва и выше температура околошовной зоны T<sub>0</sub>. При увеличении температуры подогрева свариваемых кромок длина трещины уменьшается и при T<sub>0</sub>=T<sub>кр</sub> последняя отсутствует вообще;
- выявила, что разделение сигналов акустической эмиссии, возникающих при автоматической аргонодуговой сварке изделий из аусте-

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Патон Б.Е. Об основных направлениях работ в области акустической эмиссии // Акустическая эмиссия материалов и конструкций: 1 Всесоюзная конф. Ростов на Дону, 1989. Ч. 1. – С. 5–10.
- Акимова Т.А. Техногенные аварии и катастрофы // Энергия: экономика, техника, экология. – 2009. – № 5. – С. 22–26.
- Апасов А.М., Апасов А.А. Связь дефектов различного структурного уровня с фазовыми переходами при сварке аустенитных сталей // Изв. вузов. Физика. – 2000. – Т. 43. – № 11. – С. 15–19.
- Апасов А.М. Механизм разрушения сварных соединений в процессе сварки // Расплавы. – 2001. – № 3. – С. 18–24.
- Апасов А.М. Механизм формирования дефектов различного структурного уровня при сварке изделий из сталей аустенитного класса // Инновации в неразрушающем контроле Sib Test: сб. научных трудов II Всеросс. научно-практ. конф. с Междунар. участием по Инновациям в неразрушающем контроле // под ред. В.А. Клименова. – Томск, 12–17 августа 2013. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – С. 8–15.
- Порядина А.Н., Апасов А.М. К вопросу о получении особо чистых металлов нанокристаллического уровня // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 320. № 2. С. 114–119.
- Григорович В.К. Металлическая связь и структура металлов. М.: Наука, 1988. – 296 с.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. М.: Физматгиз, 1963. – Т. 3. – 704 с.
- Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978. – 791 с.
- Вилсон Д.Р. Структура жидких металлов и сплавов / пер. с англ. под ред. В.М. Глазова. – М.: Металлургия, 1972. – 247 с.
- Скрышевский А.Ф. Структурный анализ жидкостей и аморфных тел. – М.: Высшая школа, 1980. – 328 с.
- Ершов Г.С., Позняк Л.А. Микронеоднородность металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1985. – 214 с.

нитной стали, осуществляется по амплитудному признаку;

- 6) определила, что частотный диапазон импульсов акустической эмиссии от возникающих трещин при сварке изделий из аустенитной стали находится в интервале 400–700 кГц;
- подтвердила соответствие результатов, полученных методами оптической, сканирующей растровой электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа, данным информативных параметров АЭ-контроля того же сварного соединения, характеризующих процесс трещинообразования при сварке;
- 8) обеспечила в дальнейшем на основе полученных теоретических и экспериментальных результатов исходные данные для разработки системы обратной связи, гибко реагирующей на изменения параметров режима сварки, от которых зависит качество сварного соединения, и, тем самым, гарантировала бездефектную технологию сварки.
- Хрущев Б.И. Структура жидких металлов. Ташкент: Фан, 1970. – 112 с.
- Жидкие металлы / пер. с англ. под ред. Р. Эванса, Д. Гринвуда. – М.: Металлургия, 1980. – 392 с.
- Дутчак Я.И. Рентгенография жидких металлов. Львов: Вища школа, 1977. – 162 с.
- Вертман А.А., Самарин А.М. Свойства расплавов железа. М.: Наука, 1969. – 280 с.
- Лякуткин А.В., Григорович В.К., Ивахненко И.С. Исследование фазовых переходов чистого железа методом магнитной восприимчивости // ДАН СССР. 1981. Т. 257. № 2. С. 398–400.
- Апасов А.М. Способ А.М. Апасова исследования трещинообразования в процессе сварки изделий из однородных металлов: Авт. свид. № 1374123; заявка № 4064613, приоритет изобр. от 06.05.1986; опубл. 15.10.1987. – Бюл. № 6. – 173 с.
- Недосека А.Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций. – К.: Изд-во «ИНДПРОМ», 1988. – 640 с.
- Пинес Б.Я. О спекании (в твердой фазе) // Журн. техн. физики. – 1946. – Т. 16. – Вып. 6. – С. 737–743.
- Пинес Б.Я. К вопросу о кинетике спекания в твердой фазе // Физика металлов и металловедение. – 1963. – Т. 16. – № 4. – С. 557–566.
- Апасов А.М. Анализ разрушения сварных соединений в процессе сварки. – Дефектоскопия, 1996. – № 10. – С. 24–30.
- Бетехтин В.И., Кадомцев А.Г. Эволюция микроскопических трещин и пор в нагруженных твердых телах // Физика твердого тела. – 2005. – Т. 47. – Вып. 5. – С. 801–807.
- Макклинток Ф., Аргон А.С. Деформация и разрушение материалов. – М.: Изд-во Мир, 1970. – 443 с.
- Апасов А.М. Активная диагностика разрушения и предотвращение техногенных катастроф. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 216 с.
- 26. Апасов А.М. Метод предотвращения техногенных катастроф // Дефектоскопия. – 2012. – № 2. – С. 21–31.

Поступила 22.05.2014 г.

UDC 548.4.001:621.791.052.08:620.179.16

# DIAGNOSTICS OF WELDED JOINTS FAILURE WHILE WELDING

## Alexander M. Apasov,

Yurga Institute of Technology (Branch) of National Research Tomsk Polytechnic University, 26, Leningradskaya Street, Yurga, 652055, Russia. E-mail: mchmyti@rambler.ru

The author has analyzed and found out the regimes and factors that arouse defect nucleation, starting from the level of crystal lattice and up to the micro cracks at different steps of welding, from heating of welded edges to crystallization of weld seam metal of austenic steel. Due to the methods of mathematical modeling, the genetic linkage of open positions with defects of higher structural range was established, and regimes of their further extension up to the appearance of micro cracks were determined. The author found out additional sources of defects formation, specified the mechanism of welding seam destruction while welding, and recommended an acoustic emission method of its diagnostic. Now it is possible to state the relation of the linear size of cracking arising on welding the cylindrical homogeneous-metal. Mathematical simulation of metal crystallization on welding and microstructural analysis give an insight into the fact that a crack begins in a weld root. The greater the length of a crack is, the smaller the width of the weld and the temperature of a near-welding zone are. On the other hand the smaller the width of a crack is, the greater the welding zone and the temperature of a near-welding zone are. Crack length decreases when preheating temperature of the welded edges grows. Experimentally, by means of acoustic emission (AE), one can study welding and obtain the amplitude distribution of AE signals from cracking against the background of the hindrance accompanying this process.

The multichannel amplitude analyzer was used to measure the energetic parameters of AE spectrum of cracking on welding. The analyzer was used to obtain the amplitude distributions of AE signals from different constituents of welding and defect-formation as the industrial noises, electromagnet hindrance, motion of welded head, ignition and burning of arc, melting and crystallization of the joint weld, cracking. It was determined that AE signals obtained on melting, crystallization and defect formation may be separated by the amplitude criterion. From the other hand, separation of AE signals obtained on crack nucleation is performed by AE pulses number, in the range of each channel of the analyzer. The author found the conditions making cracking impossible.

#### Key words:

Metals, iron, defect, hole, face-centered cubic lattice, body-centered cubic lattice, thermal capacity, thermal gradient, welded surfaces, crystallization, pore, microcrack, signal, acoustic emission.

#### REFERENCES

- Paton B.E. Ob osnovnykh napravleniyakh rabot v oblasti akusticheskoy emissii [The main directions in acoustic emission]. *1 Vsesoyuznaya konferentsiya. Akusticheskaya emissiya materialov i konstruktsiy* [The first All-union conference. Acoustic emission of materials and constructions]. Rostov on Don, 1989. vol. 1, pp. 5–10.
- Akimova T.A. Tekhnogennye avarii i katastrofy [Technogenic accidents and disasters]. *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya,* 2009, no. 5, pp. 22–36.
- Apasov A.M., Apasov A.A. Cvyaz defektov razlichnogo strukturnogo urovnya s fazovymi perekhodami pri svarke austenitnykh staley [Relation of defects of different structural level with phase transfers at welding austenic steel]. *Izvestiya vuzov. Fizika*, 2000, vol. 43, no. 11, pp. 15–19.
- Apasov A.M. Mekhanizm razrusheniya svarnykh soedineniy v protsesse svarki [Mechanism of destructing welded junction at welding]. *Rasplavy*, 2001, no. 3, pp. 18–24.
- 5. Apasov A.M. Mekhanizm formirovaniya defektov razlichnogo strukturnogo urovnya pri svarke izdeliy iz staley austenitnogo klassa [Mechanism of forming defects of different structural level when welding the items of austenic steel]. Sbornik nauchnykh trudov II Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Innovatsii v nerazrushayushchem kontrole Sib Test» [Proc. of scientific papers of the II All-Russian scientific conference with international participation. Innovations in non-destructive control Sib Test]. Tomsk, Publ. house of TPU, 2013. pp. 8–13.
- Poryadina A.N., Apasov A.M. K voprosu o poluchenii osobo chistykh metallov nanokristallichskogo urovnya [On the issue of preparing super-purity metals of nanocrystal level]. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2012, vol. 320, no. 2, pp. 114–119.

- Grigorovich V.K. Metallicheskaya svyaz i struktura metallov [Metallic bond and structure of metalls]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 296 p.
- 8. Landau L.D., Lifshits E.M. Kvantovaya mekhanika [Quantum mechanics]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1963. Vol. 3. 704 p.
- Kittel Ch. Vvedenie v fiziku tverdogo tela [Introduction into solid state physics]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 791 p.
- Vilson D.R. Struktura zhidkikh metallov i splavov [Structure of liquid metals and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1972. 247 p.
- Skryshevskiy A.F. Strukturny analiz zhidkostey i amorfnykh tel [Structural analysis of liquids and atmospheric bodies]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1980. 328 p.
- Ershov G.S., Poznyak L.A. Mikroneodnorodnost metallov i splavov [Microinhomogeniety of metals and alloys]. Moscow, Metallurgiya publ., 1985. 214 p.
- 13. Khrushchev B.I. Struktura zhidkikh metallov [Liquid metal structure]. Tashkent, Fan Publ., 1970. 112 p.
- Zhidkie metally [Liquid metals]. Eds. R. Evans, D. Greenwood. Moscow, Metallurgiya Publ., 1980. 392 p.
- 15. Dutchak Ya.I. *Rentgenografiya zhidkikh metallov* [Radiography of liquid metals]. Lvov, Vysshaya shkola Publ., 1977. 162 p.
- Vertman A.A., Samarin A.M. Svoystva rasplavov zheleza [Properties of iron alloys]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 280 p.
- Lyakutkin A.V., Grigorovich V.K., Ivahknenko I.S. Issledovanie fazovykh perekhodov chistogo zheleza metodom magnitnoy vospriimchivosti [Investigation of phase transfers of pure iron by the magnetic response method]. *DAN SSSR*, 1981, vol. 257, no. 2, pp. 398–400.
- Apasov A.M. Sposob A.M. Apasova issledovaniya treshchinoobrazovaniya v protsesse svarki izdeliy iz odnorodnykh metallov [The method of A.M. Apasov to study crack formation when welding the items of similar metals]. Author's certificate SSSR, no. 1374123, 1987.

- Nedoseka A.Ya. Osnovy rascheta i diagnostiki svarnykh konstruktsiy [Fundamentals of calculating and testing welded constructions]. Kiev, INDPROM Publ., 1988. 640 p.
- Pines B.Ya. O spekanii (v tverdoy faze) [Solid-phase sintering]. Journal of technical physics, 1946, vol. 16, no. 6, pp. 737-743.
- Pines B.Ya. K voprosu o kinetike spekaniya v tverdoy faze [Kinetics of solid-phase sintering]. *Physics of metals and physical metallurgy*, 1963, vol. 16, no. 4, pp. 557–566.
- Apasov A.M. Analysis of failure of welded joints during welding. Russian Journal of Nondestructive Testing, 1996, vol. 32, no. 10, pp. 757-762.
- Betekhtin V.I., Kadomtsev A.G. Evolyutsiya mikroskopicheskikh por v nagruzhennykh tverdykh telakh [Evolution of microscopic pores in loaded solid bodies]. *Solid physics*, 2005, vol. 47, no. 5, pp. 801–807.
- Makklintok F., Argon A.S. Deformatsiya i razrushenie materialov [Deformation and destruction of materials]. Moscow, Mir Publ., 1970. 443 p.
- Apasov A.M. Aktivnaya diagnostika pazrusheniya i predotvrashchenie technogennykh katastrof [Active fracture control and prevention of technogenic disasters]. Tomsk, Publ. house of TPU, 2010. 216 p.
- Apasov A.M. Method for preventing technogenic catastrophes. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2012, vol. 48, no. 2, pp. 90–97.

Received: 22 May 2014.

#### УДК 622.276.66

# МОДЕЛЬ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ПОВТОРНОГО ГРП ОБЪЕКТА ЮВ1 НИВАГАЛЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

## Сабитов Разиль Разимович,

канд. техн. наук, доцент каф. разработки нефтегазовых месторождений Тюменского государственного нефтегазового университета, Россия, 625027, г. Тюмень, ул. 50 лет Октября, 38. E-mail: srr@tsogu.ru

## Швечиков Евгений Дмитриевич,

студент каф. разработки нефтегазовых месторождений Тюменского государственного нефтегазового университета, Россия, 625027, г. Тюмень, ул. 50 лет Октября, 38. E-mail: seversideboy@gmail.com

Для нефтегазодобывающего комплекса России в настоящее время актуальны проблемы увеличения нефтеотдачи и вовлечения в разработку трудноизвлекаемых запасов нефти. На месторождениях Западной Сибири удельный вес залежей, приуроченных к низкопроницаемым и расчлененным коллекторам, составляет около 60 %. С целью вовлечения в разработку недренируемых запасов нефти применяется гидравлический разрыв продуктивного пласта (ГРП). По экспертным оценкам около трети запасов углеводородов можно извлечь только с использованием этой технологии. Так, например, на объекте ЮВ<sub>1</sub> Урьевского месторождения дополнительная добыча нефти за счет ГРП составляет 80,9 % от текущих накопленных отборов нефти. Высокопроводящие трещины гидроразрыва позволяют увеличить дебит скважин в 2–3 раза и более. Также известно, что за период эксплуатации скважин после проведения ГРП значительно снижается проводимость трещин вследствие выноса проппанта и ее постепенного смыкания. Производительности этих скважин восстанавливают путем повторных ГРП. Актуальность работы связана с восстановлением производительности скважин путем проведения повторного ГРП.

**Цель работы:** рассмотреть последовательность действий, необходимых для правильного подбора технологических параметров с учетом конкретных геологических условий скважины на основе линейной регрессии для планирования повторного ГРП объекта ЮВ<sub>1</sub> Нивагальского месторождения, а также получение прогноза показателей эффективности ГРП.

**Методы исследования:** кластерный анализ и метод канонических корреляций с использованием программных пакетов Statgraphics Centurion XV.

**Результаты.** Получены формулы перехода к каноническим переменным, по которым определяется зависимость показателей эффективности ГРП от геолого-технологических условий, а также проведен расчет показателей эффективности на конкретных геолого-технологических данных. С помощью описанной модели принятия решений проведения ГРП можно правильно подбирать наиболее значимые технологические параметры, оказывающие наибольшее влияние на эффективность гидроразрыва пласта.

#### Ключевые слова:

Многомерный статистический анализ, линейная регрессия, метод кластерного анализа, метод канонических корреляций, повторный гидравлический разрыв пласта, объект ЮВ<sub>1</sub>, Нивагальское месторождение.

В настоящее время на месторождениях Западной Сибири активно вовлекаются в разработку трудноизвлекаемые запасы нефти, приуроченные к слабодренируемым, низкопроницаемым и неоднородным коллекторам. Одной из основных задач обеспечения эффективной разработки залежей, с учетом текущей структуры запасов, является интенсификация добычи. Наиболее эффективным методом повышения продуктивности скважин, вскрывающих такие пласты, является гидравлический разрыв пласта. В результате гидравлического разрыва пласта (ГРП) кратно повышается дебит добывающих скважин и приемистость нагнетательных, а также увеличивается конечная нефтеотдача за счет вовлечения в разработку ранее недренируемых зон и пропластков. Эффективность ГРП определяется влиянием комплекса факторов: геологических, технологических, а также состоянием разработки. Поэтому для успешной разработки низкопродуктивных и неоднородных объектов необходим научно-обоснованный подход к выбору скважин под проведение ГРП, учитывающий все факторы, влияющие

на эффективность обработки. За период эксплуатации скважин после проведения первого ГРП значительно снижается проводимость трещин вследствие выноса проппанта и постепенного смыкания трещины. Скважины с проблемами такого рода обладают наибольшим потенциалом для восстановления своей производительности путём повторного ГРП. Исследования и практика применения повторного ГРП показывают, что эффект от проведения повторного гидроразрыва неодинаково проявляется в работе отдельных скважин [1], поэтому необходимо рассматривать не только прирост дебита каждой скважины после ГРП, но и влияние геолого-физических особенностей выбранного объекта. При прогнозировании разработки месторождений с применением ГРП необходимо решать задачи технологической эффективности обработки, а также эффективности ГРП для участка или объекта разработки в целом. Успешно решать поставленные задачи возможно только на основе анализа проведенных ГРП в условиях конкретного нефтегазоносного района или объекта [2–4].

Для планирования повторного ГРП можно использовать следующую модель, основанную на многомерном статистическом анализе, – это метод кластерного анализа, позволяющий разбить весь набор скважин с проведенным ГРП на несколько однородных по статистическим свойствам групп, и метод канонических корреляций (канонический анализ), в котором устанавливаются максимальные корреляционные связи между двумя группами параметров. Далее на основе полученных формул перехода к каноническим переменным можно делать выводы о наиболее значимых параметрах, влияющих на эффективность гидроразрыва пласта [5].

Таблица 1. Средние значения, стандартные отклонения и коэффициенты вариации параметров, используемых в анализе эффективности проведения ГРП по пластам группы ЮВ

Table 1.	Average values, standard deviations and variation	7
	factor of the parameters used in the analysis of re-	-
	fracturing efficiency by the YuV group reservoirs	

Параметр Parameter	Средн. значение Average value	Станд. откл. Standard deviation	Вариа- ция, %, Variation, %
Общая толщина, м Gross pay, m	25,5	3,970	15,57
Нефтенасыщенная толщина, м Net oil pay, m	9,3	3,054	32,84
Нефтенасыщенность, д.ед. Oil saturation, unit fraction	0,59	0,071	12,05
Проницаемость, мД Permeability, mD	6,6	6,107	92,54
Песчанистость, д.ед. Sandiness, unit fraction	0,42	0,139	33,09
Коэф. макронеоднородности, ед./м Macroinhomogeneity ratio, unit/m	0,43	0,205	47,78
Альфа ПС, д.ед. Alpha-PS, unit fraction	0,71	0,126	17,76
Macca проппанта в пласте, т Proppant weight in a reservoir, t	27,1	13,901	51,30
Темп закачки, м³/мин Injection rate, m³/min	3,08	0,813	26,41
Средняя концентрация проппан- та, кг/м <sup>3</sup> Average concentration of prop- pant, kg/m <sup>3</sup>	507	96,073	18,95
Прирост жидкости, т/сут Liquid gain, t/day	17,3	12,667	73,22
Прирост нефти, т/сут Oil gain, t/day	10,6	8,935	84,29

В качестве параметров, характеризующих геологические условия в пластах группы ЮВ, были выбраны следующие: общая и нефтенасыщенная толщины пласта, коэффициент песчанистости, проницаемость, параметр «Альфа-ПС», коэффициент макронеоднородности пласта и нефтенасыщенность. Параметры, характеризующие технологию проведения ГРП: масса проппанта в пласте, темп закачки и средняя концентрация проппанта. В качестве характеристик эффективности проведения ГРП были выбраны приросты дебитов по жидкости и нефти. Средние значения, стандартные отклонения и коэффициенты вариации этих параметров приведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, для большинства параметров характерны большие значения стандартного отклонения и коэффициента вариации, что соответствует сильному разбросу данных относительно средних значений. Кроме того, фактические плотности распределения параметров далеки от стандартного и в ряде случаев имеют несколько максимумов. Это свидетельствует о возможности объединения скважин в группы, в некоторой степени однородные по своим свойствам [6–8].

Таким образом, исследование зависимости эффективности проведения ГРП от геолого-технологических условий может быть проведено как в целом по всей выборке скважин, так и по отдельным группам скважин, выделенным при помощи соответствующих статистических методов [9–14].

Для выделения групп скважин, однородных по своим свойствам, использовался метод *k*-средних [15]. Это один из итерационных методов кластерного анализа, в котором все скважины разбиваются на заранее заданное число групп так, что минимизируется дисперсия переменных внутри каждой группы.

Рассмотрим кратко алгоритм метода «k-средних». Пусть имеется n объектов (скважин), характеризующихся p признаками  $X_i$ , которые необходимо разбить на k групп. Для начала из n точек рассматриваемой совокупности отбираются k точек – первоначальных центров групп. После выбора начальных центров групп выполняется следующая итерационная процедура: из оставшихся n-kобъектов извлекаются по очереди объекты и присоединяются к ближайшему к ним по евклидову расстоянию от центра. Евклидовы расстояния между объектами i и j вычисляются по формуле:

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{l=1}^{p} (x_{il} - x_{jl})^2}, \ i > j, \ i = 1, ..., n,$$
(1)

где  $x_{il}$  – значение *l*-го признака у *i*-го объекта.

После каждого присоединения координаты центра пересчитываются как среднее между его координатами и координатами вновь присоединенного объекта. В конце итерации все объекты присоединены к какому-либо из центров, и получают новые координаты центров. Процедура повторяется, и если новое разбиение объектов на группы не отличается от предыдущего, то работа алгоритма завершается.

Были выделены три группы скважин. Средние значения параметров в каждой группе приведены в табл. 2, а на рис. 1 проиллюстрированы относительные различия параметров в зависимости от группы скважин.

Для выявления зависимости эффекта проведения ГРП от геолого-технологических параметров использовался метод канонических корреляций, который позволяет находить максимальные корреляционные связи между двумя группами параметров.

Суть метода заключается в построении двух новых групп параметров  $GT_i$  и  $E_i$  (канонических переменных), являющихся линейными комбинациями исходных параметров из соответствующей группы.

Таблица 2.	Средние	значения	параметров	ПО	выделенным
	группам				

Параметр		Группа скважин Group of wells		
Palameter	1	2	3	
Общая толщина, м/Gross pay, m	21,2	27,4	26,6	
Нефтенасыщенная толщина, м/Net oil pay, m	9,6	11,5	7,2	
Нефтенасыщенность, д.ед. Oil saturation, unit fraction	0,64	0,6	0,55	
Проницаемость, мД/Permeability, mD	3	12,2	4,3	
Песчанистость, д.ед./Sandiness, unit fraction	0,49	0,5	0,31	
Коэф. макронеоднородности, ед./м Macroinhomogeneity ratio, unit/m	0,32	0,38	0,54	
Альфа ПС, д.ед./Alpha-PS, unit fraction	0,79	0,77	0,62	
Macca проппанта в пласте, т Proppant weight in a reservoir, t	41,6	18,4	24,7	
Темп закачки, м³/мин/Injection rate, m³/min	3	3,6	2,8	
Средняя концентрация проппанта, кг/м <sup>3</sup> Average concentration of proppant, kg/m <sup>3</sup>	601	487	463	
Прирост жидкости, т/сут/Liquid gain, t/day	16,4	25,2	11,3	
Прирост нефти, т/сут/Oil gain, t/day	11,2	14,1	7,2	

 Table 2.
 Average values of parameters by the selected groups

При этом коэффициенты при исходных параметрах в линейных комбинациях подбираются так, чтобы корреляция в каждой паре канонических переменных была максимальной.



**Рис. 1.** Нормированные средние значения параметров в группах

Fig. 1. Specified average values of parameters in groups

Рассмотрим результаты канонического корреляционного анализа эффективности проведения ГРП на пластах группы ЮВ. Изначально были выбраны следующие параметры:

- множество геологических параметров G: нефтенасыщенность S<sub>H</sub>, общая толщина пласта h<sub>ofm</sub>, нефтенасыщенная толщина пласта h<sub>HH</sub>, проницаемость k, песчанистость p, макронеоднородность K<sub>M</sub>, параметр «Альфа-ПС» α<sub>nc</sub>;
- множество технологических параметров Т: масса проппанта в пласте *m*, средняя концентрация проппанта в пласте *M*, темп закачки *Q*;
- множество параметров, характеризующих эф-

**Таблица 3.** Результаты канонического анализа по геолого-технологическим параметрам и показателям эффективности ГРП на пластах группы ЮВ

**Table 3.**Results of canonical analysis by geological and technological parameters and efficiency factors of re-fracturing on the YuV<br/>group reservoirs

№ пары ка- нонической переменной Canonic vari- able pair	Каноничес- кая корре- ляция Canonical correlation	Формула перехода к каноническим переменным Formula of conversion to canonic variables	Уравнение линейной регрессии Equation of linear regression	
		Группа № 1/Group no. 1		
1	0,91	$\begin{aligned} GT_1 &= -0.98\alpha + 0.75k - 0.53M - 0.44m - 0.33h_{\mathrm{o}6\mathrm{u}\mathrm{u}} - 0.27S_H - 0.22p - 0.09Q + 0.04K_\mathrm{M} + 0.04h_\mathrm{HH} \\ & E_1 &= -1.36\DeltaQ_\mathrm{H} + 1.13\DeltaQ_\mathrm{X} \end{aligned}$	<i>E</i> <sub>1</sub> =0,91 <i>GT</i> <sub>1</sub>	
2	0,62	GT <sub>2</sub> =0,25 <i>α</i> -0,32 <i>k</i> -0,08 <i>M</i> +0,54 <i>m</i> -0,16 <i>h</i> <sub>общ</sub> +0,77 <i>S</i> <sub>H</sub> +1,35 <i>p</i> -0,03 <i>Q</i> -0,18 <i>K</i> <sub>M</sub> -1,25 <i>h</i> <sub>нн</sub> E <sub>2</sub> =0,25Δ <i>Q</i> <sub>H</sub> +0,81Δ <i>Q</i> <sub>ж</sub>	<i>E</i> <sub>2</sub> =0,62 <i>GT</i> <sub>2</sub>	
Группа № 2/Group no. 2				
1	0,75	$GT_{1}=0,85m+0,81k-0,72\alpha-0,61M-0,54p+0,36S_{H}-0,33K_{M}+0,33Q+0,24h_{HH}+0,03h_{o6iij}$ $E_{1}=1,24\Delta Q_{k}-0,43\Delta Q_{H}$	$E_1 = 0,75 GT_1$	
2	0,71	GT <sub>2</sub> =0,4 <i>m</i> +0,22 <i>k</i> -0,12α+0,03M-0,71 <i>p</i> -0,45 <i>S</i> <sub>H</sub> +0,11 <i>K</i> <sub>M</sub> -0,18 <i>Q</i> -0,21 <i>h</i> <sub>HH</sub> +0,08 <i>h</i> <sub>общ</sub> E <sub>2</sub> =0,56Δ <i>Q</i> <sub>K</sub> -1,29Δ <i>Q</i> <sub>H</sub>	E <sub>2</sub> =0,71GT <sub>2</sub>	
Группа № 3/Group no. 3				
1	0,69	$GT_1 = -1,01\alpha - 0,75M + 0,73m + 0,7S_H + 0,5k + 0,5p + 0,16K_M - 0,15h_{HH} - 0,11h_{o6\mu} - 0,03Q$ $E_1 = 1,14\Delta Q_{\rm w} - 0,27\Delta Q_{\rm H}$	<i>E</i> <sub>1</sub> =0,69 <i>GT</i> <sub>1</sub>	
2	0,58	GT <sub>2</sub> =0,31α-0,5M+0,36 <i>m</i> -0,73 <i>S</i> <sub>H</sub> +0,56 <i>k</i> -0,5 <i>p</i> +0,13 <i>K</i> <sub>M</sub> +0,14 <i>h</i> <sub>HH</sub> -0,03 <i>h</i> <sub>общ</sub> +0,54 <i>Q</i> E <sub>2</sub> =0,55Δ <i>Q</i> <sub>ж</sub> -1,24Δ <i>Q</i> <sub>H</sub>	$E_2 = 0,58 GT_2$	



Рис. 2. Графики линейной регрессии для пар канонических переменных группы № 1
 Fig. 2. Plots of linear regression for pairs of canonic variables of group no. 1



Рис. 3. Графики линейной регрессии для пар канонических переменных группы № 2

Fig. 3. Plots of linear regression for pairs of canonic variables of group no. 2



Рис. 4. Графики линейной регрессии для пар канонических переменных группы № 3

Fig. 4. Plots of linear regression for pairs of canonic variables of group no. 3

фективность ГРП, Е: прирост дебита жидкости  $\Delta O_*$  и прирост дебита нефти  $\Delta O_*$ .

Значения канонических корреляций и формулы перехода к каноническим переменным приведены в табл. 3. Графики линейной регрессии для пар канонических переменных приведены на рис. 2–4. Отметим, что в полученных группах скважин множества не имеет статистически значимую корреляцию на 95,0 % уровне достоверности (значения P-value в каждой из групп больше 0,05).

Таким образом, основное влияние на эффективность ГРП первой группы скважин оказывают следующие параметры (в порядке ослабления влияния): параметр «Альфа-ПС», проницаемость, средняя концентрация проппанта, масса проппанта, общая толщина пласта, нефтенасыщенность, песчанистость, темп закачки, коэф. макронеоднородности и нефтенасыщенная толщина пласта.

Основное влияние на эффективность ГРП второй группы скважин оказывают следующие параметры (также в порядке ослабления влияния): масса проппанта, проницаемость, параметр «Альфа-ПС», средняя концентрация проппанта, песчанистость, нефтенасыщенность, коэф. макронеоднородности, темп закачки, нефтенасыщенная толщина пласта и общая толщина пласта.

Параметры, оказывающие влияние (в порядке ослабления) на эффективность ГРП, третьей группы скважин: параметр «Альфа-ПС», средняя концентрация проппанта, масса проппанта, нефтенасыщенность, проницаемость, песчанистость, коэф. макронеоднородности, нефтенасыщенная толщина пласта, общая толщина пласта и темп закачки.

Далее выполняется линейный прогноз выбранных исходных параметров, характеризующих эффективность проведения ГРП [16–18]. Для этого необходимо задать все исходные геологические и технологические параметры, найти стандартизованные значения, вычитая их среднее значение и деля полученную разность на стандартное отклонение, подсчитать по формулам из табл. З значения  $GT_1$  и  $GT_2$ , по уравнениям линейной регрессии найти  $E_1$  и  $E_2$  и, решив систему линейных уравнений, найти стандартизованные прогнозные значения параметров  $\Delta Q_{\rm m}$  и  $\Delta Q_{\rm m}$ . Прогнозные значения находятся умножением стандартизованного прог

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Сабитов Р.Р. К вопросу выбора скважин-кандидатов для проведения повторного гидравлического разрыва пласта // Проблемы геологии и освоения недр: сб. науч. тр. – Томск: ТПУ, 2010. – С. 103–105.
- Сабитов Р.Р., Коротенко В.А. Применение теории распознавания образов в нефтегазопромысловой практике // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2011. – № 5. – С. 154–161.
- Сабитов Р.Р., Коротенко В.А. Определение параметров и критериев эффективности повторного ГРП на скважинах Нивагалського месторождения // Новые технологии для ТЭК Западной Сибири: сб. науч. тр. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2010. – Вып. 4. – С. 373–380.
- Сабитов Р.Р., Коротенко В.А. Прогнозирование показателей эффективности повторного гидравлического разрыва пласта применением элементов теории распознавания образов // Территория нефтегаз. – 2011. – № 12. – С. 18–21.
- Гидроразрыв пласта: внедрение и результаты, проблемы и решения / В.И. Некрасов, А.В. Глебов, Р.Г. Ширгазин, В.В. Вахрушев. – Лангепас; Тюмень: ГУП «Информационно-издательский центр ГНИ по РБ», 2001. – 240 с.
- Лысенко В.Д. Инновационная разработка нефтяных месторождений. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000. – 516 с.
- Лысенко В.Д., Грайфер В.И. Рациональная разработка нефтяных месторождений. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2006. – 571 с.
- Лысенко В.Д. Разработка нефтяных месторождений. Проектирование и анализ. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. – 640 с.
- Азиз Х., Сеттари Э. Математическое моделирование пластовых систем / пер. с англ. – М.: Недра, 1982. – 407 с.
- Ахметов А.Т., Поздняков А.А. Лабораторное и математическое моделирование гидроразрыва пласта // Изв. Вузов: «Нефть и газ». – 2009. – № 2. – С. 43–49.

нозного значения на стандартное отклонение и прибавлением соответствующего среднего значения [19, 20].

В качестве примера рассмотрим следующий набор исходных геологических параметров: общая толщина – 22,9 м, коэф. макронеоднородности – 0,29, песчанистость – 0,6, проницаемость – 6,4 мД, нефтенасыщенность – 0,55, нефтенасыщенная толщина – 9,5 м, параметр «Альфа-ПС» – 0,65, и технологических параметров: масса проппанта в пласте – 32,8 т, темп закачки – 2,66 м<sup>3</sup>/мин, средняя концентрация проппанта – 600 кг/м<sup>3</sup>. После проведения расчета по вышеописанной методике получим прогнозные значения  $\Delta Q_{\rm m}$ =19,3 т/сут,  $\Delta Q_{\rm m}$ =0,97 т/сут.

- Гидроразрыв пласта: внедрение и результаты, проблемы решения / В.В. Вахрушев и др. Лангепас-Тюмень: 2011. 240 с.
- Вязовая М.А. Методика анализа и оценки результатов гидроразрыва пласта на Ермаковском месторождении // Основные направления научно-исследовательских работ в нефтяной промышленности Западной Сибири. – Тюмень: СибНИИНП, 1997. – 362 с.
- Гузеев В.В., Поздняков А.А. Комплексный подход к анализу эффективности ГРП на месторождениях Западной Сибири. – Казань: Экоцентр, 2000. – 384 с.
- 14. Каневская Р.Д. Математическое моделирование разработки месторождений нефти и газа с применением гидроразрыва пласта. – М.: Недра-Бизнесцентр, 1999. – 212 с.
- Многомерный статистический анализ в экономике / Л.А. Сошникова, В.Н. Тамашевич, Г. Уебе, М. Шефер. М.: Юнити, 1999. – 598 с.
- Каневская Р.Д., Кац Р.М. Оценка эффективности гидроразрыва добывающих и нагнетательных скважин при различных системах заводнения пласта // Нефтяное хозяйство. 1998. № 6. С. 34–37.
- 17. Лысенко В.Д. Определение эффективности гидравлического разрыва нефтяного пласта // Нефтяное хозяйство. 2009. № 11. С. 13–19.
- Малышев А.Г. Анализ влияния технологических факторов и механических свойств горных пород на эффективность гидроразрыва / Г.А. Малышев, В.П. Сонич, В.Ф. Седач, В.Н. Журба // Нефтяное хозяйство. 2002. – № 9. – С. 224–238.
- Nolte K.J. Fracturing-pressure analysis for nonideal behavior // JPT. – February 1991. – V. 22. – № 2. – P. 210–218.
- Nordgren R.P. Propagation of a Vertical Hydraulic Fraction // SPE Journal. - 1972. - V. 23. - № 4. - P. 306-314.

Поступила 20.03.2014 г.

UDC 622.276.66

# DECISION-MAKING MODEL BASED ON LINEAR REGRESSION FOR PLANNING A RE-FRACTURING AT THE UV<sub>1</sub> FORMATION OF NIVAGALSKOE OILFIELD

## Razil R. Sabitov,

Cand. Sc., Tyumen State Oil and Gas University, 38, 50 Let Okrtyabrya Street, Tyumen, 625027, Russia. E-mail: srr@tsogu.ru

## **Evgeny Dmitrievich Shvechikov,**

student of the development and exploitation of oil and gas fields, Tyumen State Oil and Gas University, 38, 50 Let Okrtyabrya Street, Tyumen, 625027, Russia. E-mail: seversideboy@gmail.com The problems of enhancing oil recovery and involvement into development of hard-to-recover oil reserves are topical for Russian oil and gas complex nowadays. The share of the deposits, considered as low permeability and stratified reservoirs is about 60 % at the fields of Western Siberia. Thus, to involve the non-drainable reserves to the development the hydraulic fracturing of the productive formation (*HF*) is applied. According to the expert estimates, about one-third of hydrocarbon reserves can only be extracted with the use of this technology. For example, the object UV<sub>1</sub> of Urevskoe deposit has an additional oil production due to the hydraulic fracturing and its share is 80,9 % of the current accumulated oil withdrawals. The highly conductive cracks of the fracturing technology give an opportunity to increase the recovery rate in 2–3 times and more. It is also known that during well operation after hydraulic fracturing the conductivity of the cracks is significantly reduced due to proppant backflow and its gradual closure. The capacity of these wells is recovered by re-fracturing. The relevance of the work is associated with the well productivity rehabilitation by re-fracturing.

**The main aim of the research** is to examine the sequence of actions required for the proper selection of the process parameters with regard to the specific geological conditions of a well based on linear regression for planning re-fracturing of the object UV<sub>1</sub> of Nivagal-skoe field, as well as to forecast the indicators of the hydraulic fracturing effectiveness.

**Research methods:** cluster analysis and the method of canonical correlations using Statgraphics Centurion XV software package. **Results.** The authors have obtained the transformation formula to the canonical variables, which are used to determine the dependence of the indicators of the hydraulic fracturing effectiveness on the geological and technological conditions. The effectiveness parameters were estimated as well by the specific geological data. Using the described decision-making model of the hydraulic fracturing it is possible to select the most important technological parameters that have the greatest impact on the formation hydraulic fracturing effectiveness.

#### Key words:

Multivariate statistical analysis, linear regression, cluster analysis method, method of canonical correlations, re-fracturing, YuV<sub>1</sub> formation, Nivagalskoe oilfield.

#### REFERENCES

- Sabitov R.R. K voprosu vybora skvazhin-kandidatov dlya provedeniya povtornogo gidravlicheskogo razryva plasta [On the issue of selection of wells for re-fracturing]. *Problemy geologii i osvoeniya nedr* [Problems of Geology and Exploitation of Mineral Resources]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University, 2010. pp. 103–105.
- Sabitov R.R., Korotenko V.A. Primenenie teorii raspoznovaniya obrazov v neftegazopromyslovoy praktike [Application of the theory of pattern recognition in petroleum field practice]. *Oil and Gas Business*, 2011, no. 5, pp. 154–161.
- Sabitov R.R., Korotenko V.A. Opredelenie parametrov i kriteriev povtornogo GRP na skvazhinakh Nivagalskogo mestorozhdeniya [Defining the parameters and criteria for the effectiveness of repeated fracturing on wells of Nivagalsky deposit]. Novye tekhnologii dlya TEK Zapadnoy Sibiti [New Technologies for Energy of Western Siberia]. Tyumen, TSOGU Press, 2010. Iss. 4, pp. 373–380.
- Sabitov R.R., Korotenko V.A. Prognozirovanie pokazateley effektivnosti povtornogo gidravlicheskogo razryva plasta primeneniem elementov teorii raspoznavaniya obrazov [Prediction of re-fracturing performance using the elements of the pattern recognition theory]. *The territory of oil and gas*, 2011, no. 12, pp. 18-21.
- Nekrasov V., Glebov A.V., Shirgazin R.G., Vakhrushev V.V. Gidrorazryv plasta: vnedrenie i rezultaty, problem i resheniya [Fracturing: implementation and results, problems and solutions]. Langepas; Tyumen, State Unitary Enterprise «Information and Publishing Center STI RB», 2001. 240 p.
- Lysenko V.D. Innovatsionnaya razrabotka neftyanykh mestorozhdeny [Innovative development of oil fields]. Moscow, Nedra-Biznesstsents Publ., 2010. 516 p.
- Lysenko V.D., Grayfer V.I. Ratsionalnaya razrabotka neftyanykh mestorozhdeny [Rational development of oil fields]. Moscow, Nedra-Biznesstsents Publ., 2011. 571 p.
- Lysenko V.D. Razrabotka neftyanykh mestorozhdeny. Proektirovanie i analiz [Development of oil fields. Design and analysis]. Moscow Nedra-Biznesstsents Publ., 2003. 640 p.
- Aziz Kh., Settari E. Matematicheskoe modelirovanie plastovykh sistem [Mathematical modeling of reservoir systems]. Translated from English. Moscow, Nedra Publ., 1982. 407 p.
- 10. Akhmetov A.T., Pozdnyakov A.A. Laborotornoe i matematicheskoe modelirovanie gidrorazryva plasta [Laboratory and mathema-

tical modeling of fracturing]. Math. Universities. Oil and Gas, 2009, no. 2, pp. 43-49.

- Vakhruchev V.V. Gidrorazryv plasta: vnedrenie i rezultaty, problemy resheniya [Analysis of fracturing application in the fields of CCI «Langepasneftegas»]. Tyumen, SibNIINP Press, 2011. 240 p.
- 12. Vyazovaya M.A. Metodika analiza i otsenki rezultatov gidrorazryva plasta na Ermakovskom mestorozhdenii [Methods of analysis and evaluation of hydraulic fracturing on Ermakovsky deposi]. Osnovnye napravleniya nauchno-issledovatelskikh rabot v neftyanoy promyshlennosti Zapadnoy Sibiri [The key directions of research works in oil industry of Western Siberia]. Tyumen, Sib-NIINP Press, 2011. 362 p.
- Guzeev V.V., Pozdnyakov A.A. Kompleksny podkhod k analizu effektivnosti GRP na mestorozhdeniyakh Zapadnoy Sibiri [Integrated approach to analyzing the effectiveness of hydraulic fracturing in Western Siberia]. Kazan, Ecotsenter Press, 2009. 384 p.
- Konevskaya R.D. Matematicheskoe modelirovanie razrabotki mestorozhdeniy nefti i gaza s primeneniem gidrorazryva plasta [Mathematical modeling of oil and gas fields development applying hydraulic fracturing]. Moscow, Nedra-business centers, 2006. 212 p.
- Soshnikov L.A., Tamashevich V.N., Uebe G., Schaefer M. Mnogomerny statistichesky analiz v ekonomike [Multivariate statistical analysis in economics]. Moscow, Unity Publ., 1999. 598 p.
- Konevskaya R.D. Kats R.M. Otsenka effektivnosti gidrorazryva dobyvayushchikh i nagnetatelnykh skvazhin pri razlichnykh sistemakh zavodneniya plasta [Evaluating the effectiveness of fracturing]. Oil industry, 1999, no. 6, pp. 34–37.
- Lysenko V.D. Opredelenie effektivnosti gidravlicheskogo razryva neftyanogo plasta [Determining the effectiveness of hydraulic fracturing of oil reservoir]. *Oil industry*, 2009, no. 11, pp. 13–19.
- Malyshev A.G., Malyshev G.A. Analiz vliyaniya tekhnologicheskikh faktorov i mekhanicheskikh svoystv gornykh porod na effektivnost gidrorazryva [Analysis of the impact of technological factors and mechanical properties of rocks on fracturing effectiveness]. *Oil industry*, 2002, no. 9, pp. 224–238.
- Nolte K.J. Fracturing-pressure analysis for nonideal behavior. JPT, February 1991, no. 2, pp. 210–218.
- Nordgren R.P. Propagation of a Vertical Hydraulic Fraction. SPE Journal, 1972, no. 4, 253, pp. 306-314.

Received: 20 March 2014.

Редактирование А.С. Глазырин Компьютерная верстка О.Ю. Аршинова Перевод на англ. язык и корректура С.В. Жаркова Дизайн обложки Т.В. Буланова

Фотографии на обложке взяты из личного архива Валерия Касаткина

Подписано к печати хх.хх.2015. Формат 60х84/8. Бумага «Снегурочка». Печать XEROX. Усл. печ. л. 14,89. Уч.-изд. л. 13,47. Заказ ххх-15. Тираж 500 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет Система менеджмента качества Издательства Томского политехнического университета сертифицирована в соответствии с требованиями ISO 9001:2008



издательство тпу. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. Тел./факс: 8(3822) 563-291, www.tpu.ru, izv@tpu.ru