

УДК 661.66

## ПОЛУЧЕНИЕ АКТИВИРОВАННОГО УГЛЯ ПИРОЛИЗОМ РИСОВОЙ ШЕЛУХИ ВЬЕТНАМА

**Коробочкин Валерий Васильевич<sup>1</sup>**,  
vkorobochkin@tpu.ru

**Нгуен Мань Хиену<sup>1</sup>**,  
kqhak@yandex.ru

**Усольцева Наталья Васильевна<sup>1</sup>**,  
usoltseva.nv@mail.ru

**Нгуен Вань Ту<sup>2</sup>**,  
tu.nguyenvan@hust.edu.vn

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

<sup>2</sup> Ханойский университет науки и технологий,  
Вьетнам, г. Ханой, ул. Дай Ко Вьет, 1.

Актуальность работы обусловлена необходимостью утилизации большого количества шелухи, образующейся в результате переработки риса.

**Цель работы:** определение элементного состава и пористой структуры твердых углеродных материалов, полученных при термической обработке шелухи риса, выращенного в дельте Красной реки (республика Вьетнам).

**Методы исследования:** метод термической дифференциально-сканирующей калориметрии с помощью синхронного термоанализатора STA 449F3 Jupiter, совмещенного с масс-спектрометром QMS 403C Aëolos (Netzsch, Германия); электронная микроскопия (JEOL USA JCM-6000); элементный состав определяли с помощью количественного рентгеноспектрального анализа методом трех поправок (ZAF) и CHNS-O с помощью анализатора элементного состава Euro EA-3000; характеристики пористой структуры (удельная площадь поверхности –  $S_{уд}$ , суммарный объем пор –  $V_{\Sigma}$ , диаметр пор –  $d_{пор}$ ) определялись по изотерме тепловой десорбции азота с помощью прибора NOVA Station A в соответствии с методом БЭТ и по ГОСТ 6217–74.

**Результаты.** Обжиг исходного материала при температуре 600 °С приводит к существенному снижению содержания кислорода с 42, 82 до 26,17 % мас., увеличению содержания кремния с 7,00 до 25,00 % мас.; закономерно возрастает отношение C/N до 30. Изучен элементный состав и параметры пористой структуры рисовой шелухи, карбонизата, материала после отделения SiO<sub>2</sub> и активированного угля. Активация полученного материала при температуре 900 °С с использованием карбоната калия с содержанием 10 % мас. в смеси позволяет получить активированный уголь с площадью удельной поверхности 1329 м<sup>2</sup>/г, адсорбционным объемом 0,811 см<sup>3</sup>/г. Показано, что в результате проведенных операций вклад поверхности микропор в значения площади удельной поверхности увеличивается до 60 %. Рассчитанное отношение C/N достигает 84.

### Ключевые слова:

Пиролиз рисовой шелухи, элементный состав, активация карбонизата, пористая структура.

### Введение

Рис является одним из важнейших пищевых продуктов земледелия в мире. Вместе с тем результатом промышленной переработки риса являются большие объемы (до 20 % мас.) шелухи. В основных странах-производителях риса, таких как Китай, Индия, Вьетнам, рисовые отходы исчисляются миллионами тонн. Основное количество рисовой шелухи (РШ) сжигается, что наносит экологический вред окружающей среде, особенно в странах с высокой плотностью населения.

Социалистическая республика Вьетнам производит 45 млн т риса (по данным за 2015 г.) [1], что делает актуальными исследования в области переработки РШ. Препятствием на пути ее эффективной переработки является устойчивая структура РШ [2]. В настоящее время в ряде стран сформированы направления использования РШ, основными из которых являются: выработка тепловой и электрической энергии [3] производство диоксида кремния [4–8], активированного угля и сорбентов

[9–11], получение жидких химических продуктов [12, 13] либо комплексная переработка твердых остатков [14–17].

Таким образом, актуальным является совместное решение двух задач: экологической – утилизация РШ, и технологической – производство востребованных твердых продуктов. Предлагаемые технологии переработки РШ в основном базируются на процессах термической деструкции материала без доступа воздуха (пиролиз). Важная роль в получении востребованных продуктов с заданными эксплуатационными характеристиками принадлежит последовательности стадий переработки РШ, режимным параметрам протекающих процессов, составу полупродуктов, используемых в производстве.

Целью настоящей работы является определение элементного состава и пористой структуры твердых углеродных материалов, полученных при термической обработке шелухи риса, выращенного в дельте Красной реки (республика Вьетнам).

### Объект и методы исследований

Объектом исследования является шелуха риса, выращиваемого в дельте Красной реки Вьетнама. Исходное сырье – рисовая шелуха – подвергалась промывке водой с последующей сушкой при температуре 85–100 °С в течение 24 часов.

Термические исследования образцов проводились с помощью синхронного термоанализатора STA 449F3 Jupiter (Netzsch, Германия), совмещенного с масс-спектрометром QMS 403C Aëolos (Netzsch, Германия), в токе воздуха и в среде аргона, моделирующей процесс пиролиза без доступа воздуха. Образцы массой 12,2±0,6 мг подвергались нагреванию от 40 до 1000 °С со скоростью 10 °С/мин в динамической атмосфере воздуха (аргона) со скоростью потока 50 мл/мин.

Микрофотографии материалов были получены с помощью растрового электронного микроскопа JEOL USA JCM-6000. Элементный состав определяли с помощью количественного рентгеноспектрального анализа методом трех поправок (ZAF) и CHNS-O с помощью анализатора элементного состава Euro EA-3000.

Характеристики пористой структуры (удельная площадь поверхности –  $S_{уд}$ , суммарный объем пор –  $V_{\Sigma}$ , диаметр пор –  $d_{пор}$ ) определяли с помощью прибора NOVA Station A. Площадь удельной поверхности в соответствии с методом БЭТ рассчитывалась по изотерме тепловой десорбции азота. Перед измерениями навеска образца (0,8–1,2 г) тренировалась в среде газообразного азота в течение 17 часов при температуре 150 °С. Площадь удельной поверхности образцов активированного угля, полученного на пилотной установке, была измерена по величине адсорбции йода согласно методике, изложенной в ГОСТ 6217–74 [18].

### Результаты и обсуждение

Элементный состав исходной рисовой шелухи и продуктов ее переработки представлен в табл. 1.

Термообработка рисовой шелухи приводит к образованию твердого остатка и пиролизных газов, представляющих собой смесь конденсирующихся паров и неконденсированных газов.

На рис. 1 приведены микрофотографии и спектры элементного состава высушенной измельченной рисовой шелухи, карбонизата, полученного при температуре обжига 600 °С, материала после отделения диоксида кремния.

Из приведенных микрофотографий видно, что структура РШ представляет собой в основном чешуйчатые частицы (рис. 1, а). После прогрева при температуре 600 °С частицы имеют форму агрега-

тов, состоящих из слоистых образований с развитой внутренней системой пор, их размер уменьшается (рис. 1, б). После удаления SiO<sub>2</sub> (рис. 1, в) структура материала разрыхляется с сохранением размеров агрегатов.

Спектры элементного состава регистрируют изменение содержания углерода и кремния в зависимости от стадий обработки РШ (табл. 1, рис. 1). Элементный анализ показывает, что содержание углерода закономерно возрастает до 71,45 % мас. Как видно из табл. 1, в полученном карбонизате присутствуют оксидообразующие металлы – компоненты золы, значительное содержание в которой составляет кремний (25 % мас.). Это хорошо иллюстрирует рис. 1, а, б, на котором представлены спектры кремния в исходной рисовой шелухе и карбонизате.

Проведенные операции по удалению Si из карбонизата путем выщелачивания и осаждения геля диоксида кремния [19, 20] приводят к тому, что содержание Si в карбонизате снижается с 25,00 до 1,23 % мас. Степень извлечения SiO<sub>2</sub> составляет 96,8 %, что можно считать удовлетворительным результатом, согласно данным, опубликованным в работах [21–23]. Как следствие, в ряду последовательности стадий после отделения SiO<sub>2</sub> в карбонизате увеличивается отношение C/N и достигает 30. Последнее означает [24], что формируется устойчивая углеродная матрица материала.

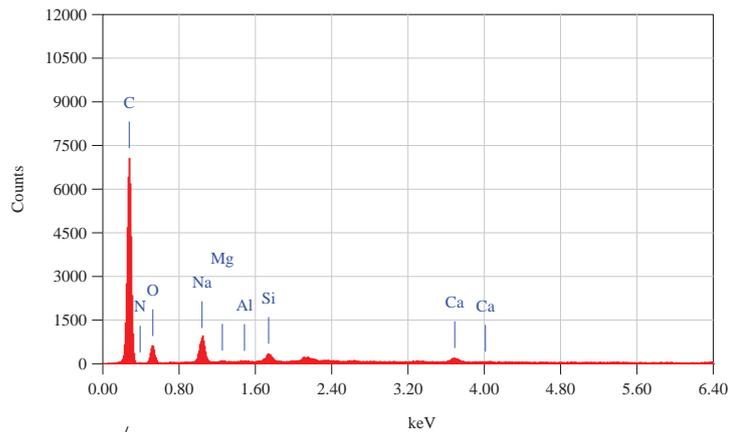
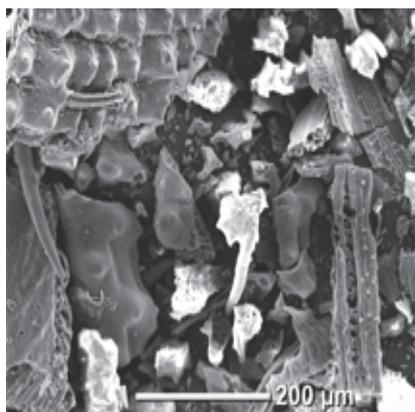
На начальном этапе исследований нами проведен дифференциально-термический анализ объекта исследований в среде воздуха с целью изучения процессов, протекающих при сжигании РШ, и в среде аргона, моделирующей процесс пиролиза без доступа воздуха [25].

Полученные данные (рис. 2, а) свидетельствуют о том, что при сжигании РШ в воздухе материал уменьшает массу при обработке до температуры 520 °С на 87,7 %. Основная убыль массы связана с разрушением структур целлюлозы и лигнина под действием термоокислительной деструкции в интервале температур 250–520 °С с выделением преимущественно воды, монооксида и диоксида углерода, что согласуется с результатами исследований, представленными в работе [22]. Небольшое уменьшение массы материала после 520 °С связано с выгоранием карбонизированного продукта с образованием CO и CO<sub>2</sub>. Вместе с тем содержание основных компонентов органической и минеральной части, а также убыль массы материала при прокаливании в различных объектах исследований существенно отличаются. Так, в работе [11] указывается на то, что содержание кремния в карбонизате

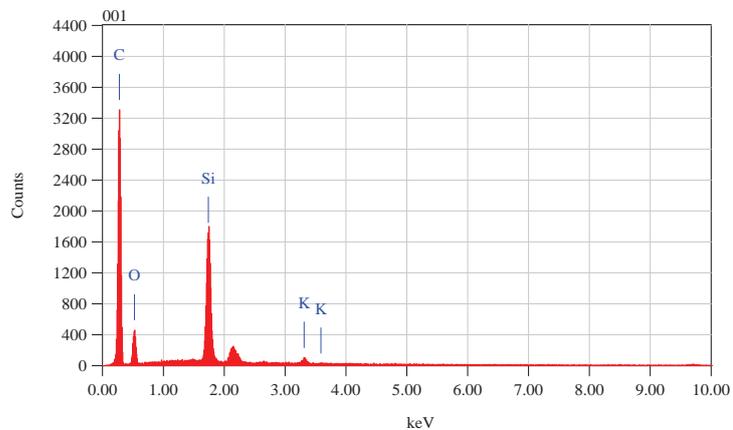
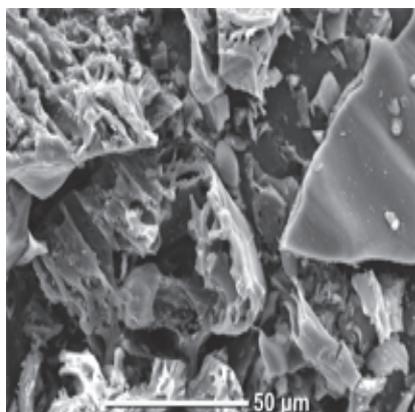
**Таблица 1.** Элементный состав рисовой шелухи, карбонизата и материала после отделения диоксида кремния (% мас.)

**Table 1.** Elemental composition of rice husk, carbonizate and material after silicon dioxide separation

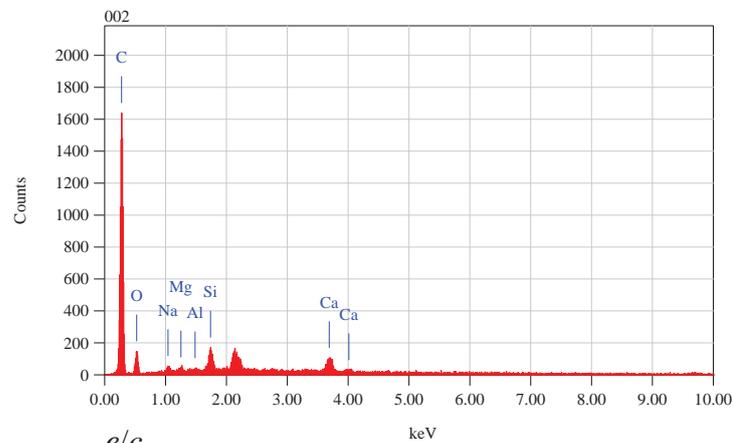
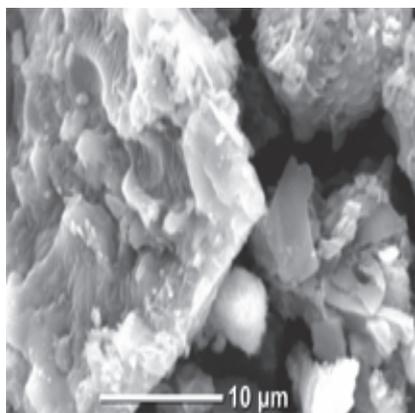
Образец/Sample	C	H	O	N	K	Si	Ca	Mg	Al	C/H
Рисовая шелуха/Rice husk	40,80	5,38	44,42	1,16	0,97	7,00	0,10	0,11	0,06	7,6
Продукт карбонизации/Carbonization product	44,10	1,36	26,17	0,73	1,68	25,00	0,49	0,38	0,09	32,4
Материал после отделения SiO <sub>2</sub> /Material after SiO <sub>2</sub> separation	71,45	2,51	21,16	0,82	1,74	1,23	0,56	0,41	0,12	29,7



a/a



б/б



в/в

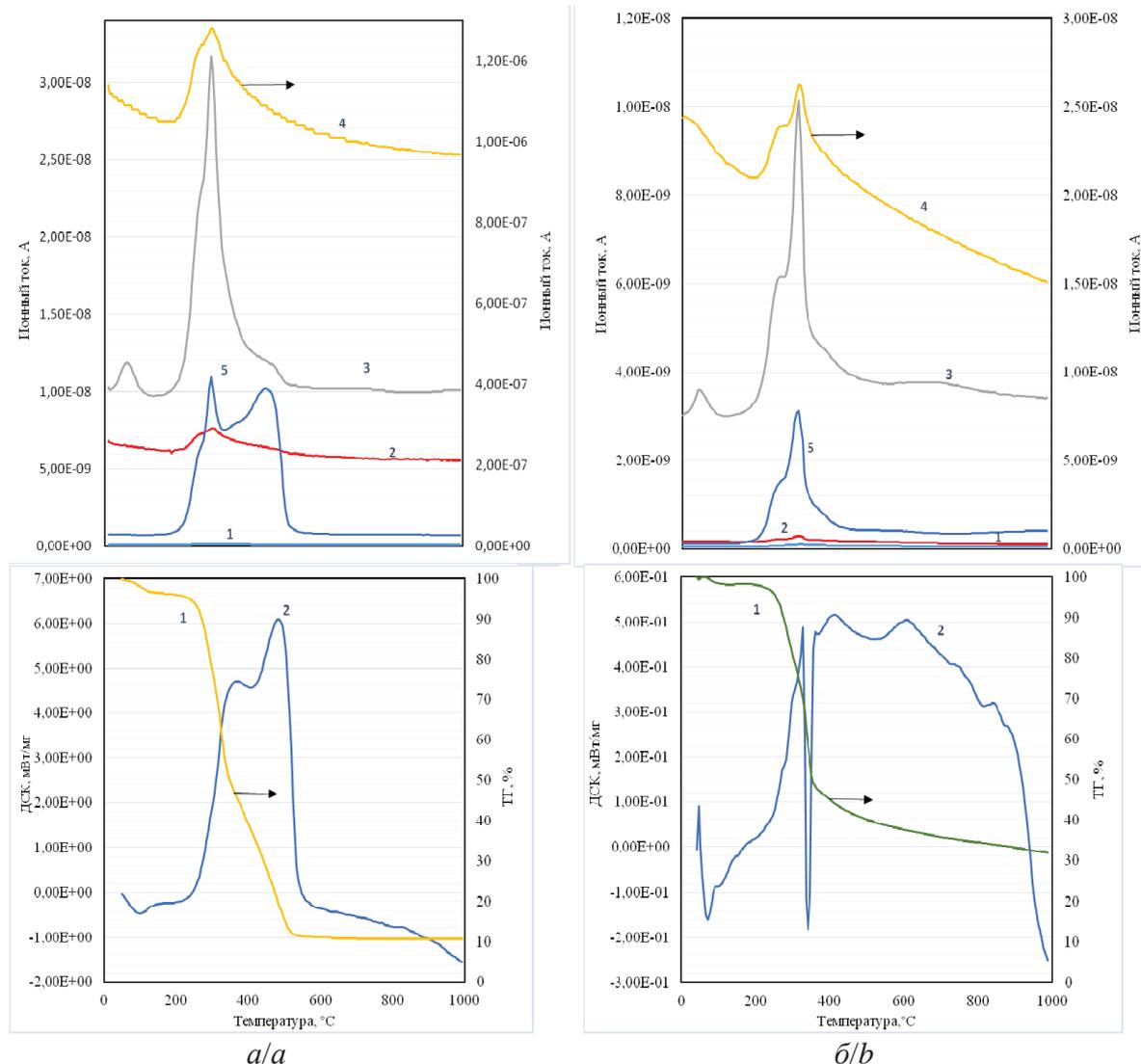
**Рис. 1.** Микрофотографии исходной рисовой шелухи (а), карбонизата (б), продукта после отделения диоксида кремния (в)

**Fig. 1.** SEM images of original rice husk (a), carbonizata (b), product after silicon dioxide separation (c)

шелухи риса, выращенного в Кзыл-ординской области (Казахстан), составляет 65,0 % мас., а убыль массы при прокаливании до 600 °С составляет 45,8 %. Таким образом, превалирование минеральной составляющей РШ над органической в данном объекте исследований напрямую связано с изменением массы материала при прокаливании.

Кривая ДСК характеризуется двумя интенсивными экзотермическими эффектами с максима-

ми при 370 и 485 °С. В этом температурном интервале термоокислительному разложению подвергаются целлюлоза и лигнин. Лигнин разлагается при более высокой температуре за счет своего более ароматического строения, хотя четкой последовательности разложения нет, поскольку лигнин и целлюлоза связаны в древесных материалах химическими связями различной прочности [26, 27]. Выход твердого остатка – карбонизата – при такой



**Рис. 2.** Дифференциально-термический анализ и масс-спектры продуктов, полученных при термической обработке РШ в воздухе (а) и аргоне (б): 1)  $m/z=2$ ; 2)  $m/z=16$ ; 3)  $m/z=18$ ; 4)  $m/z=28$ ; 5)  $m/z=44$

**Fig. 2.** Differential thermal analysis and mass spectra of the products after thermal treatment of rice husk in air (a) and argon (b): 1)  $m/z=2$ ; 2)  $m/z=16$ ; 3)  $m/z=18$ ; 4)  $m/z=28$ ; 5)  $m/z=44$

обработке незначителен, и получать углеродные материалы путем сжигания большей части РШ экономически и технологически неэффективно.

Наиболее полно требованиям по получению активированного угля (АУ) удовлетворяет процесс пиролиза. В этом случае прогрев исходного материала до температуры 520 °С приводит к убыли массы на 60 % (рис. 2, б), что дает основание полагать: этот метод экономически возможен для получения АУ. Вместе с тем при прогреве в аргоне меняется состав отходящих газов: существенно уменьшается содержание СО по сравнению с сжиганием на воздухе, а также, в меньшей степени, содержание СО<sub>2</sub> и Н<sub>2</sub>O (рис. 2). Интенсивный эндотермический эффект с минимумом при 342 °С на кривой ДСК характеризует резкое выделение паров воды, СО и СО<sub>2</sub> при термодеструкции преимущественно

целлюлозы, а слабо выраженный минимум при 520 °С – завершение разложения лигнина.

Проведенный совмещенный с ДТА-ТГ спектрометрический анализ (Sta) позволил определить основные газовые компоненты, удаляющиеся при термообработке РШ. На рис. 2, а, б представлены масс-спектры основных газовых компонентов, выделяющихся при прогреве рисовой шелухи. Для изучения были выбраны значения  $m/z$  2, 16, 18, 28 и 44, которые соответствуют следующим газам: водород, метан, водяной пар, моноксид углерода и диоксид углерода.

Из рис. 2, а видно, что при нагреве в воздухе, согласно значениям ионного тока, закономерно выделяется большое количество монооксида и диоксида углерода, воды. В газах также присутствуют в небольшом количестве водород, метан, что явля-

ется следствием деструкции целлюлозы и лигнина. Полученные результаты во многом согласуются с данными, приведенными авторами [22, 27]. Высокое содержание монооксида углерода связано, во-первых, с термической деструкцией целлюлозы и лигнина, во-вторых, с образованием CO по реакции восстановления диоксида углерода раскаленным углеродом:



при температурах выше 400 °С равновесие этой реакции сдвигается вправо.

При прогреве в инертной среде содержание всех компонентов в газе уменьшается. Примечательным можно считать наличие в спектре по  $m/z=44$  при прогреве на воздухе двух максимумов при 325 и 477 °С, в то время как при прогреве в аргоне присутствует только один эндотермический эффект при температуре 325 °С. Скорее всего наличие эффекта при 477 °С на рис. 2, б можно объяснить взаимодействием CO с кислородом воздуха при повышенной температуре по реакции:



Реакции (1) и (2) протекают независимо в данном интервале температур прогрева материала.

Исследования, проведенные на пилотной установке с загрузкой 100 кг сырья при нагреве РПШ до 900 °С на стадии активации в периодическом режиме ограниченного расхода воздуха, подтвердили, что процесс сопровождается увеличением содержания CO и CO<sub>2</sub> в отходящих газах. Вместе с тем во время выдержки карбонизата при температуре 900 °С в течение 70 мин продолжается (рис. 3) выделение этих газов с примерно постоянной скоростью, что свидетельствует о выгорании части твердого углеродного остатка. Отношение CO/CO<sub>2</sub> во время выдержки незначительно увеличивается с 2,4 до 3,3.

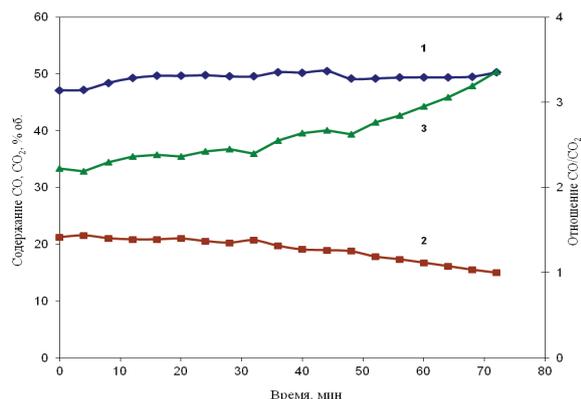


Рис. 3. Зависимость изменения содержания CO (1), CO<sub>2</sub> (2) и отношения CO/CO<sub>2</sub> (3) в газе от времени выдержки при температуре 900 °С

Fig. 3. Dependence of the change of CO (1), CO<sub>2</sub> (2) contents and CO/CO<sub>2</sub> ratio (3) in gas on holding time at temperature of 900 °С

Обнаруженный эффект объясняется инерционностью теплового режима в установке с большим объемом сырья: печь остывает медленно, и процесс

какое-то время продолжается в автотермическом режиме. Это обстоятельство необходимо учитывать при масштабировании аппаратов, входящих в технологическую схему производства. С другой стороны эффект нельзя считать положительным, поскольку при этом уменьшается выход активированного угля.

Обескремененный карбонизат подвергали активации. Согласно литературным данным, наибольшую эффективность в активации карбонизата показали добавки сухих солей [9, 28–30]. В качестве активаторов были выбраны карбонаты калия (ГОСТ 10690–73) и натрия (ГОСТ 5100–85) в виде порошков квалификации «технические». Образцы для экспериментов готовили смешиванием карбонатов с карбонизатом в определенных соотношениях, обеспечивающих необходимое содержание добавки в смеси. При проведении процесса варьировались: содержание добавки в смеси, температура активации и время выдержки. Основные результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты активации материала с добавками карбонатов калия и натрия

Table 2. Results of the material activation with additives of potassium and sodium carbonates

Активатор Activating agent	Температура активации, °С Activation temperature, °С	Содержание активатора, % мас. Content of carbonate added, wt. %	Время активации, ч Activation time, h	Содержание углерода, % мас. Carbon content, wt. %	Выход продукта, % Output, %	S <sub>пр.</sub> (м <sup>2</sup> /г)
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	900	3	2	88,2	85	918
				87,6	82	987
				84,6	81	1329
				86,1	79	1284
				76,4	76	994
				84,1	83	1129
	700	10	2	87,2	70	919
				86,5	84	854
				84,4	85	888
				85,7	85	956
				89,6	76	987
				89,4	80	614
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	900	3	2	84,7	79	723
				84,2	76	677
				83,3	74	754
				82,4	69	615
				82,6	84	794
				86,1	65	614
	700	10	2	89,3	92	723
				83,5	84	834
				74,2	84	754
				90,5	61	615
				89,4	80	614
				84,7	79	723

Из табл. 2 следует, что с увеличением содержания карбонатов в смеси меняется технологическая характеристика (выход) продукта и эксплуатационные (содержание углерода, площадь удельной поверхности). С увеличением концентрации активатора в смеси содержание углерода закономерно уменьшается, выход продукта также снижается,

при этом его значения для добавки  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ниже на 8–10 %, чем при использовании добавки  $\text{K}_2\text{CO}_3$ . Значения площади удельной поверхности материала при активации с  $\text{K}_2\text{CO}_3$  выше на 25–40 %, чем с добавкой  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . При этом максимальные значения  $S_{уд}$  достигаются для материала, полученного с добавкой карбоната калия с содержанием 10 % мас. При температуре 900 °C оно составляет 1329 м<sup>2</sup>/г.

С ростом температуры активации содержание углерода в образцах изменяется незначительно и варьирует в интервале 85,4–89,0 % для добавки карбоната калия и 84,2–90,5 % для добавки карбоната натрия. Выход продукта в целом снижается за счет выгорания части углерода.

Площадь удельной поверхности с ростом температуры активации имеет тенденцию к увеличению в случае использования добавки  $\text{K}_2\text{CO}_3$  и, наоборот, к снижению при добавке  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Оптимальное время активации смеси с добавкой карбоната калия составляет 2 часа, с добавкой  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  – 1 час. Это обусловлено процессами спекания агрегатов углеродной матрицы, образованной с добавкой карбоната натрия (рис. 4, б). В структуре пор материала с добавкой  $\text{K}_2\text{CO}_3$  с увеличением времени выдержки происходят изменения: при длительной выдержке (2 часа), возможно, происходит выгорание смолы из устья пор, что приводит к росту площади удельной поверхности в интервале изменения температуры 700–900 °C. Обработка образцов при высокой температуре (950 °C) и длительном времени выдержки (3 часа) приводит к снижению удельной поверхности и выхода продукта. В целом активация материала с карбонатом калия обеспечивает более высокую эффективность по сравнению с активацией  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .

Одним из основных показателей возможности использования продуктов пиролиза РШ для получения активированного угля является изменяю-

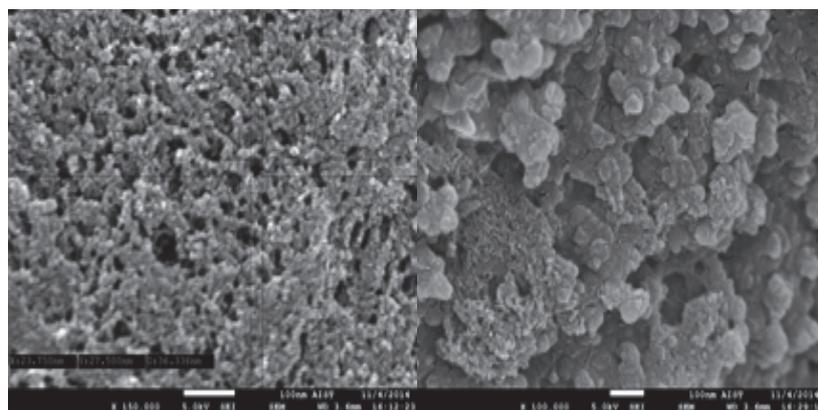
щееся отношение С/Н, которое представлено в табл. 1. Из табл. 1 следует, что отношение С/Н при последовательном прогреве исходного материала закономерно растет и достигает в активированном угле значения 82–84 для лучших образцов, что можно считать хорошим показателем [31], который характеризует состав и структуру углеродной матрицы. Незначительное уменьшение отношения С/Н в карбонизате после выщелачивания кремния закономерно, поскольку в этих процессах углерод не расходуется, а содержание водорода незначительно увеличивается за счет стадии промывки карбонизата и пропитки матрицы водой. Водяной пар удаляется только при повышении температуры при активации, и содержание водорода уменьшается.

В табл. 3 приведены основные параметры пористой структуры исходного материала (РШ), карбонизата, полученного при сжигании до температуры 600 °C, карбонизата после удаления  $\text{SiO}_2$  и угля после активации с карбонатом калия при температуре 900 °C с выдержкой 2 часа.

**Таблица 3.** Характеристики пористой структуры продуктов переработки рисовой шелухи

**Table 3.** Characteristics of the porous structure of products of rice husk processing

Материал Material	$S$ , м <sup>2</sup> /г	$V_{\Sigma}$ , см <sup>3</sup> /г	$V_{\mu}$ , см <sup>3</sup> /г	$d$ , nm	$S_{\mu}$ , м <sup>2</sup> /г
Карбонизат после сжигания при 600 °C Carbonizate after burning at 600 °C	51,5	0,062	0,007	4,8	10,9
Материал после отделения $\text{SiO}_2$ Material after separation of $\text{SiO}_2$	204,4	0,225	0,057	4,4	97,8
Активированный уголь (образец К10.900.2) Activated carbon (K10.900.2 sample)	1329,0	0,811	0,582	3,8	793,0



a/a

b/b

**Рис. 4.** Микрофотографии поверхности образцов после активации  $\text{K}_2\text{CO}_3$  (а) и  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (б): температура активации 900 °C, содержание карбоната в смеси 10 % мас., время активации 2 часа

**Fig. 4.** SEM images of the samples' surface after activation by  $\text{K}_2\text{CO}_3$  (a) and  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (b): activation temperature is 900 °C, carbonate content in the mixture is 10 wt. %, activation time is 2 h

Из табл. 3 следует, что продукт карбонизации имеет небольшую площадь удельной поверхности и характеризуется низким объемом пор. Вместе с тем после удаления  $\text{SiO}_2$  существенно возрастает  $S_{\text{уд}}$  (до  $204 \text{ м}^2/\text{г}$ ) и адсорбционный объем (до  $0,225 \text{ см}^3/\text{г}$ ). При этом в процессе выщелачивания кремния формируется углеродная матрица с большим содержанием микропор, которые обеспечивают до 50 % поверхности материала. После активации существенно увеличивается площадь удельной поверхности материала и суммарный объем пор.

Результаты активации хорошо иллюстрируют микрофотографии полученных материалов (рис. 4)

Из микрофотографий и данных табл. 3 видно, что при активации с карбонатом натрия формируется рыхлая структура, состоящая из частиц материала нанометрового диапазона, собранных в агрегаты различного размера. Поровое пространство формируется как структура сложения [32] и представляет собой свободные промежутки между агрегатами и частицами в них, зависит от плотности упаковки и размеров. В материале большой вклад в удельную площадь поверхности вносят мезопоры. Активация с карбонатом калия приводит к формированию пор по принципу вычитания, т. е. при удалении газов из плотной матрицы материала. На микрофотографии поверхности видны устья пор, которые можно отнести к мезопорам. Как следует из результатов по определению удельной площади поверхности, такая структура обладает более высокими значениями  $S_{\text{уд}}$  за счет более весомого вклада микропор в значения этого показателя (табл. 3).

#### Выводы

1. Элементный состав рисовой шелухи, продукта карбонизации и материала после отделения диоксида кремния существенно отличается по содержанию углерода, кислорода, водорода и кремния. После карбонизации существенно снижается содержание кислорода с 42, 82 до 26,17 % мас., увеличивается содержание кремния с 7,00 до 25,00 % мас., закономерно возрастает отношение C/H до 30. Это является следствием обжига исходного материала при температуре  $600^\circ\text{C}$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. General statistics office of Vietnam. URL: [www.gso.gov.vn/Default\\_en.aspx?tabid=515](http://www.gso.gov.vn/Default_en.aspx?tabid=515) (дата обращения: 20.02.2017).
2. Хьюстон Д.Ф. Рис и его качество. – М.: Колос, 1976. – 400 с.
3. Pretreatment of empty palm fruit bunch for production of chemicals via catalytic pyrolysis / M. Misson, R. Haron, M.F.A. Kamaruddin, N.A.S. Amin // *Bioresource Technology*. – 2009. – V. 100. – № 11. – P. 2867–2873.
4. Liou T.H. Preparation and characterization of nano-structured silica from rice husk // *Materials Science and Engineering*. – 2004. – V. 364. – Iss. 1–2. – P. 313–323.
5. Wittoon T., Chareonpanich M., Limtrakul J. Synthesis of bimodal porous silica from rice husk ash via sol-gel process using chitosan

2. Результаты ТГ–ДСК исследований свидетельствуют: термоокислительная обработка рисовой шелухи, сопровождающаяся деструкцией целлюлозы и лигнина, приводит к большой убыли массы (до 87 %), что делает этот способ технологически и экономически неэффективным для получения активированного угля из шелухи риса. Вместе с тем уменьшение массы материала при обработке в инертной среде (аргон) существенно меньше – 60 %, что потенциально позволяет использовать процесс пиролиза для получения активированного угля.
3. Данные масс-спектров для  $m/z=2$ ;  $m/z=16$ ;  $m/z=18$ ;  $m/z=28$ ;  $m/z=44$  свидетельствуют о высоком содержании в отходящих газах монооксида и диоксида углерода, воды. При пиролизе РШ в среде аргона резко уменьшается содержание монооксида углерода. При обжиге материала до  $900^\circ\text{C}$  и выдержке в течение 70 мин скорость выделения CO и  $\text{CO}_2$  практически не изменяется. Выдержка нецелесообразна, учитывая потерю углерода с образующимися газами.
4. Установлено, что активация материала при температурах до  $950^\circ\text{C}$  с использованием в качестве активаторов карбонатов калия и натрия позволяет получить активированный уголь с высокими значениями площади удельной поверхности и адсорбционного объема. Наилучшие результаты показала активация продуктов карбонизации с карбонатом калия: при температуре активации  $900^\circ\text{C}$  и содержании добавки 10 % мас. удельная площадь поверхности углеродного материала составляет  $1329 \text{ м}^2/\text{г}$ , вклад поверхности микропор в значения площади удельной поверхности увеличивается до 60 %, а адсорбционный объем материала возрастает до  $0,811 \text{ см}^3/\text{г}$ . Рассчитанное отношение C/H в углеродной матрице достигает 84.
5. Результаты работы показали, что, утилизируя рисовую шелуху путем термической обработки и активации, возможно получить активированный уголь с хорошими эксплуатационными характеристиками, который может быть использован в качестве сорбента при очистке сточных вод и хвостовых газов различных производств, что актуально для улучшения экологической обстановки на территории республики Вьетнам.

as template // *Materials Letters*. – 2008. – V. 62. – Iss. 10–11. – P. 1476–1479.

6. Van Hai Le, Chi Nhan Ha Thuc, Huy Ha Thuc. Synthesis of silica nanoparticles from Vietnamese rice husk by sol-gel method // *Nanoscale Research Letters*. – 2013. URL: <http://link.springer.com/article/10.1186/1556-276X-8-58> (дата обращения: 20.02.2017).
7. Исследование влияния способов подготовки рисовой шелухи на химический состав сырьевого материала при получении диоксида кремния / Т.В. Гриднева, П.И. Сорока, Е.С. Смирнова, А.А. Белая, П.В. Рябик // *Вопросы химии и химической технологии*. – 2012. – № 3. – С. 50–53.
8. Study on the effectiveness of thermally rice husks for petroleum adsorption / K. Kudaybergenov, Y. Ongarbaev, Z. Mansurov,

- Y. Doczhanov // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2012. – V. 358. – Iss. 22. – P. 2946–2969.
9. Foo K.Y., Hameed B.H. Utilization of rice husks as a feedstock for preparation of activated carbon by microwave induced KOH and K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> activation // Bioresource Technology. – 2011. – V. 102. – Iss. 102. – P. 9814–9817.
  10. Witoon T., Chareonpanich M., Limtrakul J. Synthesis of bimodal porous silica from rice husk ash via sol–gel process using chitosan as template // Materials Letters. – 2008. – V. 62. – Iss. 10–11. – P. 1476–1479.
  11. Кудайбергенов К.К. Разработка и изучение карбонизированных сорбентов для очистки воды от нефтяных загрязнений: дис. ... д-ра философии (PhD). – Алматы, 2012. – 101 с.
  12. Сазонов Ю.Н., Грибанов А.В. Термохимия лигнина // Журнал прикладной химии. – 2010. – Т. 83. – № 2. – С. 175–194.
  13. Ефремова С.В. Получение органического продукта в процессе термической деструкции рисовой шелухи // Промышленность Казахстана. – 2007. – № 2 (41). – С. 56–58.
  14. Chang H., Yan H., Chong R. Effects of pre-carbonization on porosity development of activated carbons from rice straw // Carbon. – 2001. – V. 39. – № 4. – P. 559–567.
  15. Marsh H., Rodriguez-Reinoso F. Activated Carbon. – Amsterdam: Elsevier Science & Technology Books, 2006. – 530 p.
  16. Добавка для модификации гипсовых вяжущих, строительных материалов и бетонов на их основе: пат. Рос. Федерации № 2260572; заявл. 25.05.04; опубл. 20.09.05. – Бюл. № 26. – 7 с.
  17. Возобновляемые источники химического сырья: комплексная переработка отходов производства риса и гречихи / В.И. Сергиенко, Л.А. Земнухова, А.В. Егоров, Е.Д. Шкорина, Н.С. Васильюк // Российский химический журнал. – 2004. – Т. 48. – № 3. – С. 116–124.
  18. ГОСТ 6217–74. Уголь активный древесный дробленый. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 7 с.
  19. Hieu N.M., Korobochkin V.V., Tu N.V. A study of silica separation in the production of activated carbon from rice husk in Vietnam // Procedia Chemistry. – 2015. – № 15. – P. 308–312.
  20. Нгуен М.Х. Утилизация рисовой шелухи Вьетнама с получением активированного угля // Проблемы геологии и освоения недр: Материалы XX Международного научного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых. – Томск, 4–8 апреля, 2016. – С. 635–637.
  21. Состав и строение образцов аморфного кремнезёма из шелухи и соломы риса / Л.А. Земнухова, А.Е. Панасенко, Е.А. Цой, Г.А. Федорищева, Н.П. Шапкин, А.П. Артемьянов, В.Ю. Майоров // Неорганические материалы. – 2014. – Т. 50. – № 1. – С. 82–89.
  22. Холмейдик А.Н. Получение, состав и свойства кремний- и углеродсодержащих продуктов переработки плодовых оболочек риса: дис. ... канд. хим. наук. – Владивосток, 2016. – 136 с.
  23. Upgrading the rice husk char obtained by flash pyrolysis for the production of amorphous silica and high quality activated carbon / J. Alvarez, G. Lopez, M. Amutio, J. Bilbao, M. Olazar // Bioresource Technology. – 2014. – V. 170. – P. 132–137.
  24. Toledano A., Serrano L., Labidi J. Organosolv lignin depolymerization with different base catalysts // Journal of Chemical Technology and Biotechnology. – 2012. – V. 87. – № 11. – P. 1593–1599.
  25. Korobochkin V.V., Tu N.V., Hieu N.M. Production of activated carbon from rice husk Vietnam // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – V. 43. – P. 1–6.
  26. Грипешко Л.И. Исследование процесса синтеза из древесного лигнина жидких углеводородов и аэрозолей: дис. ... канд. хим. наук. – Красноярск, 2014. – 150 с.
  27. Конкин А.А. Углеводородные и другие жаростойкие волокнистые материалы. – М.: Химия, 1974. – 376 с.
  28. Addoun A., Dentzer J., Ehrburger P. Porosity of carbons obtained by chemical activation: Effect of the nature of the alkaline carbonates // Carbon. – 2002. – № 40. – P. 1140–1143.
  29. Кинле Х., Бадер Э. Активированные угли и их промышленное применение. – Л.: Химия, 1984. – 216 с.
  30. Song X., Zhang Y., Chang C. Novel method for preparing activated carbons with high specific surface area from rice husk // Industrial and engineering chemistry research. – 2012. – № 51. – P. 15075–15081.
  31. Characterization of char from rapid pyrolysis of rice husk / S. Hu, J. Xiang, L. Sun, M. Xu, J. Qiu, P. Fu // Fuel processing technology. – 2008. – № 115. – P. 1915–1920.
  32. Плаченев Т.Г., Колосенцев С.Д. Порометрия. – М.: Химия, 1988. – 176 с.

Поступила 04.04.2017 г.

#### Информация об авторах

**Коробочкин В.В.**, доктор технических наук, профессор кафедры общей химии и химической технологии Института физики высоких технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Нгуен Мань Хиеу**, аспирант кафедры общей химии и химической технологии Института физики высоких технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Усольцева Н.В.**, старший преподаватель кафедры общей химии и химической технологии Института физики высоких технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Нгуен Вань Ту**, доктор технических наук, профессор Ханойского университета науки и технологий.

UDC 661.66

## PRODUCTION OF ACTIVATED CARBON BY PYROLYSIS OF RICE HUSK OF VIETNAM

**Korobochkin Valeriy Vasilyevich<sup>1</sup>,**

vkorobochkin@tpu.ru

**Nguyen Manh Hieu<sup>1</sup>,**

kqhak@yandex.ru

**Usoltseva Natalya Vasilyevna<sup>1</sup>,**

usoltseva.nv@mail.ru

**Nguyen Van Tu<sup>2</sup>,**

tu.nguyenvan@hust.edu.vn

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

<sup>2</sup> Hanoi University of Science and Technology,  
1, Dai Co Viet, Hanoi, Vietnam.

*Relevance of the work is caused by the need to utilize a large amount of husk formed at rice processing.*

**The aim of the research** is to determine the composition and structural characteristics of the solid carbon materials obtained by heat treatment of husk of rice grown in the Red River Delta (Republic of Vietnam).

**Methods:** method of heat differential scanning calorimetry using a simultaneous thermal analyzer STA 449F3 Jupiter (Netzsch, Germany) combined with mass spectrometer QMS 403C Aeolos (Netzsch, Germany); electron microscopy (JEOL USA JCM-6000); ZAF method standardless quantitative analysis to determine the elemental composition; isotherm of thermal nitrogen desorption by using NOVA Station A device in accordance with the BET method and according to GOST 6217–74 to determine the porous structure characteristics (specific surface area –  $S$ , total pore volume –  $V_t$ , pore diameter –  $d$ ).

**Results.** Calcination of raw material at temperature of 600 °C results in significant decrease in oxygen content from 42,82 to 26,17 wt. %, increase in silicon content from 7,00 to 25,00 wt. %; the C/H ratio increases to 30 expectedly. Elemental composition and parameters of porous structure of rice husk, carbonizate, material after separation of  $SiO_2$  and activated carbon were investigated. Activation of the resulting material containing 10 wt. % of potassium carbonate at 900 °C let obtain the activated carbon with specific surface area of 1329  $m^2/g$  and adsorption capacity of 0,811  $cm^3/g$ . Contribution of micropore surface to the specific surface area increases up to 60 % as a result of the carried out operations. The calculated C/H ratio reaches 84.

### Key words:

Rice husk pyrolysis, elemental composition, carbonizate activation, porous structure.

### REFERENCES

1. General statistics office of Vietnam. Available at: [www.gso.gov.vn/Default\\_en.aspx?tabid=515](http://www.gso.gov.vn/Default_en.aspx?tabid=515) (accessed 20 February 2017).
2. Houston D.F. *Ris i ego kachestva* [Rise and its properties]. Moscow, Kolos Publ., 1976. 400 p.
3. Misson M., Haron R., Kamaroddin M.F.A., Amin N.A.S. Pretreatment of empty palm fruit bunch for production of chemicals via catalytic pyrolysis. *Bioresource Technology*, 2009, vol. 100, no. 11, pp. 2867–2873.
4. Liou T.H. Preparation and characterization of nano-structured silica from rice husk. *Materials Science and Engineering*, 2004, vol. 364, Iss. 1–2, pp. 313–323.
5. Wittoon T., Chareonpanich M., Limtrakul J. Synthesis of bimodal porous silica from rice husk ash via sol–gel process using chitosan as template. *Materials Letters*, 2008, vol. 62, Iss. 10–11, pp. 1476–1479.
6. Van Hai Le, Chi Nhan Ha Thuc, Huy Ha Thuc. Synthesis of silica nanoparticles from Vietnamese rice husk by sol–gel method. *Nanoscale Research Letters*, 2013. Available at: <http://link.springer.com/article/10.1186/1556-276X-8-58> (accessed 20 February 2017).
7. Gridneva T.V., Soroka P.I., Smirnova E.S., Belaya A.A., Ryabik P.V. Investigation of the effect of preparation methods of rice husk on chemical composition of the raw material in production of silicon dioxide. *Issues of chemistry and chemical technology*, 2012, no. 3, pp. 50–53. In Rus.
8. Kudaybergenov K., Ongarbaev Y., Mansurov Z., Doczhanov Y. Study on the effectiveness of thermally rice husks for petroleum adsorption. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2012, vol. 358, Iss. 22, pp. 2946–2969.
9. Foo K.Y., Hameed B.H. Utilization of rice husks as a feedstock for preparation of activated carbon by microwave induced KOH and  $K_2CO_3$  activation. *Bioresource Technology*, 2011, vol. 102, Iss. 102, pp. 9814–9817.
10. Wittoon T., Chareonpanich M., Limtrakul J. Synthesis of bimodal porous silica from rice husk ash via sol–gel process using chitosan as template. *Materials Letters*, 2008, vol. 62, Iss. 10–11, pp. 1476–1479.
11. Kudaybergenov K.K. *Razrabotka i izuchenie karbonizirovannykh sorbentov dlya ochistki vody ot neftyanykh zagryazneniy*. Dis. Dokt. nauk [Development and study of carbonized sorbents for water purification from oil pollution. Dr. Diss.]. Almaty, 2012. 101 p.
12. Sazonov Yu.N., Gribanov A.V. Thermochemistry of lignin. *Zhurnal prikladnoy khimii – Russian journal of applied chemistry*, 2010, vol. 83, Iss. 2, pp. 175–194. In Rus.
13. Efremova S.V. Production of organic product in thermal destruction of rice husk. *Promyshlennost Kazakhstana – Industry of Kazakhstan*, 2007, no. 2 (41), pp. 56–58. In Rus.
14. Chang H., Yan H., Chong R. Effects of pre-carbonization on porosity development of activated carbons from rice straw. *Carbon*, 2001, vol. 39, no. 4, pp. 559–567.

15. Marsh H., Rodriguez-Reinoso F. *Activated Carbon*. Amsterdam, Elsevier Science & Technology Books, 2006. 530 p.
16. Efimov P.A., Pustovgar A.P. *Dobavka dlya modifikatsii gipsovykh vyazhushchikh, stroitelnykh materialov i betonov na ikh osnove* [Additive for modification of gypseous bindings, building mortars and concretes prepared on their base]. Patent RF, no. 2260572, 2005.
17. Sergienko V.I., Zemnukhova L.A., Egorov A.G., Shkorina E.D., Vasilyuk N.S. Renewable sources of chemical raw materials: complex processing of rice and buckwheat production waste. *Rossiyskiy Khimicheskiy Zhurnal*, 2004, vol. 48, no. 3, pp. 116–124. In Rus.
18. GOST 6217–64. *Ugol aktivny drevesny drobleny* [State Standard 6217–64. Wood crushed activated carbon. Specifications]. Moscow, Publishing House of Standards, 2003. 7 p.
19. Hieu N.M., Korobochkin V.V., Tu N.V. A study of silica separation in the production of activated carbon from rice husk in Vietnam. *Procedia Chemistry*, 2015, no. 15, pp. 308–312.
20. Hieu N.M. Utilizatsiya risovoy shelukhi Vyetnama s polucheniem aktivirovannogo uglya [Recycling rice husk of Vietnam to produce activated carbon]. *Problemy geologii i osvoeniya nedr. Materialy 20 Mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchenykh, posvyashchennogo 120-letiyu so dnya osnovaniya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Problems of geology and subsurface development Proc. of the 20<sup>th</sup> International Scientific Symposium of students and young scientists devoted to the 120<sup>th</sup> Anniversary of the founding of Tomsk Polytechnic University]. Tomsk, 2016. pp. 635–637.
21. Zemnukhova L.A., Panasenko A.E., Tsoi E.A., Fedorishcheva G.A., Shapkin N.P., Artemyanov A.P., Maiorov V.Yu. Composition and structure of amorphous silica produced from rice husk and straw. *Neorganicheskie materialy – Inorganic materials*, 2014, vol. 50, no. 1, pp. 75–81. In Rus.
22. Kholomeydyk A.N. *Poluchenie, sostav i svoystva kremniy- i uglerodsoderzhashchikh produktov pererabotki plodovykh obolochek risa*. Dis. Kand. nauk [Production, composition and properties of silicon- and carbon-containing products of floral glume processing of rice. Dr. Diss.]. Vladivostok, 2016. 136 p.
23. Alvarez J., Lopez G., Amutio M., Bilbao J., Olazar M. Upgrading the rice husk char obtained by flash pyrolysis for the production of amorphous silica and high quality activated carbon. *Bioresource Technology*, 2014, vol. 170, pp. 132–137.
24. Toledano A., Serrano L., Labidi J. Organosolv lignin depolymerization with different base catalysts. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2012, vol. 87, no. 11, pp. 1593–1599.
25. Korobochkin V.V., Tu N.V., Hieu N.M. Production of activated carbon from rice husk Vietnam. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43, pp. 1–6.
26. Grishechko L.I. *Issledovanie protsessa sinteza iz drevesnogo lignina zhidkikh uglevodorodov i aerorozley*. Dis. Kand. nauk [Investigation of synthesis from wood lignin of liquid hydrocarbon and aerosols. Dr. Diss.]. Krasnoyarsk, 2014. 150 p.
27. Konkin A.A. *Uglevodorodnye i drugie zharostoykie voloknistye materialy* [Hydrocarbon and other heat-resistant fibrous materials]. Moscow, Khimiya Publ., 1974. 376 p.
28. Addoun A., Dentzer J., Ehrburger P. Porosity of carbons obtained by chemical activation: Effect of the nature of the alkaline carbonates. *Carbon*, 2002, no. 40, pp. 1140–1143.
29. Kingle H., Badep E. *Aktivirovannye ugli i ikh promyshlennoe primeneniye* [Activated carbons and their industrial application]. Leningrad, Khimiya Publ., 1984. 216 p.
30. Song X., Zhang Y., Chang C. Novel method for preparing activated carbons with high specific surface area from rice husk. *Industrial and engineering chemistry research*, 2012, no. 51, pp. 15075–15081.
31. Hu S., Xiang J., Sun L., Xu M., Qiu J., Fu P. Characterization of char from rapid pyrolysis of rice husk. *Fuel processing technology*, 2008, no. 115, pp. 1915–1920.
32. Plachenov T.G., Kolosentsev S.D. *Porometriya* [Porometry]. Moscow, Khimiya Publ., 1988. 176 p.

Received: 4 April 2017.

#### Information about the authors

**Korobochkin V.V.**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Nguyen Manh Hieu**, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Usoltseva N.V.**, senior lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Nguyen Van Tu**, Dr. Sc., professor, Hanoi University of Science and Technology.

УДК 62–868:532.542.001.24

## РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗАТОПЛЕННОГО ВИБРИРУЮЩЕГО КОНФУЗОРА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВИБРАТОРА

Азин Антон Владимирович<sup>1</sup>,  
antonazin@niipmm.tsu.ru

Богданов Евгений Петрович<sup>2</sup>,  
epbogdanov@mail.ru

Пономарев Сергей Владимирович<sup>1</sup>,  
psv@niipmm.tsu.ru

Рикконен Сергей Владимирович<sup>1</sup>,  
rikk2@yandex.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность.** Актуальность работы обусловлена необходимостью создания энергоэффективного вибрационного оборудования для подготовки нефти к транспорту. Вибрационные технологии могут существенно повысить производительность нефтяного оборудования при процессах обессоливания, обезвоживания, снижения вязкости и гистерезисного нагрева нефти. Энергоэффективность применения вибрационной обработки заключается в том, что исключается применение энергозатратных термических методов обработки нефти. В технике не существует теоретических и инженерных методик расчета вибрирующего затопленного конфузора в сплошной жидкой среде. Затопленный в сплошной среде вибрирующий конфузор представляет собой нелинейную колебательную систему, поэтому сложно рассчитать режимы работы и энергетические характеристики подобных систем.

**Цель исследования:** разработка оригинальной инженерной методики определения энергетических параметров затопленного вибрирующего конфузора, работающего вблизи неподвижной поверхности моторной части электромагнитного вибратора.

**Методы исследования.** Основным методом исследования является математическое моделирование переходных процессов нелинейной колебательной системы затопленного вибрирующего конфузора с определением параметров работы: активных гидравлических потерь, амплитуды колебания конфузора, механической вибрационной мощности колебательной системы.

**Результаты.** Представлена математическая модель расчета работы затопленного вибрирующего конфузора в переходном процессе пуска с переходом в установившийся режим. Рассчитаны переходные процессы пуска колебательной системы вибрирующего конфузора: амплитуда колебания, активное сопротивление гидравлических потерь и мощность системы. Проведен анализ изменения параметров рабочих режимов затопленного конфузора в зависимости от величины тока электромагнитного вибратора. Представленная методика позволяет рассчитать и спроектировать затопленный конфузор электромагнитного вибратора, его мощность и производительность. Работа предназначена для разработчиков оборудования подготовки нефти к транспорту.

### Ключевые слова:

Конфузор, диффузор, жидкость, вибрация, сила.

### Введение

В последние годы большое внимание уделяется процессам добычи и переработки тяжелых высоковязких нефтей, доля которых в структуре запасов и объемов добычи углеводородного сырья непрерывно возрастает. Основным препятствием при добыче и переработке таких нефтей является их аномально высокая вязкость. В этом случае особую актуальность приобретает наличие технологии и технических средств, предназначенных для обеспечения надежной и безаварийной эксплуатации трубопроводов и оборудования.

При применении вибрационных воздействий создаются условия для достижения предельного уровня разрушения структуры молекулярных кристаллов парафиновых углеводородов, разрушения высокомолекулярных соединений, в результате которого существенно снижается вязкость неф-

ти. По энергозатратам вибрационные воздействия значительно эффективнее, чем термический способ снижения вязкости. Достижение требуемой вязкости нефти вибрацией достигается с помощью энергии, которая в 100 раз меньше, чем энергия, затрачиваемая при термическом воздействии. Во всех процессах подготовки нефти к транспорту (обезвоживание, обессоливание, дегазация), наиболее эффективное воздействие на нефть оказывает метод виброструйной магнитной активации (ВСМА) [1–3]. Метод ВСМА реализует «Вибратор электромагнитный активационный», который использует в своей работе резонансно-колебательный принцип и позволяет при минимальных энергозатратах оказывать комплексное воздействие на нефтепродукты: акустическое воздействие; мощное омагничивание; интенсивное перемешивание с высокими сдвиговыми скоростями. Энергия, необходимая

для создания режима, передается подвижным элементам посредством магнитного поля, и поэтому весь объем нефтепродукта подвергается активному омагничиванию (рис. 1) [1–6].

Колебательная система такого вибратора является нелинейной системой, и выбор конструкции устройства и мощности, передаваемой в среду, не поддается аналитическому решению, подобному линейной «классической» колебательной системе [7–10].

#### Постановка задачи

Целью работы является математическое моделирование работы нелинейной колебательной системы затопленного конфузора активационного электромагнитного вибратора с определением мощности, переданной нагрузке.

Данная колебательная система при возвратно-поступательном движении конфузора является нелинейной системой. Напряжение питания электромагнита однополупериодное. Нелинейна также тяговая сила  $F_{EM}=f(\delta)$  и сила гидравлических сопротивлений  $F_C=f(x, \delta, V_{AK}, \zeta_2, V_\delta, t)$ . Для определения режимов работы нелинейной системы и выяснения влияния конструкции конфузора на производительность вибратора необходимо провести анализ работы конфузора в динамическом режиме [11–14]:

$$(m_a + m_n) \frac{d^2 x}{dt^2} + F_C(x, \delta, V_{AK}, \zeta, V_\delta, t) + (k_{ПП} + k_{ж})x = F_{EM}(\delta, t), \text{ Н}, \quad (1)$$

где  $F_C(x, \delta, V_{AK}, \zeta_2, V_\delta, t) = A_{C1}(\delta)$  при токе электромагнита  $I(t) < 0$ ;  $F_C(x, \delta, V_{AK}, \zeta_2, V_\delta, t) = A_{C2}(\delta)$  при токе электромагнита  $I(t) \leq 0$ .

$$\begin{aligned} F_{C1}(\delta) &= F_{ZAZ(\delta)} + F_{SOP} + F_{LOB} + F_{S(1-2)}(\delta) + \\ &+ F_{r(2-3)}(\delta) + F_{K(3)} + F_{r(3-4)}, \text{ Н}; \\ F_{C2}(\delta) &= F_{ZAZ(\delta)} + F_{SOP} + F_{S(3-2)}(\delta) + \\ &+ F_{r(2-1)}(\delta) + F_{S(3-4)}(\delta) + F_{r(3)} + F_{LOB2}, \text{ Н}; \\ d_{SOP} &= 24 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad S_{VCH} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2, \\ S_{SOP} &= 0.453 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2, \quad S_{PL} = 3.923 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2, \\ S_{AKTIV} &= 5.73 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2, \quad S_{ZAZ}(\delta) = L_{OKR} \cdot \delta_i, \\ L_{OKR} &= 565 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad \eta = 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}, \\ \rho &= 1000 \text{ кг} / \text{м}^3, \end{aligned}$$

где  $m_a = 0,5$  кг – масса конфузора;  $m_n$  – присоединенная масса жидкости;  $m_n = \frac{8}{3} \rho R_{ЭКВ}^3 = 0,206 \text{ êä}$ ;

$R_{ЭКВ}$  – эквивалентный радиус конфузора, м;  $k_{ПП}$  – жесткость пружинного подвеса конфузора, Н/м;  $k_{ж}$  – жесткость жидкости (для воды  $k_{ж} = 0$  Н/м);  $x(t)$  – смещение конфузора, м;  $\delta(t) = x_0 - x(t)$  – зазор между конфузуром и моторной частью вибратора, м;  $F_{EM}(\delta, t)$  – тяговая сила электромагнита, Н;  $V_{AK}$  – скорость конфузора, м/с;  $V_\delta$  – скорость жидкости в зазоре между конфузуром, м/с;  $\zeta$  – коэффициент гидравлических сопротивлений системы.

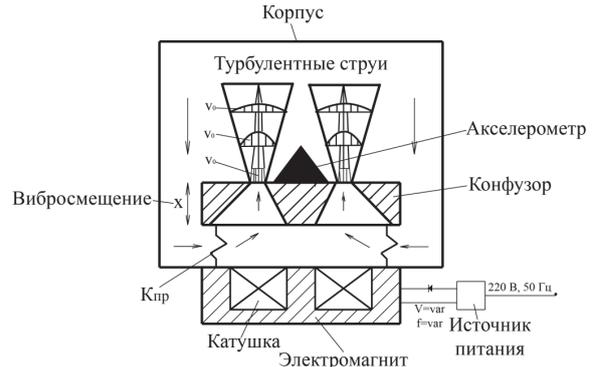


Рис. 1. Схематичное изображение лабораторного струйного электромагнитного вибратора

Fig. 1. Schematic representation of the laboratory jet electro-magnetic vibrator

Классическое уравнение возвратно-поступательного движения материальной точки имеет вид:

$$(m_a + m_n) \frac{d^2 x}{dt^2} + R \frac{dx}{dt} + (k_{ПП} + k_{ж})x = F_{EM}(\delta, t), \text{ Н}, \quad (2)$$

где  $R$  – диссипативная составляющая (потери на трение среды), кг/с.

Если записать уравнение (1) подобно (2),

$$(m_a + m_n) \frac{d^2 x}{dt^2} + R(x, \delta, V_{AK}, \zeta_2, V_\delta, t) \frac{dx}{dt} + (k_{ПП} + k_{ж})x = F_{EM}(\delta, t), \text{ Н}.$$

Тяговая сила электромагнита описывается следующим образом:

$$\begin{aligned} F_{EM}(\delta, t) &= \\ &= W^2 \mu_0 S1 \frac{I(t)^2}{[2(x_0 - x(t))]^2} \sin \omega t, \text{ при } I(t) > 0, \\ F_{EM}(\delta, t) &= 0, \text{ при } I(t) < 0. \end{aligned} \quad (3)$$

где  $W$  – количество витков катушек электромагнита;  $S1$  – площадь магнитопровода электромагнита;  $I(t)$  – ток в катушках электромагнита,  $I(t) = I_m \sin \omega t$ ;  $\mu_0$  – абсолютная магнитная проницаемость вакуума ( $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$  Гн/м);  $x_0$  – первоначальный магнитный зазор при  $t=0$ .

#### Численное решение

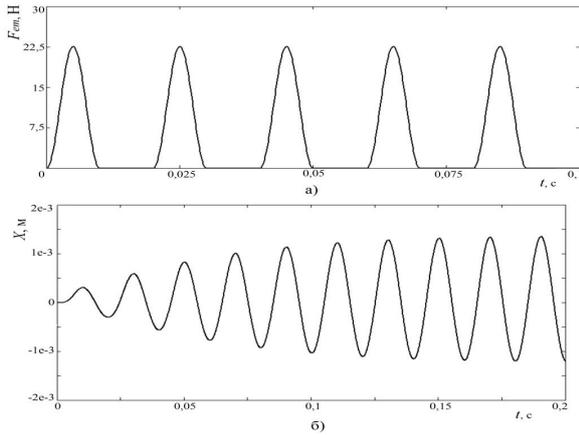
Расчет нелинейной колебательной системы проводится со следующими параметрами при собственной частоте системы  $f_0 = 50$  Гц;  $W = 2000$ ;  $(m_a + m_n) = 1$  кг;  $x_0 = 0,005$  м;  $S1 = 4 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>;  $\omega_0 = 2\pi f_0$  1/с;  $k_{ПП} = \omega_0^2 (m_a + m_n)$  кг/с.

Амплитуда колебаний должна ограничиваться величиной зазора:

$$\delta(t) = x_0 - x(t) = 0.$$

в противном случае конфузор начинает стучать по моторной части вибратора, а этот режим является аварийным.

Задается величина амплитуды тока  $I_m = 1$  А клапанного электромагнита, и определяется величина амплитуды колебаний конфузора (рис. 2).



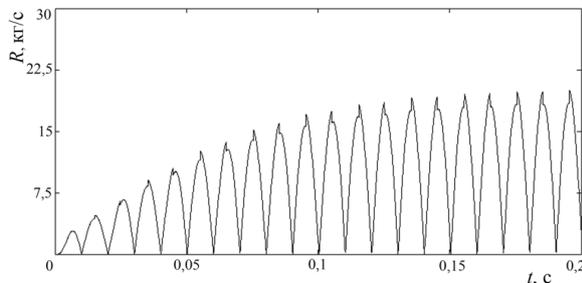
**Рис. 2.** Зависимость силы возмущения (а) и вибросмещения конфузора (б) от времени. Переходный процесс и установившийся режим движения конфузора при  $I_m=1$  А. Частота питания вибратора  $f=50$  Гц

**Fig. 2.** Time dependence of: а) shaking force; б) confuser vibration displacement. Transient and steady state motion of a confuser with  $I_m=1$  A. Line frequency of vibrator is  $f=50$  Hz

В установившемся режиме фаза виброскорости и фаза силы совпадают, что говорит о квазирезонансном режиме системы.

Диссипативная составляющая колебательной системы определяется в процессе счета по формуле:

$$R(x, \delta, V_{AK}, \zeta_2, V_\delta, t) = \frac{F_C(x, \delta, V_{AK}, \zeta, V_\delta, t)}{dx/dt}$$



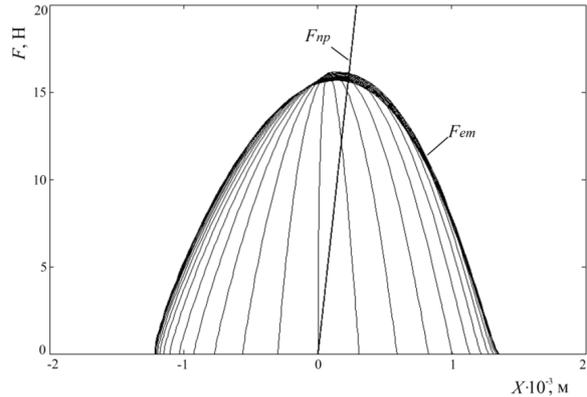
**Рис. 3.** Форма изменения диссипативной составляющей колебательной системы конфузора  $R(x, \delta, V_{AK}, \zeta_2, V_\delta, t)$  (кг/с),  $I_m=1$  А

**Fig. 3.** Shape of variation of a dissipative component of the confuser oscillating system  $R(x, \delta, V_{AK}, \zeta_2, V_\delta, t)$  (kg/s),  $I_m=1$  A

Диссипативный коэффициент в линейной колебательной системе является величиной постоянной и положительной. В нелинейной колебательной системе диссипативный коэффициент будет изменяться нелинейно в зависимости от ряда переменных параметров. В то же время диссипативный коэффициент должен быть положительным с точки зрения устойчивости режимов системы (рис. 3, 6, 9).

Рассчитывается энергия конфузора [1–3, 15–17] по формуле:

$$W_{НАГР} = \int_{X_{MIN}}^{X_{MAX}} F_{EM}(t) dx(t)$$



**Рис. 4.** Энергетическая петля гистерезиса колебательной системы конфузора при амплитуде тока  $I_m=1$  А. Частота питания вибратора  $f=50$  Гц

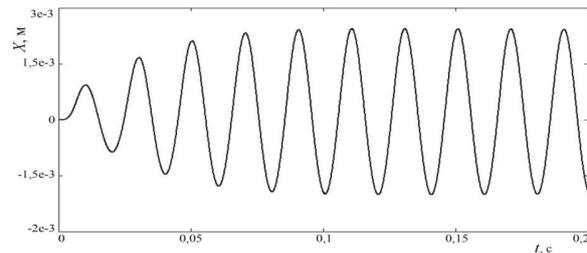
**Fig. 4.** Energy hysteresis loop of the confuser oscillating system at the current amplitude  $I_m=1$  A. Line frequency of vibrator is  $f=50$  Hz

Площадь энергетической петли гистерезиса равна энергии, отдаваемой в среду вибрирующим конфузором за один период колебания (рис. 4):

$$W=16 \cdot 10^{-3} \text{ Дж.}$$

Мощность в нагрузке составляет:

$$P_{НАГР} = Wf = 16 \cdot 10^{-3} \cdot 50 = 0,8 \text{ Вт.}$$



**Рис. 5.** Зависимость вибросмещения конфузора от времени, переходный процесс и установившийся режим движения конфузора при  $I_m=1,7$  А. Частота питания вибратора  $f=50$  Гц

**Fig. 5.** Time dependence of the confuser vibration displacement, transient and steady state motion of confuser at  $I_m=1,7$  A. Line frequency of vibrator is  $f=50$  Hz

На рис. 4, 7, 10 представлены энергетические петли в осях «тяговая сила  $F_{EM}$  – вибросмещение  $X$ ». Площадь петли равна энергии, которую активатор передаёт нагрузке за одно колебание (цикл). Гидромеханическая система существенно отличается от линейной системы, так как форма энергетической петли отличается от формы окружности или эллипса.

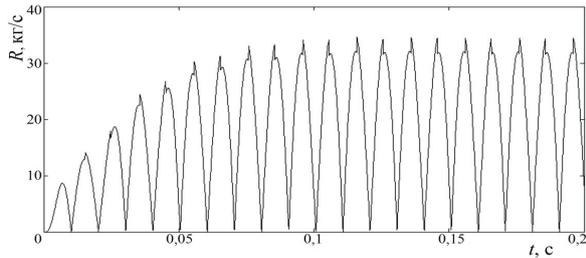
Временные характеристики колебательной системы при амплитуде тока 1,7 А представлены на рис. 5–7.

Энергия, отдаваемая в среду вибрирующим конфузором за один период колебания:

$$W=115 \cdot 10^{-3} \text{ Дж.}$$

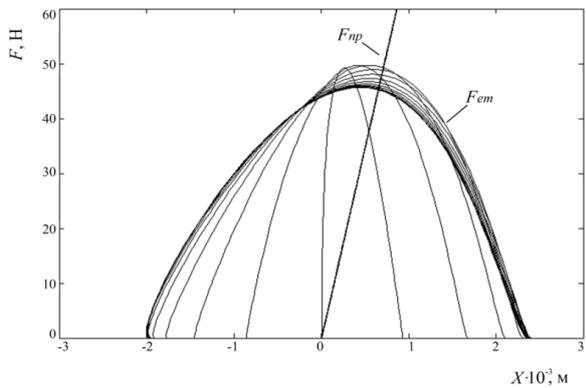
Мощность в нагрузке составляет

$$P_{НАГР} = Wf = 115 \cdot 10^{-3} \cdot 50 = 5,75 \text{ Дж.}$$



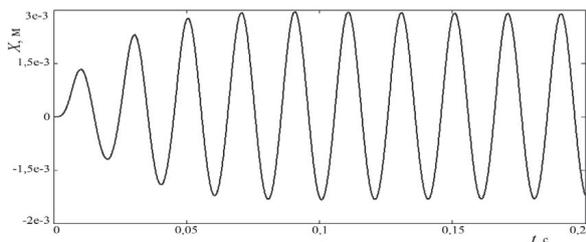
**Рис. 6.** Форма изменения диссипативной составляющей колебательной системы конфузора  $R(x, \delta, V_{AK}, \zeta_2, V_{\delta r}, t)$  (кг/с),  $I_m=1,7$  А

**Fig. 6.** Shape of variation of the dissipative component of the confuser oscillating system  $R(x, \delta, V_{AK}, \zeta_2, V_{\delta r}, t)$  (kg/s),  $I_m=1,7$  A



**Рис. 7.** Энергетическая петля гистерезиса колебательной системы конфузора при амплитуде тока  $I_m=1,7$  А. Частота питания вибратора  $f=50$  Гц

**Fig. 7.** Energy hysteresis loop of the confuser oscillating system when the amplitude of current is  $I_m=1,7$  A. Line frequency of vibrator is  $f=50$  Hz



**Рис. 8.** Зависимость вибросмещения конфузора от времени, переходный процесс и установившийся режим движения конфузора при  $I_m=2$  А. Частота питания вибратора  $f=50$  Гц

**Fig. 8.** Time dependence of the confuser vibration displacement, transient and steady state motion of confuser with  $I_m=2$  A. Line frequency of vibrator is  $f=50$  Hz

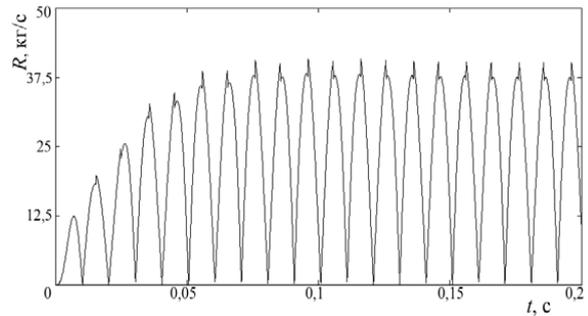
Временные характеристики колебательной системы при амплитуде тока 2 А представлены на рис. 8–10.

Энергия, отдаваемая в среду вибрирующим конфузуром за один период колебания:

$$W=200 \cdot 10^{-3} \text{ Дж.}$$

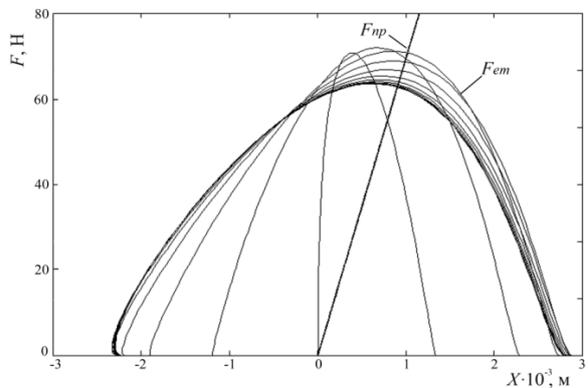
Мощность в нагрузке составляет:

$$P_{\text{НАГР}} = Wf = 200 \cdot 10^{-3} \cdot 50 = 10 \text{ Вт.}$$



**Рис. 9.** Форма изменения диссипативной составляющей колебательной системы конфузора  $R(x, \delta, V_{AK}, \zeta_2, V_{\delta r}, t)$  (кг/с),  $I_m=2$  А

**Fig. 9.** Shape of variation of the dissipative component of the confuser oscillating system  $R(x, \delta, V_{AK}, \zeta_2, V_{\delta r}, t)$  (kg/s),  $I_m=2$  A



**Рис. 10.** Энергетическая петля гистерезиса колебательной системы конфузора при амплитуде тока  $I_m=2$  А. Частота питания вибратора  $f=50$  Гц

**Fig. 10.** Energy hysteresis loop of the confuser oscillating system when the amplitude of current is  $I_m=2$  A. Line frequency of vibrator is  $f=50$  Hz

#### Анализ переходного процесса пуска активатора при резонансной частоте на разные токи катушки

При изменении величины амплитудного значения тока электромагнита  $I_m=1,0-2,0$  А, ( $f=50$  Гц) рассчитываются динамические режимы системы. Результаты расчета установившихся и переходных процессов гидромеханической системы представлены на рис. 11. На рисунке показаны следующие параметры в зависимости от амплитуды тока электромагнита:  $X$  – вибросмещение активатора;  $F_{EM}$  – сила электромагнита, приложенная к конфузур;  $R$  – диссипативная составляющая уравнения движения системы;  $P_n$  – активная мощность, отдаваемая конфузуром в нагрузку.

#### Выводы

1. Представлена методика, разработанная для определения силовой тяговой характеристики и полезной активной мощности вибрирующего конфузора, выполненного в виде якоря клапанного электромагнита и работающего в жидкости с физическими свойствами воды.

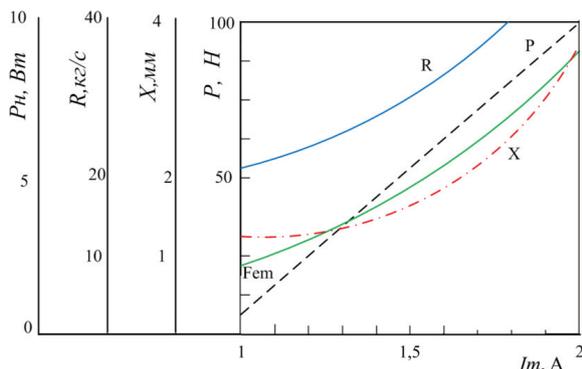


Рис. 11. Расчетные рабочие и мощностные характеристики вибрирующего конфузора электромагнитного погружного вибратора

Fig. 11. Calculated work and power characteristics of electromagnetic vibrating confuser of submersible vibrator

2. Колебательная система является сугубо нелинейной системой, и её расчет невозможен аналитическими методами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рикконен С.В., Лоскутова Ю.В. Магнитогидромеханические поля: воздействие на вязкостно-температурные свойства высокопарафинистой нефти // Oil & Gas Journal Russia. – 2014. – № 3. – С. 28–31.
2. Rikkonen S., Bogdanov E., Nomokonova Yu. Oscillatory system of the jet electromagnetic vibrator // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2014. – V. 66. – P. 1–4.
3. Ткачев О.А., Тугунов П.И. Сокращение потерь нефти при транспорте и хранении. – М.: Недра, 1988. – 116 с.
4. Экспериментальное и компьютерное моделирование гидродинамического шума потока рабочей среды в проточных частях регулирующих органов гидравлических систем / Э.Г. Берестовицкий, М.А. Ермилов, П.И. Кизилов, А.Н. Крючков // XXVII сессия Российского акустического общества, посвященная памяти ученых-акустиков ФГУП «Крыловский государственный научный центр» А.В. Смольякова и В.И. Попкова. – СПб.: Изд-во РАО, 2014. – 10 с.
5. Shives M.R. Hydrodynamic modeling, optimization and performance assessment for ducted and non-ducted tidal turbines. URL: [http://pics.uvic.ca/sites/default/files/uploads/publications/shives\\_thesis\\_2011.pdf](http://pics.uvic.ca/sites/default/files/uploads/publications/shives_thesis_2011.pdf) (дата обращения 01.02.2017).
6. Пассар А.В., Тимошенко Д.В. Численная реализация комплексного метода расчета на примере проточной части турбины турбокомпрессора ТКР911 // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 5. – С. 79–90.
7. Shina P.K., Das A.K., Majumdar B. Numerical Investigation of flow through Annular Diffusing Duct // International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS. – 2011. – V. 11. – № 3. – P. 186–196.
8. Расчет гидравлических сопротивлений затопленного вибрирующего конфузора электромагнитного вибратора / А.В. Азин, Е.П. Богданов, С.В. Пономарев, С.В. Рикконен // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 2. – С. 67–75.
9. Gant S., Stallard T. Modelling a tidal turbine in unsteady flow // Proc. Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. – Vancouver BC, Canada, 2008. – P. 473–479.
10. Cherry E.M. Three-dimensional velocity measurements in annular segments including the effects of upstream strut wake // International journal of heat and fluid flow. – 2010. – V. 31. – P. 569–575.

3. Из-за существенной нелинейности колебательной системы коэффициент диссипативной составляющей уравнения движения за период колебаний изменяется от нуля до значений, соответствующих изменению гидравлических сопротивлений.
4. Показано, что для рассматриваемого диапазона изменения вибросмещения рабочие характеристики являются нелинейными, однако зависимость мощности излучения конфузора от изменения амплитуды тока электромагнита близка к линейной.
5. Для электромагнита другой конструкции, с другой зависимостью тяговой силы от зазора, уравнения (2) и (3) необходимо рассчитывать с правой частью, соответствующей конкретному электромагниту. Данная методика позволяет определить силу и мощность электромагнита вибратора при разных значениях вязкости, плотности жидкости и конструктивных особенностях активатора и тяговой характеристики электромагнита [18–22].

11. Рыженьков В.О., Иващенко В.А., Мулладжанов Р.И. Численное моделирование турбулентного течения и теплопереноса в канале методом спектральных элементов: влияние пространственного разрешения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 6. – С. 55–63.
12. Рикконен С.В. Энергетика вязкого течения сплошных сред. Научно-технологическое развитие нефтегазового комплекса // Доклады IV международных научных Надиловских чтений. – Алматы; Томск, 2006. – С. 83–92.
13. Keerthana R., Jamuna R.G. Flow analysis of annular diffusers // International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA). – 2012. – V. 2. – Iss. 3. – P. 2348–2351.
14. Расчетно-экспериментальное исследование кавитационного обтекания гидрокрыла NASA0015 / А.В. Сентябов, М.В. Тимошевский, К.С. Первунин, А.А. Гаврилов, Д.М. Маркович, А.А. Дектерёв // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 8. – С. 28–43.
15. Chetan V., Satish D.V., Dr. Prakash S. Kulkarni. Numerical Investigations of PGT10 Gas Turbine Exhaust Diffuser Using Hexahedral Dominant Grid // International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT). – 2013. – V. 3. – P. 392–400.
16. Karsten R., Swan A., Culina J. Assessment of arrays of in-stream tidal turbines in the bay of fundy. Available at: <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0189> (accessed 14 January 2017).
17. Katepalli R. Sreenivasan. Liquid nitrogen in fluid dynamics: Visualization and velocimetry using frozen particles // Review of Scientific Instruments. – 2012. – V. 83. – P. 085101.
18. The prediction of the hydrodynamic performance of marine current turbines / W. Batten, A. Bahaj, A. Molland, J. Chaplin // Renewable Energy. – 2008. – V. 33. – P. 1085–1096.
19. Пургина Д.В., Строкова Л.А., Кузеванов К.И. Моделирование гидрогеологических условий для обоснования противоползневых мероприятий на участке набережной реки Камы в городе Перми // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 6. – С. 116–127.
20. Sagar D., Paul A.R., Jain A. Experimental investigations of flow computational fluid dynamics investigation of turbulent separa-

- ted flows in axisymmetric diffusers // International Journal of Engineering, Science and Technology. – 2011. – V. 3. – № 2. – P. 104–109.
21. Shives M. Evaluation of discrete blade effects for ducted turbines using an actuator-line CFD method. – Greater Victoria: University of Victoria, 2011. – 120 p.
22. Prakash R. Experimental Investigations of Flow through Annular Diffuser with and without Struts // European Journal of Scientific Research. – 2011. – V. 52. – № 3. – P. 366–384.

*Поступила 03.04.2017 г.*

#### **Информация об авторах**

**Азин А.В.**, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Национального исследовательского Томского государственного университета.

**Богданов Е.П.**, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехнических комплексов и материалов Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Пономарев С.В.**, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Национального исследовательского Томского государственного университета.

**Рикконен С.В.**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Национального исследовательского Томского государственного университета.

UDK 62–868:532.542.001.24

## CALCULATION OF ENERGY PARAMETERS OF SUBMERGED VIBRATING CONFUSER OF AN ELECTROMAGNETIC VIBRATOR

**Anton V. Azin<sup>1</sup>,**  
antonazin@niipmm.tsu.ru

**Eugeny P. Bogdanov<sup>2</sup>,**  
epbogdanov@mail.ru

**Sergey V. Ponomarev<sup>1</sup>,**  
psv@niipmm.tsu.ru

**Sergey V. Rikkonen<sup>1</sup>,**  
rikk2@yandex.ru

<sup>1</sup> National Research Tomsk State University,  
36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

<sup>2</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the discussed issue is caused by the necessity to develop the energy-efficient vibrating equipment for oil treatment to transportation. The vibration techniques can significantly improve the performance of oil equipment in its desalting, dewatering, viscosity reduction and hysteretic heating. The energy efficiency of application of vibrating processing consists in the fact that using energy-intensive thermal methods of oil processing is excluded. There are no theoretical and engineering methods of calculation of vibrating submerged cofusers in a continuous liquid medium. The vibrating confuser submerged in a continuous body is a nonlinear oscillatory system, therefore it is difficult to calculate the operating regimes and energetic characteristics of such systems.

**The main aim** of the study is to develop the original engineering method of calculating the energetic parameters of submerged vibrating confuser working close to the stationary surface of motor part of electromagnetic vibrator.

**Research methods.** The main method of investigation is a mathematical modeling of transient processes of a nonlinear vibrating system of submerged vibrating confuser with determination of the next working parameters: active resistance head, vibrational amplitude of confuser, mechanical vibrational power of oscillating system.

**Results.** The authors found out the mathematical model of calculation of the submerged vibrating confuser operation in a starting duty with a transient to a steady state mode. The authors calculated the transient phenomenon of running the oscillating system of vibrational confuser: amplitude of oscillation, active resistance of resistance head and power of the system. The authors analyzed the changes in operating parameters of the submerged confuser depending on the amount of current of the electromagnetic vibrator. The technique introduced allows calculating and designing the flooded confuser electromagnetic vibrator, its capacity and performance. The issue is intended for developers of oil equipment.

### Key words:

Confuser, diffuser, liquid, vibration, force.

### REFERENCES

- Rikkonen S.V., Loskutova Yu.V. Magnetohydrodynamic fields: effect on viscosity-temperature properties of high-paraffin oil. *Oil & Gas Journal Russia*, 2014, no. 3, pp. 28–31. In Rus.
- Rikkonen S., Bogdanov E., Nomokonova Yu. Oscillatory system of the jet electromagnetic vibrator. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 66, pp. 1–4.
- Tkachev O.A., Tugunov P.I. *Sokrashchenie poter nefti pri transporte i khranении* [Oil losses reduction at transport and storage]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 116 p.
- Berestovitsky E.G., Ermilov M.A., Kizilov P.I., Kryuchkov A.N. Eksperimentalnoe i kompyuternoe modelirovanie gidrodinamicheskogo shuma potoka rabochey sredy v protochnykh chastyakh reguliruyushchikh organov gidravlicheskih sistem [Experimental and computer modeling of hydrodynamic noise of the operating environment flow in the running parts of the regulators of hydraulic systems]. *XXVII sessiya Rossiyskogo akusticheskogo obshchestva, posvyashchennaya pamyati uchenykh-akustikov FGUP «Krylovskiy gosudarstvenny nauchny tsentr» A.V. Smolyakova i V.I. Popkova* [XXVII session of the Russian acoustic society devoted to the memory of scientists-acoustics A.V. Smolyakov and V.I. Popkov of «Krylov State Scientific Center»]. St-Petersburg, 2014. pp.10–14.
- Shives M.R. *Hydrodynamic modeling, optimization and performance assessment for ducted and non-ducted tidal turbines*. Available at: [http://pics.uvic.ca/sites/default/files/uploads/publications/shives\\_thesis\\_2011.pdf](http://pics.uvic.ca/sites/default/files/uploads/publications/shives_thesis_2011.pdf) (accessed 1 February 2017).
- Passar A.V., Timoshenko D.V. Numerical implementation of the complex method based on the example of the turbine of the turbocharger TKP911. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 5, pp. 79–90. In Rus.
- Shina P.K., Das A.K., Majumdar B. Numerical Investigation of flow through Annular Diffusing Duct. *International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS*, 2011, vol. 11, no. 3, pp. 186–196.
- Azin A.V., Bogdanov E.P., Ponomarev S.V., Rikkonen S.V. Calculation of hydraulic resistances of a submerged vibrating confuser of an electromagnetic vibrator. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 2, pp. 67–75. In Rus.
- Gant S., Stallard T. Modelling a tidal turbine in unsteady flow. *Proc. 18<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference*. Vancouver BC, 2008. pp. 473–481.

10. Cherry E.M. Three-dimensional velocity measurements in annular segments including the effects of upstream strut wake. *International journal of heat and fluid flow*, 2010, vol. 31, pp. 569–575.
11. Ryzhenkov V.O., Ivashchenko V.A., Mullyadzhyanov R.I. Numerical simulation of turbulent flow and heat transfer in a channel with the method of spectral elements: the influence of configuration. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2016, vol. 327, no. 6, pp. 55–63. In Rus.
12. Rikkonen S.V. Energetika vyzkogo techeniya sploshnykh sred. Nauchno-tehnologicheskoe razvitiye neftegazovogo kompleksa [Energy of viscous flow of continuum. Scientific-technological development of oil and gas complex]. *Doklady IV mezhdunarodnykh nauchnykh Nadirovskih chteny* [Proc. IV<sup>th</sup> Int. Scient. Nadrowski readings]. Almaty; Tomsk, 2006. pp. 83–92.
13. Keerthana R., Jamuna R.G. Flow analysis of annular diffusers. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 2012, vol. 2, Iss. 3, pp. 2348–2351.
14. Sentyabov A.V., Timoshevsky M.V., Pervunin K.S., Gavrilov A.A., Markovich D.M., Dektarev A.A. Numerical and experimental investigation of cavitation flow of the NACA0015 hydrofoil. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2016, vol. 327, no. 8, pp. 28–43. In Rus.
15. Chetan V., Satish D.V., Dr. Prakash S. Kulkarni. Numerical Investigations of PGT10 Gas Turbine Exhaust Diffuser Using Hexahedral Dominant Grid. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, 2013, vol. 3, pp. 392–400.
16. Karsten R., Swan A., Culina J. Assessment of arrays of in-stream tidal turbines in the bay of fundy. Available at: <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0189> (accessed 14 January 2017).
17. Katepalli R. Sreenivasan. Liquid nitrogen in fluid dynamics: Visualization and velocimetry using frozen particles. *Review of Scientific Instruments*, 2012, vol. 83, pp. 085101.
18. Batten W., Bahaj A., Molland A., Chaplin J. The prediction of the hydrodynamic performance of marine current turbines. *Renewable Energy*, 2008, vol. 33, pp. 1085–1096.
19. Purgina D.V., Strokova L.A., Kuzevanov K.I. Modelling hydrogeological conditions for justification of protective measures in the part of the embankment of the Kama river in Perm. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2016, vol. 327, no. 6, pp. 116–127. In Rus.
20. Sagar D., Paul A.R., Jain A. Experimental investigations of flow computational fluid dynamics investigation of turbulent separated flows in axisymmetric diffusers. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 2011, vol. 3, no. 2, pp. 104–109.
21. Shives M. *Evaluation of discrete blade effects for ducted turbines using an actuator-line CFD method*. Greater Victoria, University of Victoria, 2011. 120 p.
22. Prakash R. Experimental Investigations of Flow through Annular Diffuser with and without Struts. *European Journal of Scientific Research*, 2011, vol. 52, no. 3, pp. 366–384.

*Received: 3 April 2017.*

#### Information about the authors

**Anton V. Azin**, Cand. Sc., scientific associate, National Research Tomsk State University.

**Eugeny P. Bogdanov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Sergey V. Ponomarev**, Dr. Sc., senior researcher, National Research Tomsk State University.

**Sergey V. Rikkonen**, Cand. Sc., senior researcher, National Research Tomsk State University.

УДК 621.43

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТЕПЕНИ РАДИАЛЬНОСТИ НА СТРУКТУРУ ПОТОКА В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ РАДИАЛЬНО-ОСЕВОЙ ТУРБИНЫ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

Пассар Андрей Владимирович<sup>1</sup>,  
passar\_av@mail.ru

Тимошенко Денис Владимирович<sup>2</sup>,  
000595@pnu.edu.ru

<sup>1</sup> Вычислительный центр ДВО РАН,  
Россия, 680000, г. Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, 65.

<sup>2</sup> Тихоокеанский государственный университет,  
Россия, 680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136.

Актуальность работы обусловлена необходимостью совершенствования проточной части радиально-осевой турбины нового поколения газотурбинных установок, применяемых в различных отраслях промышленности. Отдельной группой газотурбинных установок малой мощности являются микротурбины электрической мощностью от 15 до 600 кВт, в качестве топлива использующие попутный нефтяной газ.

**Цель работы:** при помощи модели Я.А. Сироткина осесимметричного вихревого течения невязкой сжимаемой жидкости в проточной части радиально-осевых турбомашин исследовать влияние степени радиальности на структуру потока газа в проточной части радиально-осевой турбины с диаметром рабочего колеса 140 мм.

**Методы исследования:** метод Я.А. Сироткина для расчета осесимметричного вихревого течения невязкой сжимаемой жидкости в проточной части радиально-осевых турбомашин.

**Результаты.** Изложены проблемы выбора степени радиальности радиально-осевой турбины газотурбинной установки малой мощности. На основе метода неопределенных множителей Лагранжа спроектированы рабочие колеса радиально-осевой турбины со степенью радиальности  $\mu=0,47$ ,  $\mu=0,52$ ,  $\mu=0,57$ . Проведены расчетные исследования по влиянию степени радиальности на характеристики радиально-осевой турбины. Представлены характеристики турбин по КПД и по мощности в стационарном потоке, полученные на основе метода для расчета турбины на среднем радиусе. На основе этих характеристик показано, что с уменьшением степени радиальности КПД турбины и мощность растут. Показано влияние степени радиальности на структуру потока в проточной части радиально-осевой турбины. В результате расчета осесимметричного течения в рабочих колесах приведены распределения меридианных скоростей в зависимости от длины нормали и распределение относительной скорости вдоль линии меридианного обвода рабочих колес. На основе этих распределений определена зона обратных токов. Представлены результаты расчета поверхностей токов. Граница отрывной зоны определена при условии  $w_z=0$ . Во всех расчетных областях погрешность по скоростям  $w$ , составила менее 1 %. После расчета структуры потока по модели Я.А. Сироткина показано, что с уменьшением степени радиальности, несмотря на высокий КПД, определенный по модели расчета на среднем радиусе, возрастает зона обратных токов. Представлено экспериментальное и расчетное распределение абсолютных скоростей на выходе из рабочего колеса турбины со степенью радиальности  $\mu=0,57$ . Сравнение результатов расчета осесимметричного течения по методу Я.А. Сироткина с результатами эксперимента показывает, что имеется незначительное расхождение экспериментальных и расчетных значений абсолютных скоростей в прикорневой и центральной областях потока.

### Ключевые слова:

Степень радиальности, радиально-осевая турбина, коэффициент напора, проточная часть, характеристики турбины, степень реактивности, линия тока, газотурбинная установка.

### Введение

Проблема использования попутного нефтяного газа (ПНГ) в России не нова. Об этом сейчас немало говорят и пишут. Специфика добычи ПНГ заключается в том, что он является побочным продуктом нефтедобычи.

Россия занимает ведущие позиции в мире по объемам сжигания ПНГ. Сжигание ПНГ наносит ущерб окружающей среде, вред здоровью населения, а также экономике страны – ценное химическое сырье и энергетический ресурс просто выбрасывается на ветер.

В настоящее время принято правительственное решение о сроке доведения уровня использования ПНГ до среднемировых, т. е. 95 % с 2012 г. (Постановление Правительства РФ от 8 января 2009 г. № 7).

Компонентный состав ПНГ представляет собой смесь различных газообразных и жидких углеводородов. В этой связи появляется возможность рационального использования ПНГ. В частности, к путям утилизации ПНГ можно отнести его использование в качестве топлива газотурбинных установок.

Газотурбинные установки с малоразмерными радиально-осевыми турбинами нашли широкое применение в качестве автономных источников электрической и тепловой энергии. Установки этого типа характеризуются минимальным количеством ступеней, что определяет простоту конструкции, компактность, надежность, умеренную стоимость монтажа и технического обслуживания. Типичными представителями этого семейства являются установки OP16 компании «Opra Turbines» и KG-3 компании «Dresser-Rand» электриче-

ской мощностью около 2000 кВт. Отдельной группой ГТУ малой мощности являются микротурбины (microturbines) электрической мощностью от 15 до 600 кВт [1], в качестве топлива использующие попутный нефтяной газ. Ключевыми особенностями данных микротурбин являются прямой привод высокооборотного генератора и регенеративный цикл. Наиболее известны микротурбины, производимые компанией «Capstone Turbine Corporation».

Известно, что эффективность газотурбиной установки определяется в том числе эффективностью газовой турбины. Одним из основных геометрических параметров, определяющих эффективность радиально-осевой турбины, является степень радиальности  $\mu = R_{2cp}/R_1$ , где  $R_{2cp}$  – средний радиус рабочего колеса на выходе;  $R_1$  – радиус рабочего колеса на входе. Степень радиальности рабочего колеса оказывает существенное влияние на качество структуры потока газа и пропускную способность турбины.

Анализ параметров, определенных на среднем радиусе, показывает [2], что по мере уменьшения значения параметра  $\mu$  наблюдается увеличение эффективности рабочего колеса за счет возрастания доли теоретической работы, производимой кориолисовыми силами. На практике при небольших размерах втулки рабочего колеса невозможно разместить достаточное число лопаток для обеспечения безотрывного течения газа, так как при этом происходит сильное загромождение проходного сечения.

В работе [3] проведены расчетные исследования по влиянию степени радиальности на эффективность срабатывания нестационарного потока выпускных газов в турбине, при этом использовалась методика Центрального научно-исследовательского дизельного института (ЦНИДИ). Показано, что оптимальным вариантом по коэффициенту использования располагаемой энергии импульса  $\eta_{\text{ин}}$  и эффективной мощности турбины  $N_T$  является турбина со степенью радиальности  $\mu = 0,52$ .

$$\eta_{\text{ин}} = \frac{\int_0^{\tau} H_T G_T \eta_T d\tau}{\int_0^{\tau} H_T G_T d\tau},$$

где  $H_T$  – мгновенное значение изоэнтропийного теплоперепада от полных параметров перед турбиной до статического давления за турбиной, Дж/кг;  $G_T$  – мгновенные значения расхода выпускных газов, кг/с;  $\eta_T$  – мгновенные значения эффективного КПД турбины;  $\tau$  – время импульса.

В работах [4, 5] проводились экспериментальные исследования по определению влияния параметра  $\mu$  на эффективность радиально-осевой турбины. Различные значения параметра  $\mu$  получали изменением диаметра втулки. Было установлено, что снижение степени радиальности  $\mu$  с 0,627 до 0,513 приводит к возрастанию КПД турбины почти на 6 %.

Однако ни модель расчета турбины на среднем радиусе, ни методика ЦНИДИ, ни эксперимент не позволяют увидеть качественную картину течения газа внутри межлопаточного канала турбины.

Анализ специализированных коммерческих CFD-пакетов (Computational Fluid Dynamics), например таких, как ANSYS CFX [6–8], CFX-TASCflow, FlowVision и др., позволяющих производить расчет структуры потока в проточной части турбомашин, показал, что эти они являются хорошим инструментом моделирования течений в проточных частях турбомашин, но недоступны в силу своей дороговизны. К примеру, одно рабочее место программного комплекса ANSYS CFX стоит 60000 долларов США (примерно 3900000 рублей) по данным 2016 г. Стоимость одного рабочего места пакета Flow Vision 2900000 рублей. Поэтому для дальнейшего исследования останавливаемся на модели Я.А. Сироткина осесимметричного вихревого течения невязкой сжимаемой жидкости в проточной части радиально-осевых турбомашин [9].

Целью настоящей работы является исследование влияния степени радиальности на структуру потока газа в проточной части радиально-осевой турбины энергетической газотурбинной установки малой мощности при помощи модели Я.А. Сироткина осесимметричного вихревого течения невязкой сжимаемой жидкости в проточной части радиально-осевых турбомашин.

#### Постановка задачи

В настоящей работе для оценки качества проточной части турбины использовалась математическая модель Я.А. Сироткина осесимметричного вихревого течения невязкой сжимаемой жидкости, предложенная в работе [9].

Осесимметричный вихревой поток невязкой сжимаемой жидкости в радиально-осевых турбомашинах описывается следующей системой уравнений:

- уравнение движения в энергетической форме Крокко

$$\bar{w}(\nabla \bar{c}) = \nabla h^* - T \nabla S - \bar{F} + T \frac{\bar{w}}{w^2} \frac{dS}{dt}; \quad (1)$$

- уравнение неразрывности  $\nabla(\chi \rho \bar{w}) = 0;$  (2)

- уравнение первого закона термодинамики

$$\frac{dU}{dt} + p \frac{d\rho^{-1}}{dt} = T \frac{dS}{dt};$$

- уравнение состояния совершенного газа

$$p = \rho RT,$$

где

$$dU = c_v dT, \quad h^* = h + \frac{w^2 - u^2}{2},$$

$$h = c_p T = \frac{k}{k-1} RT, \quad u = \omega r, \quad \left( k = \frac{c_p}{c_v} \right).$$

В уравнениях (1)–(4) приняты следующие обозначения:  $w$  и  $c$  – относительная и абсолютная скорость потока, м/с;  $\nabla$  – оператор набла  $\nabla = \frac{e_i}{H_i} \frac{\partial}{\partial q_i}$ ;

$q_i, e_i, H_i$  – криволинейная координата, ее единичный вектор и коэффициент Ляме;  $\nabla h^*$  – градиент удельной полной энтальпии в относительном потоке, м/с<sup>2</sup>;  $h$  – удельная энтальпия, Дж/кг;  $\nabla S$  – градиент удельной энтропии, м<sup>2</sup>/(Кг·с<sup>2</sup>);  $T$  – абсолютная температура, К;  $F$  – массовая сила, Н;  $U$  – удельная внутренняя энергия, Дж/кг;  $k$  – показатель изоэнтропы;  $c_p$  и  $c_v$  – удельные теплоемкости при постоянном давлении и объеме, Дж/(кг·К);  $p$  – давление, МПа;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $R$  – газовая постоянная, Дж/(кг·К);  $u$  – окружная скорость вращения ротора, м/с;  $\omega$  – угловая скорость рабочего колеса, с<sup>-1</sup>;  $\chi$  – коэффициент стеснения;  $r$  – расстояние от оси вращения, м.

Автором работы [9] были приняты следующие упрощающие допущения:

1. Поток установившийся, вихревой, причем завихренность обусловлена наличием лопастей в потоке (т. е. присоединенными и свободными вихрями).

2. Жидкость сжимаемая и идеальная (невязкая и нетеплопроводная), основной эффект вязкости учитывается коэффициентом изоэнтропийности  $\sigma = \exp[(S_1 - S)/R]$  ( $S_1$  – энтропия впереди решетки,  $S$  – текущая энтропия,  $R$  – газовая постоянная), который считается заданной функцией параметров потока и координат.
3. Изменение энтропии  $S$  поперек и вдоль линий тока задается коэффициентом изоэнтропийности  $\sigma$ .
4. Изменение коэффициента изоэнтропийности  $\sigma$  задается квадратичной функцией вдоль линий тока.
5. Гипотеза осевой симметрии потока.

Согласно гипотезе осевой симметрии потока [10, 11], воздействие лопастей на поток заменяется равномерно распределенными по окружности полями: массовых сил  $F$ ; коэффициентов стеснения  $\chi = 1 - \Delta/t$  ( $\Delta$  – толщина лопасти в окружном направлении,  $t$  – шаг решетки); углов средней межлопастной поверхности тока  $\beta'$  и  $\delta'$  (рис. 1). Это позволяет трехмерную задачу свести к осесимметричной.

В криволинейной естественной системе координат  $n, \varphi, s$  рис. 1 (где  $s$  – линии тока в меридио-

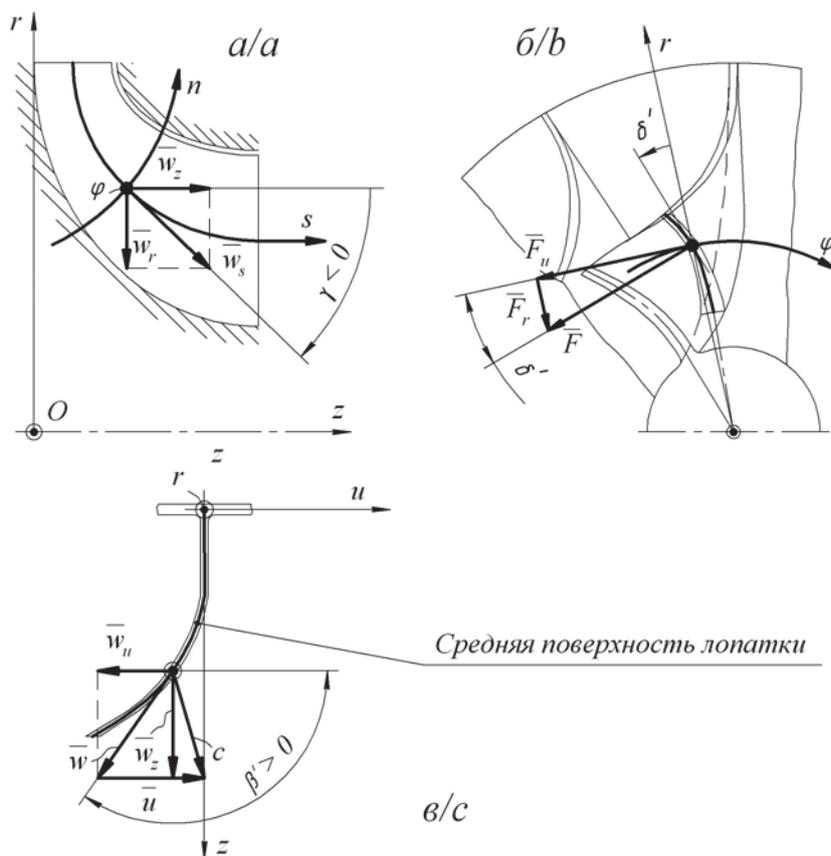


Рис. 1. Основные обозначения геометрических и газодинамических параметров осредненного осесимметричного потока в полуфиксированной сетке: а, б, в – соответственно, проекции на плоскости, перпендикулярные к осям  $\varphi, z$  и  $r$

Fig 1. Key designations of geometrical and gas-dynamic parameters of averaged axial-symmetric stream in a semifixed grid: а, б, с are the projections on a plane perpendicular to axes  $\varphi, z$  and  $r$

нальной плоскости,  $n$  – ортогональные к ним кривые,  $\varphi$  совпадает с окружным направлением) уравнения (1) и (2) записываются в виде

$$\frac{w_u}{r} \frac{\partial(c_u r)}{\partial n} - w_s \left( \frac{\partial \gamma}{\partial s} - \frac{\partial w_s}{\partial n} \right) = \frac{dh^*}{dn} - T \frac{dS}{dn} - F_n -$$

$$- \frac{w_s}{r} \frac{\partial(c_u r)}{\partial s} = F_u + T \frac{w_s w_u}{w^2} \frac{\partial S}{\partial s}, \left( \frac{\partial h^*}{\partial \varphi} = \frac{\partial S}{\partial \varphi} = 0 \right), \quad (3)$$

$$\frac{w_u}{r} \frac{\partial(c_u r)}{\partial s} = -T \frac{\partial S}{\partial s} - F_s + T \frac{w_s^2}{w^2} \frac{\partial S}{\partial s}, \left( \frac{\partial h^*}{\partial s} = 0 \right), \quad (4)$$

$$\frac{\partial(r\chi\rho w_s)}{\partial s} + r\chi\rho w_s = 0. \quad (5)$$

Запишем проекции массовой силы  $\vec{F}$  и относительной скорости  $\vec{w}$  на координатные оси с помощью вектора  $\vec{v}$  единичной внешней нормали к межлопаточной поверхности тока

$$\left. \begin{aligned} F_n &= \frac{v_n}{v_u} F_u = -F_u \operatorname{tg} \delta, \quad F_s = \frac{v_s}{v_u} F_u = -F_u \operatorname{ctg} \beta \\ w_u &= -\frac{v_s}{v_u} w_s = w_s \operatorname{ctg} \beta, \quad w_n = 0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Величины  $\beta$  и  $\delta$  определяются следующими соотношениями:

$$\operatorname{ctg} \beta = (\operatorname{ctg} \beta' + \operatorname{tg} \gamma \operatorname{tg} \delta') \cos \gamma;$$

$$\operatorname{tg} \delta = (\operatorname{tg} \delta' - \operatorname{tg} \gamma \operatorname{ctg} \beta') \cos \gamma.$$

Если учесть, что соотношения

$$T = \frac{k-1}{kR} \left( h_1^* - \frac{w^2 - u^2}{2} \right),$$

$$\rho = \rho_{w1}^* \sigma \left( \frac{2h_1^* + u^2 - w^2}{2h_1^* + u_1^2} \right)^{\frac{1}{k-1}},$$

справедливы вдоль линии тока и что перед входом в решетку  $h_1^*$  и заторможенная плотность в относи-

тельном потоке  $\rho_{w1}^*$  обычно задаются, а  $\sigma$  является заданной функцией параметров потока и координат, получаем замкнутую систему из шести уравнений (3)–(6) для шести неизвестных  $w_u$ ,  $w_s$ ,  $\gamma$ ,  $F_n$ ,  $F_u$  и  $F_s$ . Опуская преобразования, проведенные в работе [9], запишем в окончательном виде систему уравнений:

$$\frac{\partial w_s}{\partial n} - \frac{\partial \gamma}{\partial s} w_s = \frac{1}{1 + \operatorname{ctg}^2 \beta} \times$$

$$\left\{ \frac{1}{w_s} \left( \frac{dh^*}{dn} - T \frac{\partial S}{\partial n} + \frac{T}{2} \operatorname{tg} \delta \sin 2\beta \frac{\partial S}{\partial s} \right) - \right.$$

$$\left. - \frac{w_s}{2r^2} \frac{\partial(r \operatorname{ctg} \beta)^2}{\partial n} - 2\omega \operatorname{ctg} \beta \cos \gamma + \frac{\operatorname{tg} \delta}{r} \frac{\partial(c_u r)}{\partial s} \right\}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial \ln(r\chi\rho w_s)}{\partial s} + \frac{\partial \gamma}{\partial n} = 0. \quad (8)$$

**Метод решения.** Решение рассматриваемой задачи можно производить в фиксированной или в полуфиксированной сетке [9], а также в нефиксированной с использованием уравнений для кривизны.

Рассмотрим решение в полуфиксированной сетке, в котором используется метод прямых [12] для приведения уравнения (7) к обыкновенному дифференциальному.

Согласно методу прямых проводится семейство нормалей к выпуклой стенке канала (рис. 2).

Каждая прямая образует свой угол  $\psi'$  с осью  $z$ , и отсчет вдоль  $l$  обычно ведется от выпуклой стенки канала:

$$\cos(\psi' - \gamma) = \sin \varphi, \quad \sin(\psi' - \gamma) = -\cos \varphi, \quad \varphi = \gamma_0 - \gamma,$$

где  $\gamma_0$  – угол на внешней линии меридионального обвода. Угол  $\gamma$  определяется по следующей зависимости

$$\operatorname{tg} \gamma_{i,j} = \frac{r_{i+1,j} + (\delta_{i,j}^2 - 1)r_{i,j} - \delta_{i,j}^2 r_{i-1,j}}{\delta_{i,j}(\delta_{i,j} + 1)\Delta z_{i,j}},$$

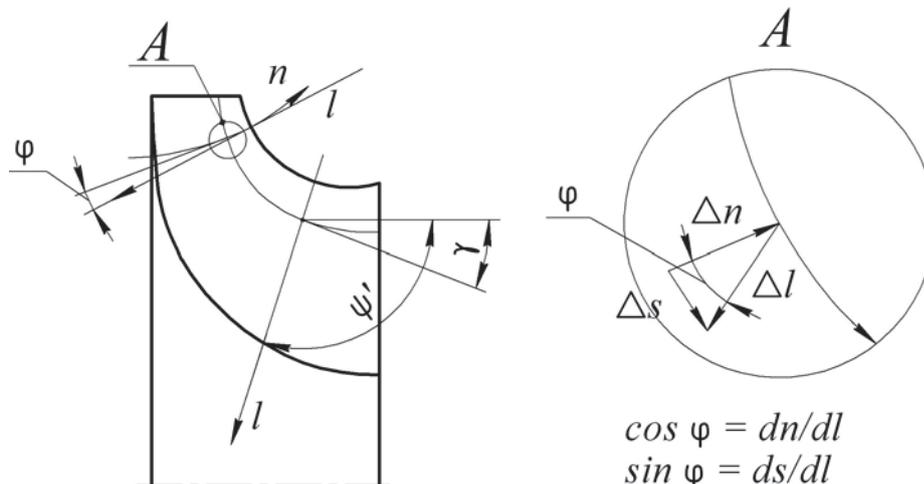


Рис. 2. Расчетная схема к методу прямых

Fig. 2. Design diagram to the straight lines method

$$\cos \varphi = dn/dl$$

$$\sin \varphi = ds/dl$$

где

$$\delta_{i,j} = \Delta z_{i+1,j} / \Delta z_{i,j}, \quad \Delta z_{i,j} = z_{i,j} - z_{i-1,j}.$$

Для замены производных по ортогонали  $n$ , входящих в систему уравнений (7) и (8), производными по  $l$  пользуются следующими зависимостями

$$\frac{\partial}{\partial l} = \cos(\psi' - \gamma) \frac{\partial}{\partial s} + \sin(\psi' - \gamma) \frac{\partial}{\partial n}, \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial n} = \frac{1}{\sin(\psi' - \gamma)} \frac{\partial}{\partial l} - \operatorname{ctg}(\psi' - \gamma) \frac{\partial}{\partial s}. \quad (10)$$

В силу соотношений (9) и (10), уравнения (7) принимают вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial w_s}{\partial l} = \frac{1}{1 + \operatorname{ctg}^2 \beta} \times \\ \times \left[ \frac{1}{w_s} \left[ \frac{dh^*}{dl} - T \left( \frac{\partial S}{\partial l} - \frac{\partial S}{\partial s} \sin \varphi \right) \right] - \right. \\ \left. - \frac{T}{2} \operatorname{tg} \delta \sin 2\beta \cos \varphi \frac{\partial S}{\partial s} \right] + \\ + \left[ -\frac{w_s}{2r^2} \left[ \frac{\partial(\operatorname{rctg}\beta)^2}{\partial l} - \frac{\partial(\operatorname{rctg}\beta)^2}{\partial s} \sin \varphi \right] + \right. \\ \left. + \left[ 2\omega \operatorname{ctg} \beta \cos \gamma - \frac{\partial \gamma}{\partial s} w_s - \frac{\operatorname{tg} \delta}{r} \frac{\partial(c_u r)}{\partial s} \right] \cos \varphi \right] \\ + \frac{\partial w_s}{\partial s} \sin \varphi. \quad (11) \end{aligned}$$

Уравнения неразрывности (8) в дифференциальной форме заменяются эквивалентными им уравнениями расхода, записанными в виде интеграла с переменным верхним пределом  $l=l(s,l)$  для каждой нормали  $l$ :

$$G(l_i) = 2\pi \int_0^{l(s,l_i)} r \chi \rho w_s \cos \varphi dl. \quad (12)$$

Здесь  $l=l(s,l)$  – уравнение подлежащей определению линии тока  $s$  в меридиональной плоскости,  $l_i$  – текущая координата вдоль  $l$ .

Все частные производные по  $s$  в (11) аппроксимируются центральными разностями; учитывая, что шаг по  $s$  может быть неодинаковым, для вычисления производных по  $s$  в  $i$ -м сечении на  $j$ -й линии тока для любой гладкой функции  $f$  используются формулы второго порядка точности [13]

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial s} \Big|_{i,j} = \frac{\Delta f}{\Delta s} \Big|_{i,j} = \\ = \frac{f_{i+1,j} + (\tau_{i,j}^2 - 1)f_{i,j} - \tau_{i,j}^2 f_{i-1,j}}{\tau_{i,j}(1 + \tau_{i,j})\Delta s_{i,j}} + O[(\Delta s_{i,j})^2], \end{aligned}$$

где

$$\tau_{i,j} = \Delta s_{i+1,j} / \Delta s_{i,j}, \quad \Delta s_{i,j} = s_{i,j} - s_{i-1,j}.$$

После замены всех частных производных по  $s$  в уравнении (11) получаем систему обыкновенных

дифференциальных уравнений, разрешенных относительно первой производной по  $l$ , количество которых равно числу нормалей к внешней линии меридионального обвода. Для решения полученной системы дифференциальные уравнения заменяются эквивалентными им интегральными уравнениями

$$\begin{aligned} w_s = w_{s,0} + \\ + \int_0^l \left\{ \frac{1}{1 + \operatorname{ctg}^2 \beta} \times \right. \\ \times \left[ \frac{1}{w_s} \left[ \frac{dh^*}{dl} - T \left( \frac{dS}{dl} - \frac{\Delta S}{\Delta s} \sin \varphi \right) \right] - \right. \\ \left. - \frac{T}{2} \operatorname{tg} \delta \sin 2\beta \cos \varphi \frac{\Delta S}{\Delta s} \right] - \\ - \left[ \frac{d(\operatorname{rctg}\beta)^2}{dl} - \frac{\Delta(\operatorname{rctg}\beta)^2}{\Delta s} \sin \varphi \right] + \\ + \left[ 2\omega \operatorname{ctg} \beta \cos \gamma - \frac{\Delta \gamma}{\Delta s} w_s - \right. \\ \left. - \frac{\operatorname{tg} \delta}{r} \frac{\Delta(c_u r)}{\Delta s} \right] \cos \varphi \\ \left. + \frac{\Delta w_s}{\Delta s} \sin \varphi \right\} dl. \quad (13) \end{aligned}$$

Полученная система интегральных уравнений (12), (13) с неизвестным переменным верхним пределом  $l$  решается методом последовательных приближений [14, 15]. Необходимая точность расчетов определяется выполнением условия: максимум абсолютной величины меньше заданной точности

$$\max \left( \left| \left( \frac{w_s^{\mu+1} - w_s^{\mu}}{w_s^{\mu}} \right) \right| 100 \% \right) < 1...3 \%,$$

где  $\mu$  – номер приближения.

*Расчет энтропии.* Согласно работе [9], энтропия вычисляется по уравнениям

$$\begin{aligned} T \frac{\partial S}{\partial n} = -\frac{k-1}{k} h \frac{\partial}{\partial n} \ln \left[ \frac{p_{w1}^* \sigma(n,s)}{h_{w1}^* \left( \frac{k}{k-1} \right)} \right]; \\ T \frac{\partial S}{\partial s} = -\frac{k-1}{k} h \frac{\partial}{\partial s} \ln \left[ \frac{p_{w1}^* \sigma(n,s)}{h_{w1}^* \left( \frac{k}{k-1} \right)} \right], \end{aligned}$$

где  $p_{w1}^*$  – давление торможения в относительном движении на входе в рабочее колесо;  $h_{w1}^*$  – удельная энтальпия торможения в относительном движении на входе в рабочее колесо;  $\sigma(n,s)$  – коэффициент изоэнтропийности.

Если учитывать потери на трение и перемешивание, то  $\partial S / \partial s \neq 0$  и  $\sigma$  меняется вдоль  $s$ . В данном случае изменение коэффициента изоэнтропийности задается квадратичной функцией вдоль  $s$

$$\sigma(n, s) = 1 - [1 - \sigma_i(n)] \left( \frac{s}{s_0} \right)^2,$$

которая определяется из условий:

$$\sigma=1 \text{ и } \partial\sigma/\partial s=0 \text{ при } s=0, \sigma=\sigma_i \text{ при } s=s_0,$$

где  $s_0$  – длина линии тока от сечения на входе в решетку до сечения на выходе из нее. Величина  $\sigma_i$  определяется следующей зависимостью:

$$\sigma_i = \frac{\pi(\lambda_{w_2} / \psi)}{\pi(\lambda_{w_2})},$$

где  $\lambda_{w_2}$  – приведенная скорость;  $\psi$  – коэффициент скорости;  $\pi(\lambda_{w_2})$  – газодинамическая функция давления.

Для определения коэффициента скорости использовались эмпирические зависимости для коэффициента потерь кинетической энергии, приведенные в работе [16].

### Предварительные исследования

В работе [17], используя метод неопределенных множителей Лагранжа [18], были представлены результаты проектирования трех турбин на расход газа  $G_T=0,45$  кг/с со следующими значениями степени радиальности: турбина № 1 –  $\mu=0,47$ ; турбина № 2 –  $\mu=0,52$ ; турбина № 3 –  $\mu=0,57$  (рис. 3).

Количество лопаток рабочего колеса для турбины № 1  $z_2=10$ , для турбины № 2  $z_2=12$ , для турбины № 3  $z_2=15$ . Угол выхода потока газа из направляющего аппарата был принят для всех ступеней  $\alpha_1=18^\circ$ . Угол выхода потока газа из рабочего колеса был принят для всех ступеней  $\beta_2=36^\circ$ .

Для оценки эффективности спроектированных проточных частей турбин, используя модель расчета на среднем радиусе в одномерном квазистационарном приближении, выполнен расчет характеристик турбины: КПД турбины  $\eta_T=f(H_T)$  (рис. 4, а) и эффективная мощность  $N_T=f(H_T)$  (рис. 4, б), где

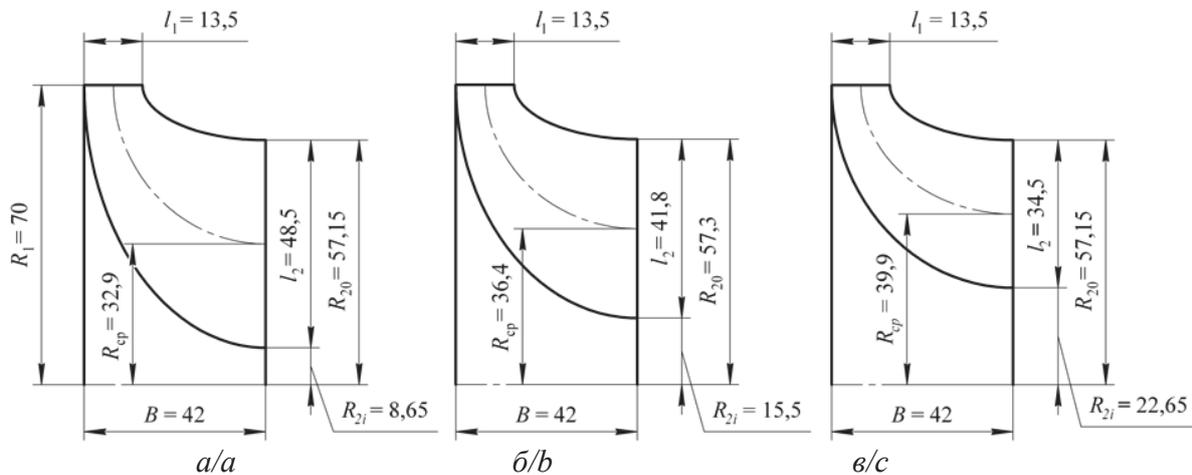


Рис. 3. Рабочие колеса радиально-осевой турбины, спроектированные с использованием метода неопределенных множителей Лагранжа: а) турбина № 1 ( $\mu=0,47$ ); б) турбина № 2 ( $\mu=0,52$ ); в) турбина № 3 ( $\mu=0,57$ )

Fig. 3. Driving wheels of a radial-axial turbine, designed with the use of uncertain multipliers agrange method: а) turbine № 1 ( $\mu=0,47$ ); б) turbine № 2 ( $\mu=0,52$ ); с) turbine № 3 ( $\mu=0,57$ )

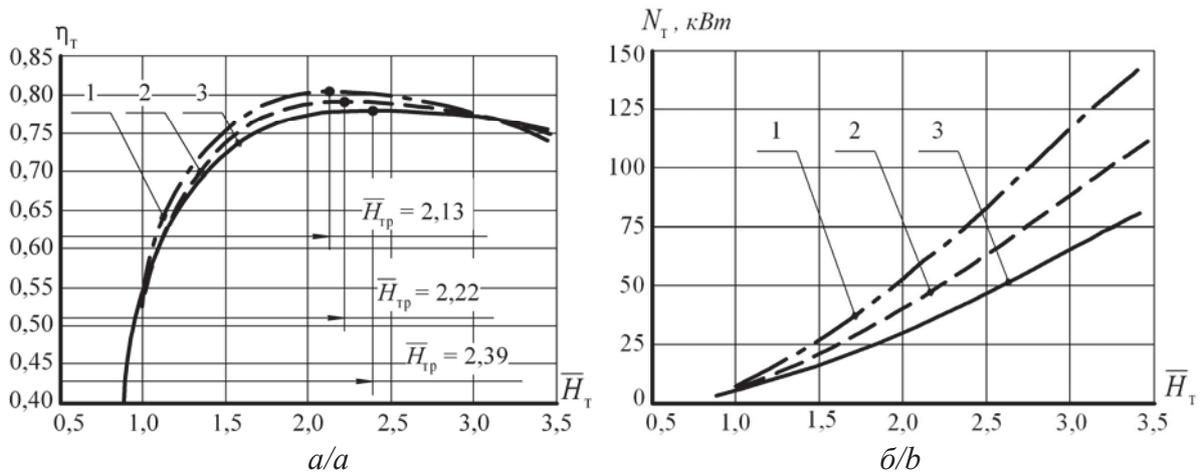


Рис. 4. Характеристики радиально-осевой турбины: а) изменение КПД турбины  $\eta_T$ ; б) эффективная мощность  $N_T$  турбины: 1 – турбина № 1; 2 – турбина № 2; 3 – турбина № 3

Fig. 4. Characteristics of the radial-axial turbine: а) change of efficiency of the turbine; б) effective power of the turbine: 1 is the turbine № 1; 2 is the turbine № 2; 3 is the turbine № 3

$\bar{H}_T$  – коэффициент напора газа. Проверка адекватности предложенной модели осуществлялась путем сравнения характеристик, полученных экспериментально, с расчетными характеристиками. Расчет коэффициентов потерь энергии производился по зависимостям, предложенным в работе [16].

Результаты расчета характеристик турбины показали, что увеличение коэффициента напора  $\bar{H}_T$  приводит к следующему:

- 1) незначительно, но возрастает КПД турбины  $\eta_T$  в области расчетного режима, причем для турбины № 1 с  $\mu=0,47$  КПД выше, чем для турбин № 2 и № 3 с  $\mu=0,52$  и  $\mu=0,57$  (рис. 4, а);
- 2) эффективная мощность  $N_T$  возрастает больше для турбины № 1 с  $\mu=0,47$ , чем для турбин № 2 и 3 с большими значениями  $\mu$  (рис. 4, б).

Анализ характеристик турбины (рис. 4) свидетельствует о том, что при уменьшении степени радиальности  $\mu$  КПД турбины  $\eta_T$  и ее эффективная мощность  $N_T$  растут.

#### Результаты расчетов

Для расчета потока в проточной части радиально-осевой турбины была составлена программа, при этом использовался пакет прикладных программ MATLAB [19].

Рассмотрим некоторые результаты численных расчетов газовой динамики осесимметричного вихревого течения невязкой сжимаемой жидкости, проведенных в рабочих колесах радиально-осевой турбины. В расчетах задавались следующие исходные данные, определенные в результате расчета ступени по модели на среднем радиусе в одномерном квазистационарном приближении. Эти исходные данные соответствуют расчетному режиму на характеристике турбины, на рис. 4, а отмечены точками.

**Турбина № 1 ( $\mu=0,47$ )** – точка максимума КПД; коэффициент напора  $\bar{H}_T=2,13$  КПД турбины  $\eta_T=0,804$ ; расход газов  $G_T=0,53$  кг/с; давление торможения на входе в ступень  $p_0^*=0,215$  МПа; давление на входе в рабочее колесо  $p_1=0,1456$  МПа; температура торможения на входе в ступень  $T_0^*=750$  К; температура на входе в рабочее колесо  $T_1=688$  К; степень реактивности  $\rho=0,427$ ; частота вращения  $n_{\text{тк}}=49\,770$  мин<sup>-1</sup>; решение было найдено за 13 итераций при коэффициенте релаксации  $\alpha=0,5$ .

**Турбина № 2 ( $\mu=0,52$ )** – точка максимума КПД; коэффициент напора  $\bar{H}_T=2,22$ ; КПД турбины  $\eta_T=0,791$ ; расход газов  $G_T=0,488$  кг/с; давление торможения на входе в ступень  $p_0^*=0,2$  МПа; давление на входе в рабочее колесо  $p_1=0,1381$  МПа; температура торможения на входе в ступень  $T_0^*=750$  К; температура на входе в рабочее колесо  $T_1=691$  К; степень реактивности  $\rho=0,3979$ ; частота вращения  $n_{\text{тк}}=46\,450$  мин<sup>-1</sup>; решение было найдено за 34 итерации при коэффициенте релаксации  $\alpha=0,5$ .

**Турбина № 3 ( $\mu=0,57$ )** – точка максимума КПД; коэффициент напора  $\bar{H}_T=2,39$ ; КПД турбины  $\eta_T=0,78$ ; расход газов  $G_T=0,5042$  кг/с; давление торможения на входе в ступень  $p_0^*=0,205$  МПа; давление на входе в рабочее колесо  $p_1=0,1394$  МПа; температура торможения на входе в ступень  $T_0^*=750$  К; температура на входе в рабочее колесо  $T_1=688$  К; степень реактивности  $\rho=0,395$ ; частота вращения  $n_{\text{тк}}=46\,300$  мин<sup>-1</sup>; решение было найдено за 16 итераций при коэффициенте релаксации  $\alpha=0,5$ .

На рис. 5 тонкими линиями показаны линии предварительного разбиения канала по принципу равных кольцевых площадей, толстыми линиями – линии тока, определенные в результате последовательных приближений. Из этого видно, что поверхности тока окончательного приближения существенно отличаются от поверхностей тока исходного приближения. Во всех расчетных областях погрешность по скоростям  $w_s$  составила менее 1 %; среднее время, затраченное процессором на одну итерацию, составило 0,015–0,094 с. Расчеты проводились на персональном компьютере с процессором AMD Athlon 64X2 5600 + частотой ядра 2,8 ГГц, объем оперативной памяти 2048 Мб.

С увеличением кривизны канала линии тока «поджимаются» к корпусу турбины, что хорошо видно на рис. 5.

В области прямых  $l_5$ ,  $l_6$  и  $l_7$  линии тока поджаты к корпусу турбины. В этих сечениях, как показали результаты расчетов, получаются отрицательные значения меридиональных скоростей: для турбины со степенью радиальности  $\mu=0,47$   $w_s=-16, -24, -21$  м/с (рис. 6, а, б); для турбины со степенью радиальности  $\mu=0,52$   $w_s=-4$  м/с (рис. 7, а); для турбины со степенью радиальности  $\mu=0,57$  отрицательных скоростей нет. Это обстоятельство свидетельствует об отрыве потока (обратный ток в идеальной жидкости). На рис. 5 зона обратных токов заштрихована. Граница отрывной зоны определена при условии  $w_s=0$ . Следует отметить, что для турбины со степенью радиальности  $\mu=0,57$  линии тока плавней, чем для турбин со степенью радиальности  $\mu=0,47$  и  $\mu=0,52$ .

Таким образом, с уменьшением степени радиальности возрастает отрывная зона (рис. 5), несмотря на высокую мощность, полученную по модели для расчета на среднем радиусе. На основании проведенных расчетов, предварительно рекомендуем при проектировании принимать значения степени радиальности  $\mu=0,57$ , так как в рабочем колесе с таким  $\mu$  нет зоны обратных токов (рис. 5). Возникновение зоны обратных токов приводит к тому, что нельзя обеспечить требуемый расход. Зона обратных токов запирает проходное сечение турбины.

В результате расчета осесимметричного течения в рабочих колесах были получены меридианные проекции скорости  $w_s$  во всех узлах сетки расчетной области. На рис. 6–8 показано распределе-

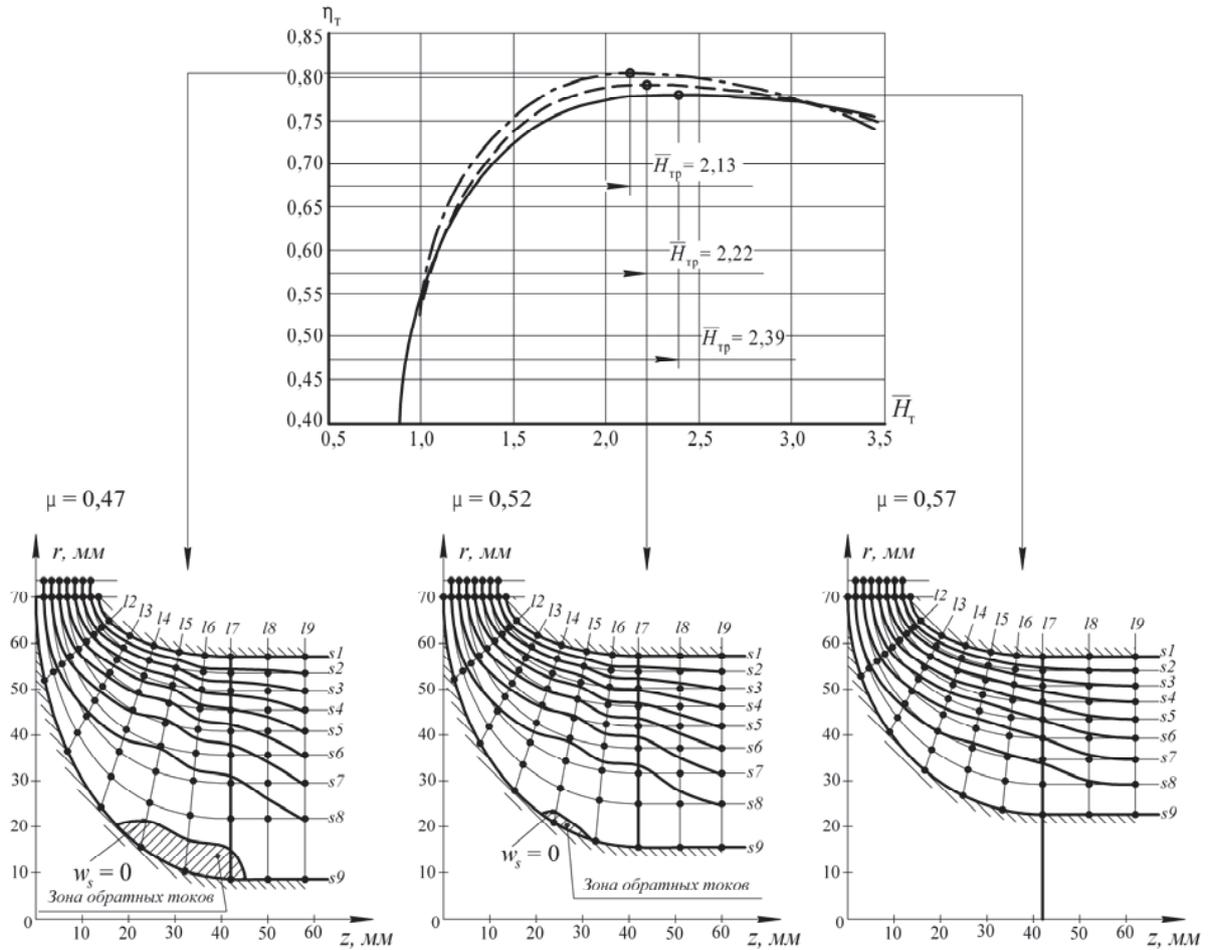


Рис 5. Результаты расчета поверхностей тока  
 Fig. 5. Results of calculation of current surfaces

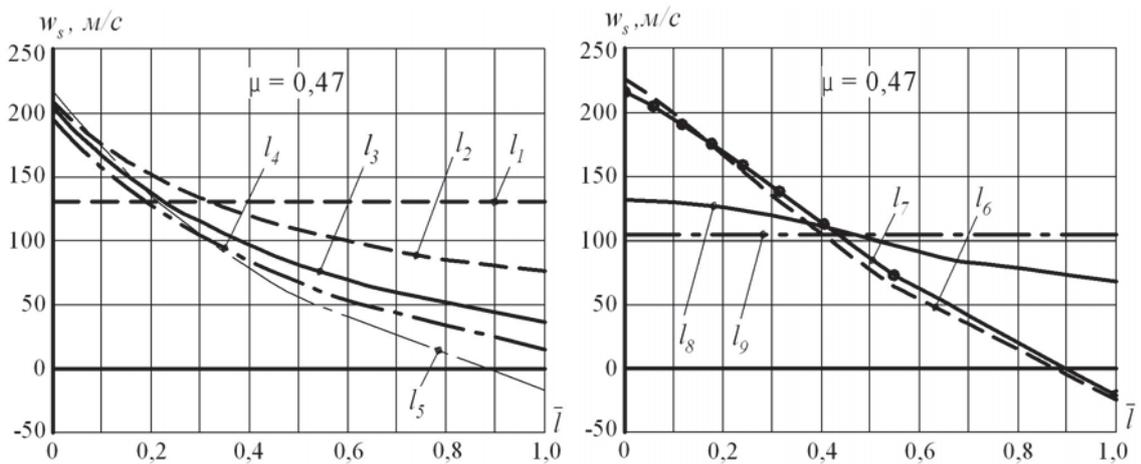
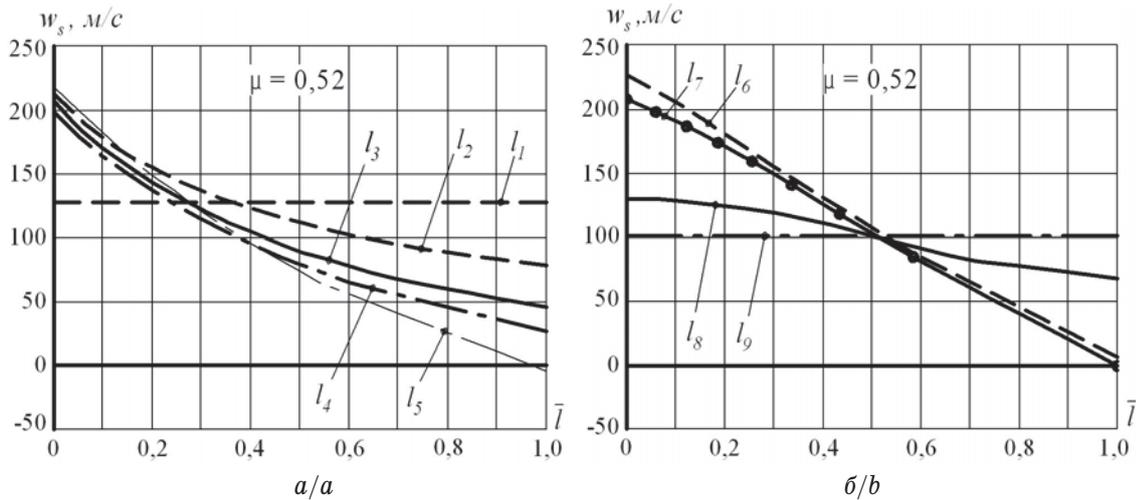


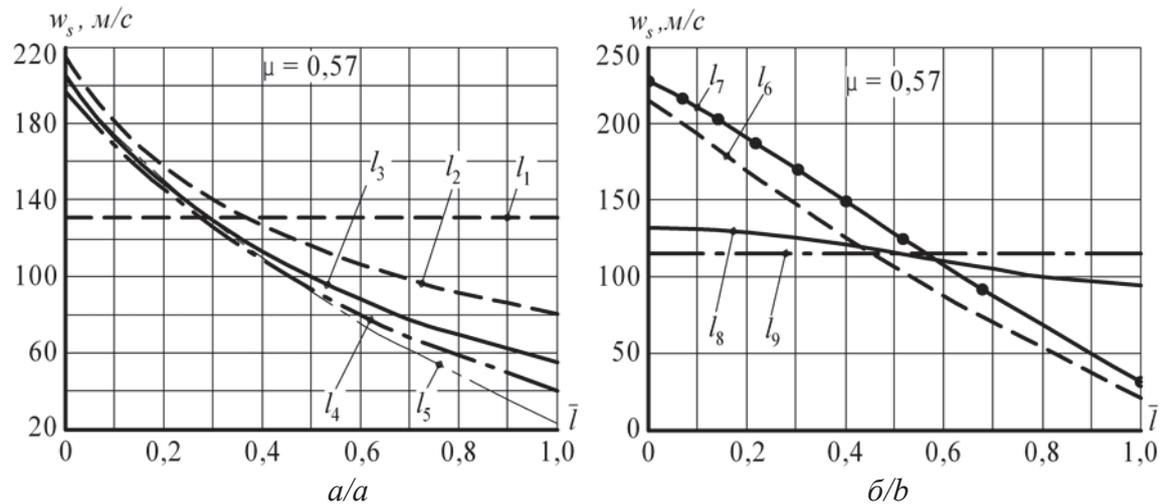
Рис 6. Распределение меридианных скоростей  $w_s$  вдоль линий  $l$ , турбина № 1  $\mu=0,47$ : а) линии  $l_1, \dots, l_5$ ; б) линии  $l_6, \dots, l_9$   
 Fig. 6. Distribution of meridional speeds  $w_s$  along lines  $l$ , the turbine № 1  $\mu=0,47$ : а) lines  $l_1, \dots, l_5$ ; б) lines  $l_6, \dots, l_9$

ние меридианных скоростей в зависимости от относительной длины нормалей  $\bar{l}$ , где  $\bar{l} = l_{i,тек} / l_{i,полн}$ ,  $l_{i,тек}$ ,  $l_{i,полн}$  – текущая и полная длина нормали соответственно;  $i$  – номер нормали.

Как видно, для всех расчетных областей с увеличением кривизны канала величина скорости в поперечных сечениях растет от внутреннего  $\bar{l}=1$  к внешнему  $\bar{l}=0$  обводу профиля. Перепад скорости  $\Delta w_s = w_{sн} - w_{sв}$



**Рис. 7.** Распределение меридианных скоростей  $w_s$  вдоль линий  $l$ , турбина № 2  $\mu=0,52$ : а) линии  $l_1, \dots, l_5$ ; б) линии  $l_6, \dots, l_9$   
**Fig. 7.** Distribution of meridional speeds  $w_s$  along lines  $l$ , the turbine № 2  $\mu=0,52$ : а) lines  $l_1, \dots, l_5$ ; б) lines  $l_6, \dots, l_9$



**Рис. 8.** Распределение меридианных скоростей  $w_s$  вдоль линий  $l$ , турбина № 3  $\mu=0,57$ : а) линии  $l_1, \dots, l_5$ ; б) линии  $l_6, \dots, l_9$   
**Fig. 8.** Distribution of meridional speeds  $w_s$  along lines  $l$ , the turbine № 3  $\mu=0,57$ : а) lines  $l_1, \dots, l_5$ ; б) lines  $l_6, \dots, l_9$

нарастает ( $w_{\text{вн}}$  и  $w_{\text{вн}}$  – скорости потока на внешнем и внутреннем обводе профиля, соответственно): для турбины со степенью радиальности  $\mu=0,47$  вплоть до сечения  $l_6$ , достигая своего максимального значения  $\Delta w_s=252$  м/с (рис. 6, б); для турбины со степенью радиальности  $\mu=0,52$  вплоть до сечения  $l_3$ , достигая своего максимального значения  $\Delta w_s=223$  м/с (рис. 7, а); для турбины со степенью радиальности  $\mu=0,57$  вплоть до сечения  $l_1$ , достигая своего максимального значения  $\Delta w_s=196$  м/с (рис. 8, б).

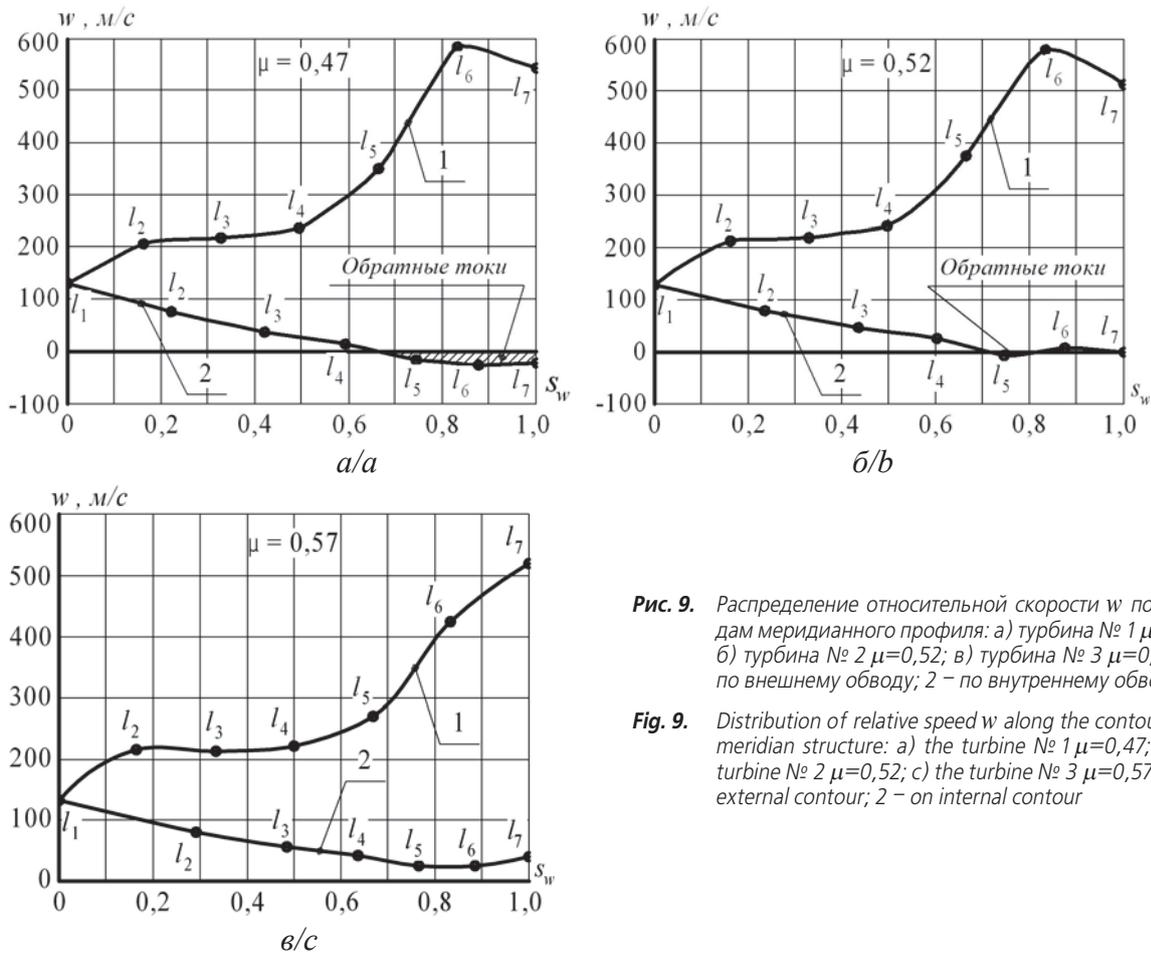
Таким образом, с уменьшением степени радиальности происходит нарастание перепада скорости  $\Delta w_s$ .

В безлопаточном пространстве за рабочим колесом линии  $l_8$  и  $l_9$  поток выравнивается, и скорость практически не изменяется по длине  $l$  (рис. 6–8).

По данным, приведенным на рис. 6–8, были получены распределения полных (относительных) скоростей  $w$  по обводам профиля (рис. 9). По оси

абсцисс отложено безразмерное расстояние  $s_w=s_{\text{вн}}/s_{\Sigma\text{вн}}$ ,  $s_w=s_{\text{вн}}/s_{\Sigma\text{вн}}$  – длина наружного и внутреннего обвода, отнесенная к общей длине наружного и внутреннего обвода. По оси ординат отложена полная скорость  $w=w_s/\sin\beta$ . Точками на кривых помечены концы линий  $l$ . Для всех расчетных случаев скорость по внешнему обводу меридианного профиля при увеличении  $s_w$  возрастает. Исключение составляет участок от 6 до 7 линии  $l$  для турбин № 1 и 2, где наблюдается падение скорости. На участке от линии  $l_4$  до линии  $l_6$ , для турбин № 1 и 2, возрастание скорости  $w$  происходит более интенсивно, чем на остальных участках.

Вдоль внутренней линии меридионального обвода падение скорости распространяется: для турбины со степенью радиальности  $\mu=0,47$  на участок от линии  $l_1$  до линии  $l_6$  (рис. 9, а); для турбины со степенями радиальности  $\mu=0,52$ ,  $\mu=0,57$  на участок от линии  $l_1$  до линии  $l_3$  (рис. 9, б, в).



**Рис. 9.** Распределение относительной скорости  $w$  по обводам меридианного профиля: а) турбина № 1  $\mu=0,47$ ; б) турбина № 2  $\mu=0,52$ ; в) турбина № 3  $\mu=0,57$ ; 1 – по внешнему обводу; 2 – по внутреннему обводу

**Fig. 9.** Distribution of relative speed  $w$  along the contours of a meridional structure: а) the turbine № 1  $\mu=0,47$ ; б) the turbine № 2  $\mu=0,52$ ; с) the turbine № 3  $\mu=0,57$ ; 1 – on external contour; 2 – on internal contour

#### Сравнение результатов расчета с теоретико-экспериментальными исследованиями В.Т. Митрохина

Автор работы [18] проводил теоретико-экспериментальные исследования турбин по типоразмеру, близкому к турбинам, результаты моделирования которых содержатся в настоящей статье. Сначала по модели Я.А. Сироткина рассчитывалось течение в проточной части турбин, затем проводилось экспериментальное исследование.

В работе [18] при траверсировании поля на выходе из турбин были обнаружены зоны отрыва потока. Начало зоны отрыва по радиусу располагается примерно в том месте, где начинается втулка рабочего колеса. Зона отрыва определялась следующим образом: на ее границе полное давление, измеряемое дистанционно управляемым насадком, сравнивалось с измеряемым статическим давлением, а угол выхода потока был близок к 0 или 180°. По изложенной методике нельзя точно измерить расположение зоны отрыва потока. Особую трудность при этом составляло определение угла потока, поскольку вблизи зоны отрыва поворот насадка по углу в пределах  $\pm 10^\circ$  не приводил к заметному изменению показаний насадка, по которым он устанавливался под заданный угол потока. Поэтому окончательное суждение о появлении зоны

отрыва регистрировалось тогда, когда сравнивались полные и статические давления. Вблизи зоны отрыва, когда производились отмеченные выше повороты насадка в пределах  $\pm 10^\circ$ , измеряемое полное и статическое давления практически не изменялись.

Вычислив значения степени радиальности проточных частей рабочих колес, в исследованиях В.Т. Митрохина (автор не исследовал влияние степени радиальности), определяем, что отрыв потока возникал при степени радиальности  $\mu=0,47$  и  $\mu=0,5$ . Таким образом, мы подтвердили экспериментальные исследования В.Т. Митрохина с помощью численных расчетов.

#### Проверка адекватности модели

Для проверки адекватности предложенной математической модели осесимметричного вихревого течения невязкой сжимаемой жидкости в проточной части радиально-осевой турбины на кафедре двигателей внутреннего сгорания Тихоокеанского государственного университета выполнен цикл экспериментальных исследований серии турбокомпрессоров типа ТКР-14. Для этой цели создан стенд для продувки турбин турбокомпрессоров типа ТКР-14. Стенд включает в себя: две воздушные турбины ТВ-42 (производительность 60 м<sup>3</sup>/мин, мощ-

ность 55 кВт), соединенные последовательно для получения необходимого напора перед турбиной; систему смазки подшипников вала ротора; трубопроводы с регулировочными задвижками, позволяющими устанавливать необходимый режим работы турбокомпрессора; измерительные приборы для измерения давления, температуры и частоты вращения ротора турбокомпрессора.

Параметры потока за ступенью турбины измерялись следующим образом. Непосредственно за рабочим колесом на расстоянии приблизительно шага между рабочими лопатками (в сечениях  $l_8$  и  $l_9$  (рис. 5)) был установлен тарированный пятиточечный шаровой зонд с координатным устройством. Он позволял измерять параметры потока в трех измерениях. Зонд представляет собой шарик диаметром 5 мм с пятью отверстиями диаметром 0,8 мм. Одно отверстие центральное, четыре других расположены попарно в вертикальной и горизонтальной плоскостях под углом  $45^\circ$  к центральной оси. На координатном устройстве был предусмотрен нулюс, поэтому, кроме замера полного давления  $p_{p2}^*$  за рабочим колесом, замерялся угол выхода потока в абсолютном движении  $\alpha_2$ . В диапазоне изменения чисел Маха  $M=0,2\dots 1$  точность измерения углов выхода потока составляет  $\pm 1\dots 2^\circ$ . Скорость потока определяется с погрешностью  $\pm 3\%$ .

Измеряемые величины на выходе из рабочего колеса турбины (угол выхода потока  $\alpha_2$ , абсолютная скорость  $c_2$ ) являются случайными величинами. По этой причине они подчиняются какому-либо закону, характеризующему случайную величину. Для обработки экспериментальных данных полей скоростей на выходе из рабочего колеса был использован пакет прикладных программ Mathcad [20]. Mathcad имеет богатый набор функций математической статистики, позволяющих вычислять

характеристики выборки данных (средние величины, дисперсию, коэффициенты корреляции и другие), плотности вероятности, функции вероятности, квантили вероятности для 17 различных видов распределения случайных величин.

В настоящей работе для оценки параметров выборки данных и оценки видов распределения абсолютной скорости  $c_2$  и углов выхода потока  $\alpha_2$  использовались следующие функции пакета Mathcad:

- $mean(x)$  – возвращает выборочное среднее значение элементов массива  $x$ ;
- $stdev(x)$  – возвращает среднее квадратическое (или стандартное) отклонение (standard deviation) элементов массива  $x$ ;
- $qt(P,k)$  – возвращает квантиль распределения по Стьюденту. Здесь  $P$  – вероятность попадания числа внутрь доверительного интервала;  $k=n-1$  – число степеней свободы;  $n$  – объем выборки.

Доверительный интервал определялся исходя из вероятности попадания числа внутрь интервала 96 %.

Отклонение от среднего арифметического определялось по следующей формуле:

$$d_i = qt(0,96,k)stdev(x).$$

Тогда верхняя и нижняя границы доверительного интервала будут равны

$$V_{gr} = mean(x) + d_i;$$

$$N_{gr} = mean(x) - d_i.$$

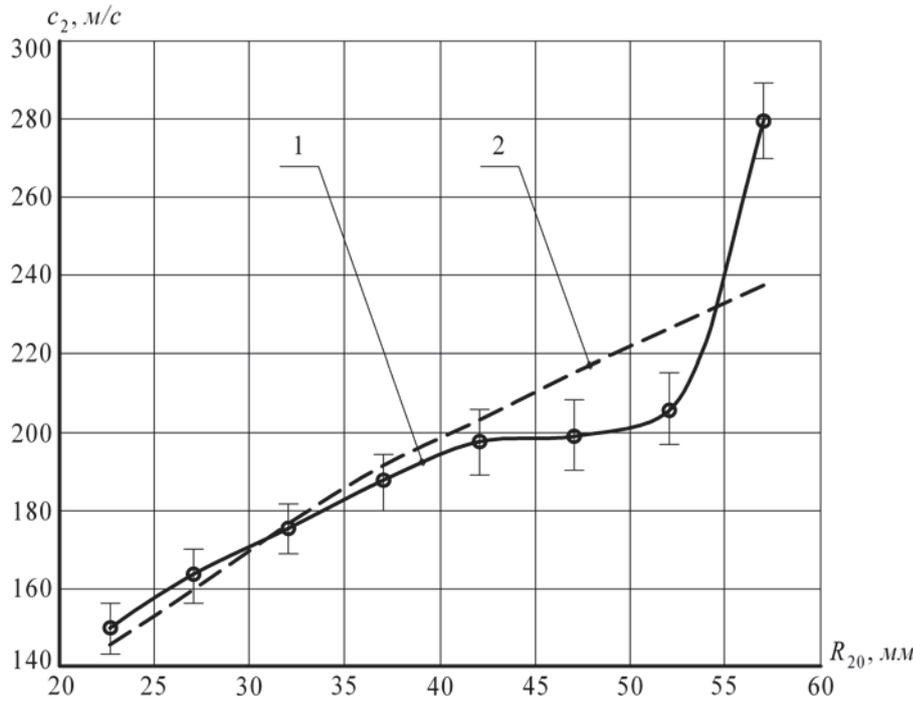
Результаты статистической обработки экспериментальных полей абсолютной скорости на выходе из турбины со степенью радиальности  $\mu=0,57$ , замеренные в сечении  $l_9$  (рис. 5), сведены в таблицу.

Результаты расчета абсолютной скорости  $c_2$  за рабочим колесом корректировались экспериментальными значениями углов  $\alpha_2$ , замеренными в сечениях  $l_8$  и  $l_9$  (рис. 5).

**Таблица.** Результаты статистической обработки экспериментальных значений абсолютной скорости  $c_2$  (м/с) за рабочим колесом турбины со степенью радиальности  $\mu=0,57$  при  $n_k=46300$  мин<sup>-1</sup>,  $H_1=2,06$

**Table.** Results of statistical processing of experimental values of absolute speed  $c_2$  (m/s) behind the driving wheel of the turbine with the radiality degree  $\mu=0,57$  at  $n_k=46300$  min<sup>-1</sup>,  $H_1=2,06$

Высота лопатки Blade height	R (мм/мм)							
	22,7	27	32	37	42	47	52	57
Абсолютная скорость, $c_2$ , м/с Absolute speed, $c_2$ , m/s								
Эксперимент/Experiment № 1	152,9	162,4	172,8	191,8	193,1	195,7	203,5	286,4
Эксперимент/Experiment № 2	151,9	163,1	177,3	187,6	197,9	206,6	214,4	279,3
Эксперимент/Experiment № 3	144,9	164,0	178,2	186,0	199,0	201,8	205,3	279,8
Эксперимент/Experiment № 4	149,3	167,9	171,7	180,9	202,1	198,9	203,2	281,2
Эксперимент/Experiment № 5	146,2	163,9	178,2	187,8	200,1	195,7	201,3	271,4
Эксперимент/Experiment № 6	151,8	157,2	171,8	187,3	191,0	194,8	206,7	278,9
Осредненное значение $c_2$ , м/с/Averaged value $c_2$ , m/s	149,5	163,0	175,0	186,9	197,2	198,9	205,7	279,5
Расчетная величина $c_2$ , м/с/Settlement size $c_2$ , m/s	145,2	159,3	176,3	191,0	203,1	214,9	226,3	237,6
Погрешность расчета, %/Error of calculation, %	2,8	2,2	-0,7	-2,2	-3	-8	-10	15
Верхняя граница доверительного интервала $V_{gr}$ Top border of confidential interval $V_{gr}$	156,1	169,9	181,5	193,9	205,7	208,0	214,9	289,1
Нижняя граница доверительного интервала $N_{gr}$ Bottom border of confidential interval $N_{gr}$	142,9	156,1	168,5	179,9	188,7	189,8	196,5	269,9
Отклонение от среднего арифметического $d_i$ Deviation from an average arithmetic $d_i$	6,6	6,9	6,5	7	8,5	9,1	9,2	9,6



**Рис. 10.** Экспериментальное и расчетное распределение абсолютных скоростей на выходе из турбины с  $\mu=0,57$  при  $n_{тк}=46300 \text{ мин}^{-1}$ ,  $\bar{F}_t=2,06$ ; 1 – по данным эксперимента; 2 – по методу Я.А. Сироткина после 16 приближений с корректировкой экспериментальными значениями углов  $\alpha_2$  (коэффициент релаксации  $\alpha=0,15$ )

**Fig. 10.** Experimental and settlement distribution of absolute speeds at the output from the turbine at  $n_{тк}=46300 \text{ min}^{-1}$ ,  $\bar{F}_t=2,06$ ; 1 – according to the experiment; 2 – on Ya.A. Sirotkin method with updating by experimental values of corners  $\alpha_2$  (factor of relaxation = 0,15)

Сравнение результатов расчета осесимметричного течения по методу Я.А. Сироткина с результатами эксперимента показывает, что имеется незначительное расхождение экспериментальных и расчетных значений абсолютных скоростей  $c_2$  в центральной и прикорневой зоне потока от 0,7 до 3 % (таблица, рис. 10).

Как показали результаты расчетов, наибольшие расхождения в периферийной зоне потока от 8 до 15 %. Расчетные величины имеют заниженные значения для абсолютной скорости и не лежат в пределах доверительного интервала (таблица, рис. 10). Это можно объяснить тем, что метод не учитывает влияние:

- зазора между рабочими лопатками и корпусом турбины на периферийную структуру потока;
- вторичных течений на величину углов выхода потока  $\alpha_2$  в области за рабочим колесом.

В целом расчет можно признать удовлетворительным, так как расчетные значения абсолютных скоростей в центральной и прикорневой области лежат в пределах доверительного интервала.

#### Выводы

Результаты расчетных данных свидетельствуют о следующем:

1. В исследованном диапазоне параметров подтвердилось положение о том, что степень радиальности играет существенную роль в формировании

зоны отрывных течений и снижение параметров эффективности турбины, так при изменении степени радиальности от 0,47 до 0,57 произошло снижение КПД турбины на 2,4 %.

2. С уменьшением степени радиальности от 0,57 до 0,47 возрастает отрывная зона и происходит нарастание перепада скорости  $\Delta w_s$  от 196 до 252 м/с, несмотря на высокий КПД и высокую мощность, полученные при помощи модели для расчета турбины на среднем радиусе
3. Применение модели осесимметричного вихревого течения невязкой нетеплопроводной жидкости (несмотря на имеющиеся упрощающие допущения) позволяет получить оптимальный по минимуму потерь меридиональный контур проточной части радиально-осевой турбины, работающей в составе энергетической газотурбинной установки.
4. Полученная с использованием метода Я.А. Сироткина структура потока в проточной части рабочего колеса дает возможность по кривизне полученных линий тока и распределению относительных скоростей по высоте проточной части определить отрывную зону.
5. По плавности изменения относительной скорости  $w$  вдоль линий тока можно определить наличие диффузорных участков и внести соответствующие коррективы в принятые геометрические параметры проточной части турбины.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Feng Z.P., Deng Q.H., Li J. Aerothermodynamic design and numerical simulation of radial inflow turbine impeller for a 100 kW microturbine // Turbo Expo 2005: Power for land, sea, and air. – Nevada, 2005. – V. 1. – P. 873–880.
2. Балтер А.Е. К.п.д центроостермительной турбины // Труды Научно-автомоторного института. – 1964. – № 63. – С. 45–50.
3. Лашко В.А., Пассар А.В. Оценка влияния степени радиальности на эффективность проточной части турбины комбинированного двигателя // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2011. – № 3 (22). – С. 85–94.
4. Михненко Л.В., Динеев Ю.Н., Коваленко Б.Ф. Экспериментальные исследования влияния степени радиальности рабочего колеса радиально-осевой турбины на её эффективность // Труды Научно-автомоторного института. – 1971. – № 127. – С. 47–50.
5. Шерстюк А.Н., Зарянкин А.Е. Радиально-осевые турбины малой мощности. – М.: Машиностроение, 1976. – 208 с.
6. Основы работы в Ansys 17 / Н.Н. Федорова, С.А. Вальгер, М.Н. Данилов, Ю.В. Захарова. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 210 с.
7. Басов К.А. ANSYS. Справочник пользователя. – М.: ДМК Пресс, 2014. – 640 с.
8. Stolarski T., Nakasone Y., Yoshimoto S. Engineering analysis with ANSYS software. – Amsterdam: Elsevier, Academic Press, 2010. – 480 p.
9. Сироткин Я.А. Расчет осесимметричного вихревого течения невязкой сжимаемой жидкости в радиальных турбомашинах // Известия академии наук СССР, Отделение технических наук, Механика и машиностроение. – 1963. – № 3. – С. 16–28.
10. Wu Chung-Hua. A general theory of three-dimensional flow in subsonic and supersonic turbomachines of axial, radial and mixed-flow types // Trans. ASME. – 1952. – V. 74. – № 8. – P. 1363–1380.
11. Hawthorne W., Novak R. The aerodynamics of turbo-machinery // Annual review of fluid mechanics. – 1969. – V. 1. – № 4. – P. 341–366.
12. Киреев В.И., Пантелеев А.В. Численные методы в примерах и задачах. – СПб.: Изд-во «Лань», 2015. – 448 с.
13. Beam R.M., Warming R.F. An implicit factored scheme for the compressible Navier-Stokes equations // AIAA Journal. – 1978. – V. 16. – № 4. – P. 393–402.
14. Зализняк В.Е. Численные методы. Основы научных вычислений. – М.: Изд-во «Юрайт», 2016. – 356 с.
15. Betounes D. Partial differential equations for computational science analysis. – Hattiesburg: Springer-Verlag, 1998. – 530 p.
16. Лашко В.А., Пассар А.В. Расчет коэффициента потерь кинетической энергии в проточной части как одна из проблем реализации комплексного подхода // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2011. – № 1 (20). – С. 79–90.
17. Пассар А.В., Тимошенко Д.В., Булгаков В.К. Влияние степени радиальности на эффективность турбины турбокомпрессора ТКР-14 // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2015. – № 1 (36). – С. 115–124.
18. Митрохин В.Т. Выбор параметров и расчет центроостермительной турбины на стационарных и переходных режимах. – М.: Машиностроение, 1974. – 228 с.
19. Hahn V.H., Valentine D.T. Essential Matlab for engineers and scientists. – Amsterdam: Elsevier, Academic Press, 2013. – 424 p.
20. Sonaje N. Mathcad a tool for infiltration modeling. – Saarbrücken: Lambert academic publishing, 2011. – 156 p.

Поступила 03.04.2017 г.

#### Информация об авторах

**Пассар А.В.**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории численных методов математической физики Вычислительного центра ДВО РАН.

**Тимошенко Д.В.**, кандидат технических наук, доцент кафедры двигателей внутреннего сгорания Тихоокеанского государственного университета.

UDC 621.43

## RESEARCH OF RADIALITY DEGREE EFFECT ON STREAM STRUCTURE IN A FLOW RANGE OF RADIAL-AXIAL TURBINE IN A GAS-TURBINE PLANT

Andrey V. Passar<sup>1</sup>,  
passar\_av@mail.ru

Denis V. Timoshenko<sup>2</sup>,  
000595@pnu.edu.ru

<sup>1</sup> Computer center of Far East branch of the Russian Academy of Science,  
65, Kim U Chen street, Khabarovsk, 680000, Russia.

<sup>2</sup> Pacific State University,  
136, Tikhookeanskaya street, Khabarovsk, 680035, Russia.

*The relevance of the work is caused by the necessity to improve a flow range of the radial-axial turbine of new generation of gas-turbine plants, applied in various industries. Microturbines with electric capacity from 15 up to 600 kW, with oil gas as fuel, are the separate group of low power gas-turbine plants.*

**The aim of the work** is to investigate the influence of radiality degree on stream structure in the flow range of the radial-axial turbine with 140 mm driving wheel by means of Ya.A. Sirotkin model of axisymmetry vortical current of nonviscous compressed liquid in the flow range of radial-axial turbomachines.

**Methods of research:** Ya.A. Sirotkin method for calculation axisymmetry vortical current of nonviscous compressed liquid in the flow range of radial-axial turbomachines.

**Results.** The paper introduces the issues of a choice of radiality degree of the radial-axial turbine of the low power gas-turbine plant. Based on the method of Lagrange uncertain multipliers the authors have designed the driving wheels of the radial-axial turbine with radiality degree  $\mu=0,47$ ,  $\mu=0,52$ ,  $\mu=0,57$ . The analysis studies on the influence of radiality degree on characteristics of the radial-axial turbine were carried out. The paper introduces the characteristics of turbines on the efficiency and on capacity in the stationary stream, obtained on the basis of the method for calculating a turbine on average radius. Based on these characteristics it is shown, that the turbine efficiency and capacity grow at reduction of radiality degree. The influence of radiality degree on the stream structure in the flow range of the radial-axial turbine is shown. As a result of calculation of axisymmetry flow in driving wheels, the distributions of meridian speeds depending on a normal length and distribution of relative speed along the lines of meridian contour of driving wheels are resulted. The zone of return currents was determined on the basis of these distributions. The paper introduces the results of calculation of current surfaces. The border of the return current zone is determined under condition of  $w_s=0$ . In all computational regions the error in the speeds  $w_s$  was amounted less than 1 %. After calculation of the stream structure by the Ya.A. Sirotkin model it is shown, that reducing the radiality degree the zone of return currents increases, despite of high efficiency determined by the model of calculation on average radius. The paper introduces the experimental and design distribution of absolute speeds at the output of the turbine driving wheel with the radiality degree  $\mu=0,57$ . The comparison of the results of calculation of axisymmetry current by the method of Ya.A. Sirotkin with the experimental results shows, that there is an insignificant divergence of the experimental and design values of the absolute speeds in radical and central areas of the stream.

### Key words:

Radiality degree, radial-axial turbine, pump head coefficient, flow range, turbine features, degree of reaction, current line, gas-turbine plant.

### REFERENCES

- Feng Z.P., Deng Q.H., Li J. Aerothermodynamic design and numerical simulation of radial inflow turbine impeller for a 100 kW microturbine. *Turbo Expo 2005: Power for land, sea, and air*. Nevada, 2005. Vol. 1, pp. 873–880.
- Balter A.E. K.p.d tsentrostermitelnoy turbiny [The efficiency of centripetal turbine]. *Trudy Nauchno-avtomotornogo instituta*, 1964, no. 63, pp. 45–50.
- Lashko V.A., Passar A.V. Evaluation of the effect of radial extent on the efficiency of the turbine engine combined. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2011, no. 3 (22), pp. 85–94. In Rus.
- Mikhnenkov L.V., Dineev Yu.N., Kovalenko B.F. Eksperimentalnye issledovaniya vliyaniya stepeni radialnosti rabocheho koleasa radialno-osevoy turbiny na ee effektivnost [Experimental study of the influence of radiality degree of impeller radial-axial turbine on its efficiency]. *Trudy Nauchno-avtomotornogo instituta*, 1971, no. 127, pp. 47–50.
- Sherstyuk A.N., Zaryankin A.E. *Radialno-osevye turbiny maloy moshchnosti* [Low capacity radial-axial turbines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 208 p.
- Fedorova N.N., Valger S.A., Danilov M.N., Zakharova Yu.V. *Osnovy raboty v Ansys 17* [Basics in Ansys 17]. Moscow, DMK Press, 2017. 210 p.
- Basov K.A. *ANSYS. Spravochnik polzovatelya* [ANSYS. User manual]. Moscow, DMK Press, 2014. 640 p.
- Stolarski T., Nakasone Y., Yoshimoto S. *Engineering analysis with ANSYS software*. Amsterdam, Elsevier, Academic Press, 2010. 480 p.
- Sirotkin Ya.A. Raschet osesimmetrichnogo vikhrevogo techeniya nevyazkoy szhimaemoy zhidkosti v radialnykh turbomashinakh [Calculation of axisymmetric vortex flow of inviscid compressible fluid in radial turbomachines]. *Izvestiya akademii nauk SSSR, Otdelenie tekhnicheskikh nauk, Mekhanika i mashinostroenie*, 1963, no. 3, pp. 16–28.
- Wu Chung-Hua. A general theory of three-dimensional flow in subsonic and supersonic turbomachines of axial, radial and mixed-flow types. *Trans. ASME*, 1952, vol. 74, pp. 8, pp. 1363–1380.
- Hawthorne W., Novak R. The aerodynamics of turbo-machinery. *Annual review of fluid mechanics*, 1969, vol. 1, no. 4, pp. 341–366.

12. Kireev V.I., Panteleev A.V. *Chislennyye metody v primerakh i zadachakh* [Numerical methods in examples and problems]. St-Petersburg, Lan Publ., 2015. 448 p.
13. Beam R.M., Warming R.F. An implicit factored scheme for the compressible Navier–Stokes equations. *AIAA Journal*, 1978, vol. 16, no. 4, pp. 393–402.
14. Zaliznyak V.E. *Chislennyye metody. Osnovy nauchnykh vychisleniy* [Numerical methods. Fundamentals of scientific computing]. Moscow, Yurayt Publ., 2016. 356 p.
15. Betounes D. *Partial differential equations for computational science analysis*. Hattiesburg, Springer-Verlag, 1998. 530 p.
16. Lashko V.A., Passar A.V. Calculation of kinetic energy losses coefficient in the flow range as one of the challenges of implementing an integrated approach. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2011, no. 1 (20), pp. 79–90. In Rus.
17. Passar A.V., Timoshenko D.V., Bulgakov V.K. Effect of radial extent on the efficiency of the turbine of the turbocharger TKR-14. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, no. 1 (36), pp. 115–124. In Rus.
18. Mitrokhin V.T. *Vybor parametrov i raschet tsentrostremitelnoy turbiny na statsionarnykh i perekhodnykh rezhimakh* [Choice of parameters and calculation of centripetal turbines in stationary and transient modes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 228 p.
19. Hahn B.H., Valentine D.T. *Essential Matlab for engineers and scientists*. Amsterdam, Elsevier, Academic Press, 2013. 424 p.
20. Sonaje N. *Mathcad a tool for infiltration modeling*. Saarbrücken, Lambert academic publishing, 2011. 156 p.

Received: 3 April 2017.

#### Information about the authors

**Andrey V. Passar**, Cand. Sc., senior researcher, Computer center of Far East branch of the of the Russian Academy of Science.

**Denis V. Timoshenko**, Cand. Sc., associate professor, Pacific State University.

УДК 550.3:536.2

## АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В НЕОДНОРОДНОМ ПЛАСТЕ

Рамазанов Айрат Шайхуллинович<sup>1</sup>,  
ramaz@geotec.ru

Исламов Денис Фавилович<sup>1</sup>,  
islamovden@rambler.ru

<sup>1</sup> Башкирский государственный университет,  
Россия, 450074, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32.

**Актуальность работы.** В последнее время усиливается интерес к количественной интерпретации температурных измерений в скважине. Целями количественной интерпретации становятся индивидуальные дебиты жидкости из отдельных пластов, пластовое давление в отдельных пластах, дебит заколонного перетока, гидродинамические параметры пластов, характер изменения проницаемости пласта в прискважинной зоне. В качестве исходных данных для переходных процессов используются нестационарные поля давления и температуры в скважине, а для квазистационарных условий – распределение температуры по глубине. Особый интерес представляет определение дебитов притока из отдельных пластов и параметров прискважинной зоны пластов.

**Цель:** разработка и обоснование упрощенной аналитической модели неизотермической однофазной фильтрации жидкости в пласте с радиальной неоднородностью.

**Методы исследования.** Методом характеристик получено аналитическое решение для температурного поля в пласте после изменения дебита. При решении сделаны два допущения: не учитывается радиальная теплопроводность и сжимаемость насыщенной пористой среды. Аналитические модели сравниваются с численным решением задачи.

**Результаты.** Исследована задача о нестационарном температурном поле при фильтрации жидкости в неоднородном по проницаемости пласте. Показано, что влияние радиальной теплопроводности и сжимаемости для нефте- и водонасыщенных пластовых систем на нестационарное температурное поле после изменения дебита незначительно. На основе разработанной модели по кривым изменения температуры после изменения дебита можно решать обратную задачу об оценке радиуса зоны нарушения проницаемости в пласте. Возможность реализации данной методики демонстрируется на модельных кривых изменения температуры.

### Ключевые слова:

Температура, давление, фильтрация, конвекция, теплопроводность, баротермический эффект, пласт, скважина, изменение дебита, неоднородный пласт.

### Введение

В последнее время наблюдается усиленный интерес к исследованиям скважин автономными датчиками давления и температуры [1]. Такой подход к исследованиям дает возможность регистрировать изменение давления и температуры во времени и зондировать пласты на переходных режимах при испытании скважины [1, 2]. Обычно при количественной интерпретации данных испытанной скважин используются только данные об изменении давления. Данные температурного зондирования могут быть использованы в качестве дополнительного независимого источника информации о свойствах коллектора. Методике интерпретации и проведению исследований методом термометрии посвящены ряд статей и патентов [1–11].

В работе [1] предлагается методика исследования многопластовых скважин. Данная методика подразумевает регистрацию изменения давления и температуры на кровле и подошве каждого продуктивного пласта во время переходного режима. Для данного метода испытания многопластовой скважины требуется только одна операция изменения дебита на устье для получения интерпретируемых данных давления и температуры на переходном режиме. Обратная задача решается с помощью алгоритма регрессии Левенберга–Марквардта.

В патентах [6–11] изложены возможности практического использования данных нестационарной термометрии. Можно определять: профиль притока в скважину, дебиты отдельных продуктивных пластов в многопластовой скважине и параметры околоскважинного пространства, такие как проницаемость и скин-фактор. Решение обратных задач подразумевает численное моделирование температуры в стволе скважины.

В работе исследуется задача о нестационарном температурном поле в пласте после изменения дебита. Преследовались следующие цели: разработка и обоснование упрощенной аналитической модели неизотермической однофазной фильтрации жидкости в пласте с радиальной неоднородностью.

### Постановка задачи

Неизотермичность фильтрации обуславливается теплопроводностью в радиальном направлении и баротермическим эффектом.

Допущения для пласта – пористый, неоднородный по проницаемости горизонтальный пласт, насыщенный однофазной слабосжимаемой жидкостью.

Изменение температуры в пласте за счет конвекции, теплопроводности и баротермического эффекта описывается следующим уравнением [12, 13]

$$C_{res} \frac{\partial T}{\partial t} + C_f v(r, t) \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\lambda}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) - C_f \varepsilon v(r, t) \frac{\partial p}{\partial r} + \varphi C_f \eta \frac{\partial p}{\partial t}, \quad (1)$$

где  $C_{res}$ ,  $C_f$  – объемные теплоемкости пласта и флюида, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $T$  – температура, К;  $r$  – радиальная координата, расстояние в пласте от оси скважины, м;  $t$  – время, с;  $v$  – скорость фильтрации флюида, м/с;  $\lambda$  – теплопроводность насыщенного флюидом пласта, Вт/(м·К);  $\varepsilon$ ,  $\eta$  – коэффициент Джоуля–Томсона и адиабатический коэффициент для флюида, К/Па;  $\varphi$  – пористость пласта, д. ед.;  $p$  – давление, Па.

В начальный момент времени температура в пласте постоянная

$$T(r, 0) = T_{res}. \quad (2)$$

Температура на внешней границе области остается равной пластовой температуре

$$T(R, t) = T_{res}, \quad (3)$$

$R$  – радиус контура питания пласта, м;  $T_{res}$  – начальная температура в пласте, К.

Граничное условие на стенке скважины ( $r=r_w$ )

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_w} = \alpha (T_w(t) - T \Big|_{r=r_w}). \quad (4)$$

Здесь  $T_w$  – средняя по сечению температура в стволе скважины, К;  $\alpha$  – коэффициент теплообмена между жидкостью в стволе скважины и стенкой скважины, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Теплопроводность насыщенного флюидом пласта рассчитывалась по модели Лихтенеккера [20]

$$\lambda = \lambda_{sk}^{1-\varphi} \lambda_f^\varphi. \quad (5)$$

Для описания поля давления в пласте используется одномерное уравнение пьезопроводности для случая осевой симметрии

$$\beta^* \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{k(r)}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \right), \quad (6)$$

где  $\beta^* = \varphi \beta^i + \beta^{sk}$  – упругоёмкость насыщенного жидкостью пласта, 1/Па;  $\beta^i$ ,  $\beta^{sk}$  – сжимаемость флюида и скелета пласта, 1/Па;  $k$  – проницаемость пласта, м<sup>2</sup>;  $\mu$  – вязкость флюида, Па·с.

В начальный момент времени давление в пласте равно начальному пластовому и на внешней границе оно поддерживается равным пластовому давлению

$$p(r, 0) = P_{res}, \quad (7)$$

$$p(R, t) = P_{res}. \quad (8)$$

Граничное условие на стенке скважины учитывает наличие поверхностного скин-фактора и выглядит следующим образом [1]

$$p_w(t) = p(r_w, t) - S \left( r \frac{\partial p}{\partial r} \right)_{r=r_w}, \quad (9)$$

где  $p_w$  – забойное давление, давление в стволе скважине, Па;  $r_w$  – радиус скважины, м;  $S$  – скин-фактор на границе между скважиной и пластом.

Забойное давление в начальный момент времени

$$p_w(0) = P_w. \quad (10)$$

Переходной процесс для давления в стволе скважины моделируется следующим уравнением [4]

$$Q(t) = 2\pi \left( r \sigma(r) \frac{\partial p}{\partial r} \right)_{r=r_w} - C_s \frac{dp_w}{dt}. \quad (11)$$

Здесь  $Q(t)$  – дебит скважины, м<sup>3</sup>/с;  $\sigma(r) = \frac{k(r)h}{\mu}$  –

гидропроводность пласта, м<sup>3</sup>/(Па·с),  $h$  – толщина пласта, м;  $C_s$  – параметр влияния ствола скважины (ВСС), м<sup>3</sup>/Па.

В итоге имеем следующую математическую модель, которую условно можно разделить на две задачи, для температуры (1)–(5) и давления (6)–(11) [13]

$$\begin{cases} C_{res} \frac{\partial T}{\partial t} + C_f v(r, t) \frac{\partial T}{\partial r} = \\ = \frac{\lambda}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) - C_f \varepsilon v(r, t) \frac{\partial p}{\partial r} + \varphi C_f \eta \frac{\partial p}{\partial t}; \\ T(r, 0) = T_{res}; \\ T(R, t) = T_{res}; \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_w} = \alpha (T_w(t) - T \Big|_{r=r_w}). \end{cases} \quad (12)$$

Необходимые для расчета температуры  $v(r, t)$  и  $p(r, t)$  находятся из решения краевой задачи пьезопроводности [13]

$$\begin{cases} \beta^* \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{k(r)}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \right); \\ p(r, 0) = P_{res}; \\ p(R, t) = P_{res}; \\ p_w(t) = p(r_w, t) - S \left( r \frac{\partial p}{\partial r} \right)_{r=r_w}; \\ p_w(0) = P_w; \\ Q(t) = 2\pi \left( r \sigma(r) \frac{\partial p}{\partial r} \right)_{r=r_w} - C_s \frac{dp_w}{dt}. \end{cases} \quad (13)$$

Задача (12), (13) в данном виде не имеет аналитического решения, поэтому решалась численно, методом прогонки. Для дискретизации использовался метод контрольных объемов. Для температуры учитывается разностная схема против потока [13]. Сетка по координате  $r$  неравномерная. Координаты контрольных объемов связаны соотношением:  $r_i = \theta r_{i-1}$ ,  $\theta = \left( \frac{R}{r_w} \right)^{\frac{1}{N-1}}$  ( $i$  – индекс узловой точки контрольного объема,  $N$  – количество узлов).

На основе численной модели разработан симулятор, который позволяет строить модельные кривые изменения давления и температуры на стенке скважины в зависимости от параметров пласта и скважины для переменного дебита [13].

### Аналитическое решение

Для того чтобы задачи (12) и (13) имели аналитическое решение приняты следующие допущения:

- пренебрегаем радиальной теплопроводностью по сравнению с конвективным теплопереносом ( $\lambda=0$ );
- флюид и скелет пласта несжимаемы ( $\beta^*=0$ );
- пренебрегаем влиянием процессов в стволе скважины на поле давления в пласте ( $C_s=0$ );
- пренебрегаем поверхностным скином,  $p_w(t)=p(r_w, t)$ .

С учетом этих допущений температурное поле в пласте описывается следующей задачей [14]

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} + u(r, t) \frac{\partial T}{\partial r} = -\varepsilon u(r, t) \frac{\partial p}{\partial r} + \eta^* \frac{\partial p}{\partial t}; \\ T|_{r=0} = f(r), \end{cases} \quad (14)$$

где

$$u(r, t) = cv(r, t) = -c \frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r}; \quad \eta^* = \varphi \frac{C_f}{C_{res}} \eta; \quad c = \frac{C_f}{C_{res}}.$$

Задача (14) решена методом характеристик. Характеристики  $r(t, r_1)$  являются решением задачи [14–16]

$$\begin{cases} \frac{dr}{dt} = u(r, t); \\ r|_{t=0} = r_1. \end{cases} \quad (15)$$

Температура вдоль характеристик согласно (15) рассчитывается по формуле [17]

$$\begin{aligned} T(r(t, r_1), t) = & f(r_1) + \varepsilon [P_{res} - p(r(t, r_1), t)] + \\ & + (\varepsilon + \eta^*) \int_0^t \frac{\partial p(r(\tau, r_1), \tau)}{\partial \tau} d\tau. \end{aligned} \quad (16)$$

Распределение давления  $p(r, t)$ , необходимые  $\frac{\partial p}{\partial r}$ ,  $\frac{\partial p}{\partial t}$  и  $u(r, t)$ , находятся из решения задачи (13), которая с учетом принятых выше допущений принимает более простой вид

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{k(r)}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \right) = 0; \\ p(r, 0) = P_{res}; \\ p(R, t) = P_{res}; \\ Q(t) = 2\pi \left( r\sigma(r) \frac{\partial p}{\partial r} \right)_{r=r_w}. \end{cases} \quad (17)$$

Пусть распределение проницаемости в пласте и дебит жидкости из пласта описываются кусочно-постоянными функциями

$$k(r) = \begin{cases} k_1, & r \leq r_d; \\ k_2, & r > r_d; \end{cases} \quad (18)$$

$$Q(t) = \begin{cases} Q_1, & t \leq t_p; \\ Q_2, & t > t_p. \end{cases} \quad (19)$$

Скважина в течение времени  $t_p$  работает с дебитом  $Q_1$ , а затем дебит скважины становится  $Q_2$ . Проницаемость пласта  $k_2$ , а в ближней к скважине зоне, в зоне нарушения пласта, –  $k_1$ .

Тогда, согласно (17)–(19), распределение давления в неоднородном пласте при работе с дебитом  $Q_1 (t < t_p)$  рассчитывается по формуле [18]

$$p_1(t) = \begin{cases} P_{w1} + \frac{Q_1}{2\pi\sigma_1} \ln \frac{r}{r_w}, & r \leq r_d; \\ p_1(r_d) + \frac{Q_1}{2\pi\sigma_2} \ln \frac{r}{r_d}, & r > r_d, \quad r \leq R; \\ P_{res}, & r > R. \end{cases} \quad (20)$$

Распределение давления в неоднородном пласте после однократного изменения дебита с учетом (18), (19) (для  $t > t_p$ ) рассчитывается по формуле [18]

$$p_2(t) = \begin{cases} P_{w2} + \frac{Q_2}{2\pi\sigma_1} \ln \frac{r}{r_w}, & r \leq r_d; \\ p_2(r_d) + \frac{Q_2}{2\pi\sigma_2} \ln \frac{r}{r_d}, & r > r_d, \quad r \leq R; \\ P_{res}, & r > R, \end{cases} \quad (21)$$

$r_d$  – радиус зоны нарушения проницаемости пласта;  $\sigma_1$  – гидропроводность ближней зоны ( $r \leq r_d$ ) и  $\sigma_2$  – гидропроводность дальней зоны ( $r > r_d$ ) пласта;  $P_{w1}$  и  $P_{w2}$  – забойное давление при работе скважины с дебитами  $Q_1$  и  $Q_2$  [19].

Забойные давления в (20) и (21) рассчитываются по формулам (22) и (23)

$$P_{w1} = P_{res} - \frac{Q_1}{2\pi\sigma_2} \left( \ln \frac{R}{r_w} + S_d \right), \quad (22)$$

$$P_{w2} = P_{res} - \frac{Q_2}{2\pi\sigma_2} \left( \ln \frac{R}{r_w} + S_d \right), \quad (23)$$

где  $S_d = \left( \frac{k_2}{k_1} - 1 \right) \ln \frac{r_d}{r_w}$  – скин-фактор за неоднородность пласта [18].

Тогда

$$u(r, t) = \begin{cases} -c \frac{Q_1}{2\pi h r}, & t \leq t_p; \\ -c \frac{Q_2}{2\pi h r}, & t > t_p \end{cases} \quad (24)$$

и

$$\frac{\partial p}{\partial t} = (p_1(r) - P_{res})\delta(t) + (p_2(r) - p_1(r))\delta(t - t_p). \quad (25)$$

С учетом (24), (25), на основе (16) нетрудно получить для температуры на стенке скважины после изменения дебита следующую формулу

$$\begin{aligned} T(r_w, t) = & f(r_{T2}) + \varepsilon [p_1(r_{T2}) - P_{w2}] - \\ & - (\varepsilon + \eta^*) [p_1(r_{T2}) - p_2(r_{T2})], \end{aligned} \quad (26)$$

где

$$f(x) = T_{res} + \varepsilon [P_{res} - p_1(x)] - (\varepsilon + \eta^*) [P_{res} - p_1(t_1)];$$

$$r_{T_1} = \sqrt{x^2 + c \frac{Q_1 t_p}{\pi h}}; r_{T_2} = \sqrt{r_w^2 + \tilde{n} \frac{Q_2 (t - t_p)}{\pi h}}.$$

Корректность аналитического решения проверена путем сравнения с результатами численного решения задач (12) и (13), с учетом принятых для аналитической модели допущений. Для этого был смоделирован случай отбора жидкости из однородного пласта с переменным дебитом. Среднее квадратичное отклонение (СКО) не превысило  $10^{-4}$  К.

#### Анализ результатов моделирования

А) Влияние теплопроводности и сжимаемости пласта на температуру

Смоделировано численно и аналитически изменение температуры при отборе жидкости из водонасыщенного и нефтенасыщенного пласта. Параметры насыщающего пласт флюида представлены в таблице. При численном моделировании учитывалась теплопроводность ( $\lambda \neq 0$ ) и сжимаемость ( $\beta \neq 0$ ) пласта.

**Общие параметры моделирования:** радиус скважины 0,1 м; радиус контура питания пласта 100 м; дебит на устье скважины 100 м<sup>3</sup>/сут в течение 10 часов и 50 м<sup>3</sup>/сут в последующее время; начальное давление в скважине и в пласте 200 атм; параметр ВСС 0 м<sup>3</sup>/Па; начальная температура в пласте 20 °С; проницаемость пласта 100 мД; пористость пласта 0,2; толщина пласта 5 м; сжимае-

мость скелета пласта  $2 \cdot 10^{-10}$  1/Па; теплопроводность скелета пласта 2 Вт/(м·К); удельная теплоемкость скелета пласта 800 Дж/(кг·К); плотность скелета пласта 2200 кг/м<sup>3</sup>.

**Таблица.** Параметры насыщающего пласт флюида

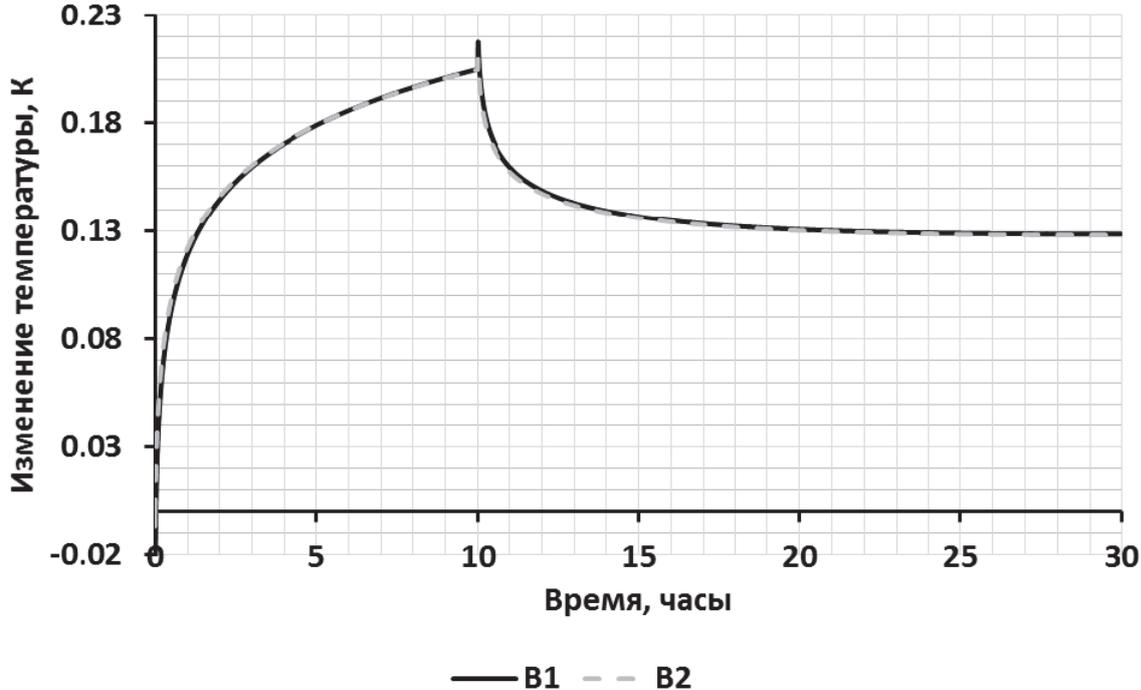
**Table.** Parameters of the reservoir saturating fluid

Параметр Parameter	Вода Water	Нефть Oil
Коэффициент Джоуля–Томсона, К/Па Joule–Thomson coefficient, K/Pa	$2 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-7}$
Адиабатический коэффициент, К/Па Adiabatic coefficient, K/Pa	$3 \cdot 10^{-8}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К) Heat capacity, J/(kg·K)	4150	2000
Плотность, кг/м <sup>3</sup> Density, kg/m <sup>3</sup>	1000	800
Вязкость, Па·с Viscosity, Pa·s	$10^{-3}$	$10^{-2}$
Сжимаемость, 1/Па Compressibility, 1/Pa	$4 \cdot 10^{-10}$	$15 \cdot 10^{-10}$
Теплопроводность, Вт/(м·К) Thermal conductivity, W/(m·K)	0,55	0,14

Теплопроводность и сжимаемость пласта в аналитической модели равны нулю.

Как видно из рис. 1, результаты численного моделирования и расчетов по аналитической модели практически совпадают. В начальный период отбора проявляется незначительное влияние сжимаемости, которое длится менее двух часов (рис. 2). СКО до изменения дебита 0,0017 К, а после изменения дебита СКО составило 0,0010 К.

Водонасыщенный пласт



**Рис. 1.** График изменения температуры на стенке скважины для водонасыщенного пласта: B1 – аналитическая модель, B2 – численная модель

**Fig. 1.** Sandface temperature changes for water-saturated reservoir: B1 is the analytical model, B2 is the numerical model

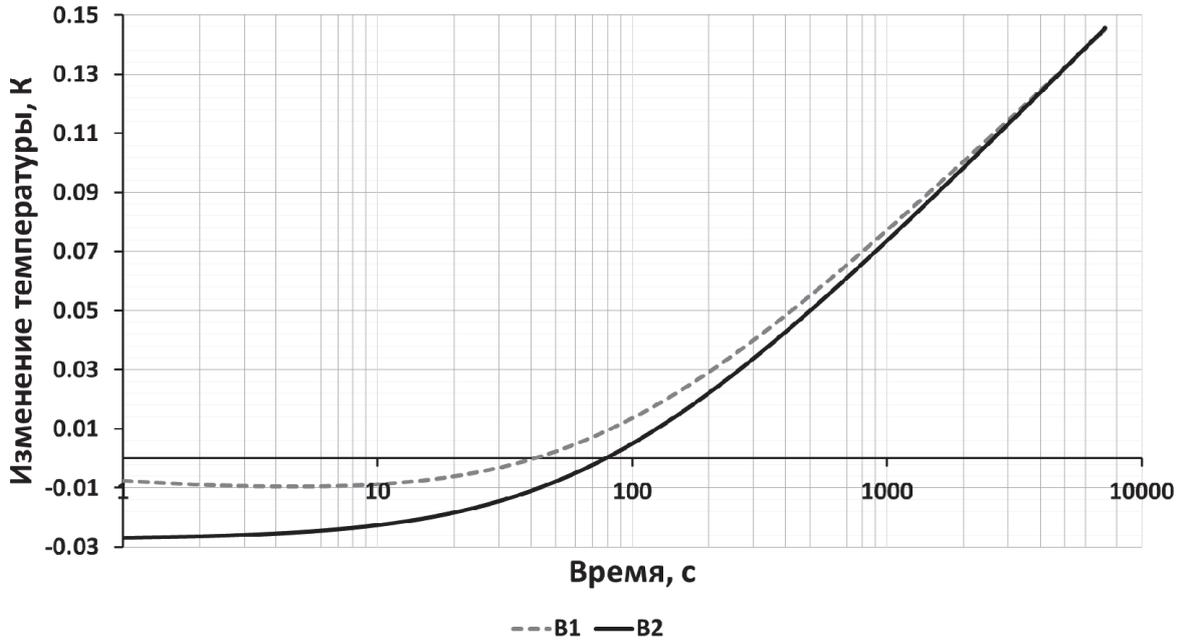


Рис. 2. График изменения температуры  $T-T_{res}$  на стенке скважины для водонасыщенного пласта в период притока. Обозначения – на рис. 1

Fig. 2. Sandface temperature changes ( $T-T_{res}$ ) for inflow period from the water-saturated reservoir. Symbols as in Fig. 1

#### Нефтенасыщенный пласт

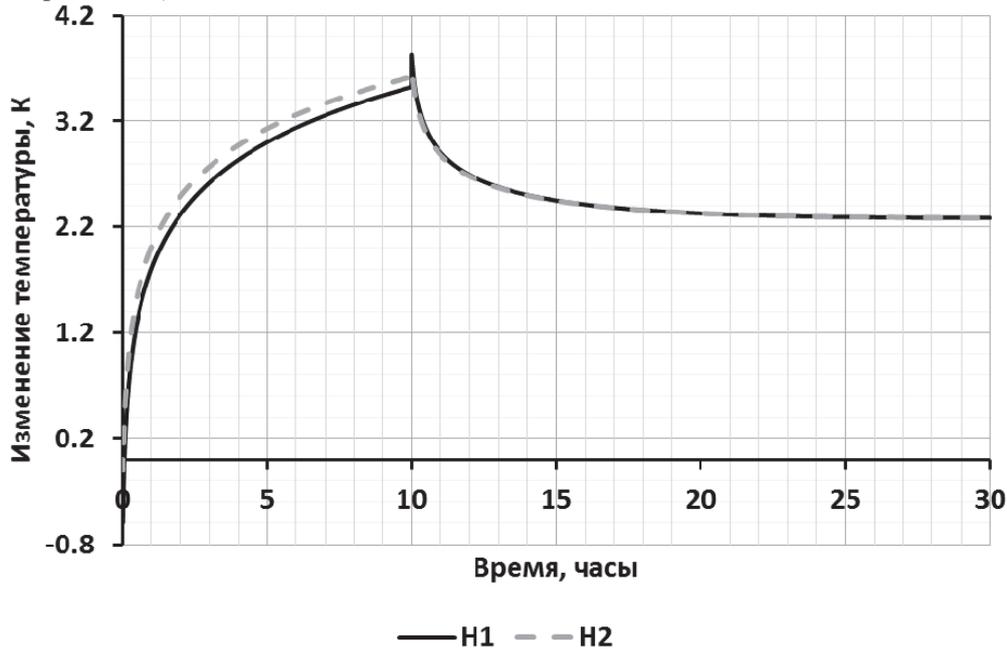


Рис. 3. График изменения температуры на стенке скважины для нефтенасыщенного пласта: H1 – аналитическая модель, H2 – численная модель

Fig. 3. Sandface temperature changes for the oil-saturated reservoir: H1 is the analytical model, H2 is the numerical model

Как видно из рис. 3, результаты численного моделирования с учетом теплопроводности и сжимаемости и по аналитической модели качественно одинаковы. Величина изменения температуры по численной модели несколько выше результатов расчета по аналитической модели. Этот эффект

для нефтенасыщенного пласта проявляется сильнее, чем в случае водонасыщенного пласта. Это объясняется влиянием сжимаемости пласта, сжимаемость нефти почти в четыре раза больше сжимаемости воды. СКО до изменения дебита 0,149 К, а после изменения дебита СКО составило 0,012 К.

Б) Фильтрация в однородном и неоднородном по проницаемости пласте

В длительно работающих скважинах температура слабо изменяется со временем, и поэтому зондировать среду по изменениям температуры сложно. Самый простой способ добиться изменения температуры – это изменить дебит.

Для проверки возможности получения информации о пласте по температуре моделируется случай отбора жидкости с переменным дебитом из однородного и неоднородного по проницаемости пласта.

**Параметры моделирования:** радиус скважины 0,1 м; радиус нарушенной зоны пласта 0,5 м; радиус контура питания пласта 10 м; дебит на устье скважины 100 м<sup>3</sup>/сут в начальные 10 часов и 50 м<sup>3</sup>/сут в последующее время; начальное давление в скважине и в пласте 200 атм; начальное распределение температуры в пласте 20 °С; проницаемость пласта в зоне нарушения 50 мД, в пласте 100 мД; пористость пласта 0,2; толщина пласта 5 м; вязкость флюида 1сПз; коэффициенты Джоуля–Томсона и адиабатический для воды: 0,02, 0,003 К/атм; удельные теплоемкости скелета пласта и воды 800, 4150 Дж/(кг·К); плотность скелета пласта и воды 2200, 1000 кг/м<sup>3</sup>.

Как видно на рис. 4, температура после уменьшения дебита падает. В случае неоднородного пла-

ста изменение температуры больше, поскольку величина депрессии вследствие уменьшения проницаемости в прискважинной зоне пласта больше, чем для однородного пласта. Чтобы определить границы нарушенной зоны, решена обратная задача с использованием следующего алгоритма (на основе нашего решения (26)):

1) построить график:

$$\left| T(r, t) \Big|_{r=r_p} - T(r, t_p) \right| \text{ от } \ln(t - t_p);$$

2) выделить прямолинейные участки на графике;  
 3) найти время, которому соответствует излом на графике;

4) по формуле (27) вычислить радиус нарушенной зоны пласта

$$r_{T_2} = \sqrt{r_w^2 + c \frac{Q_2(t - t_p)}{\pi h}}. \quad (27)$$

Время после изменения дебита, соответствующее точке излома, составило 0,96 часа ( $\Delta t_p$ ), а радиус нарушенной зоны – 0,497 м. Разница между заданным радиусом нарушения и полученным в результате решения обратной задачи составляет 0,48 %.

Еще одно доказательство того, что нестационарная температура притекающего из пласта флюида после изменения дебита несет в себе информа-

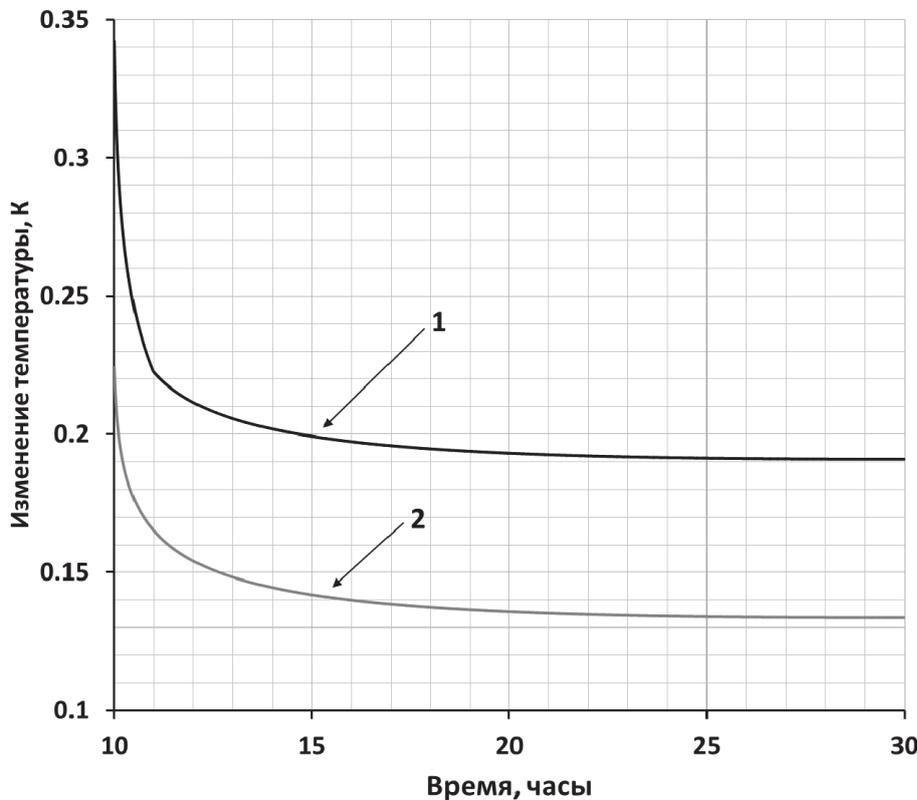


Рис. 4. График изменения температуры на стенке скважины после изменения дебита (1 – неоднородный пласт, 2 – однородный пласт)

Fig. 4. Sandface temperature change after change in flow rate (1 is the heterogeneous reservoir, 2 is the homogeneous reservoir)

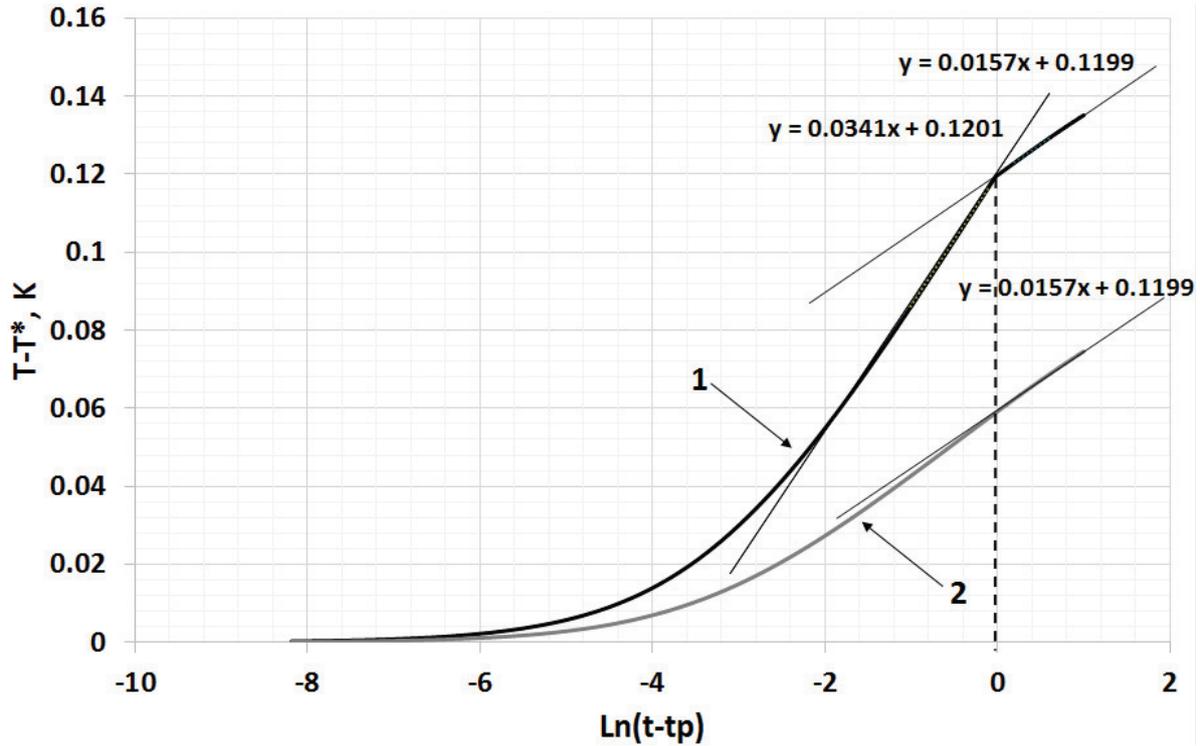


Рис. 5. График изменения температуры на стенке скважины после изменения дебита (1 – неоднородный пласт, 2 – однородный пласт).  $T$  – температура в момент изменения дебита,  $T^* = T(t_p)$

Fig. 5. Sandface temperature change after change in flow rate (1 is the heterogeneous reservoir, 2 is the homogeneous reservoir).  $T$  is the temperature at flow rate change,  $T^* = T(t_p)$

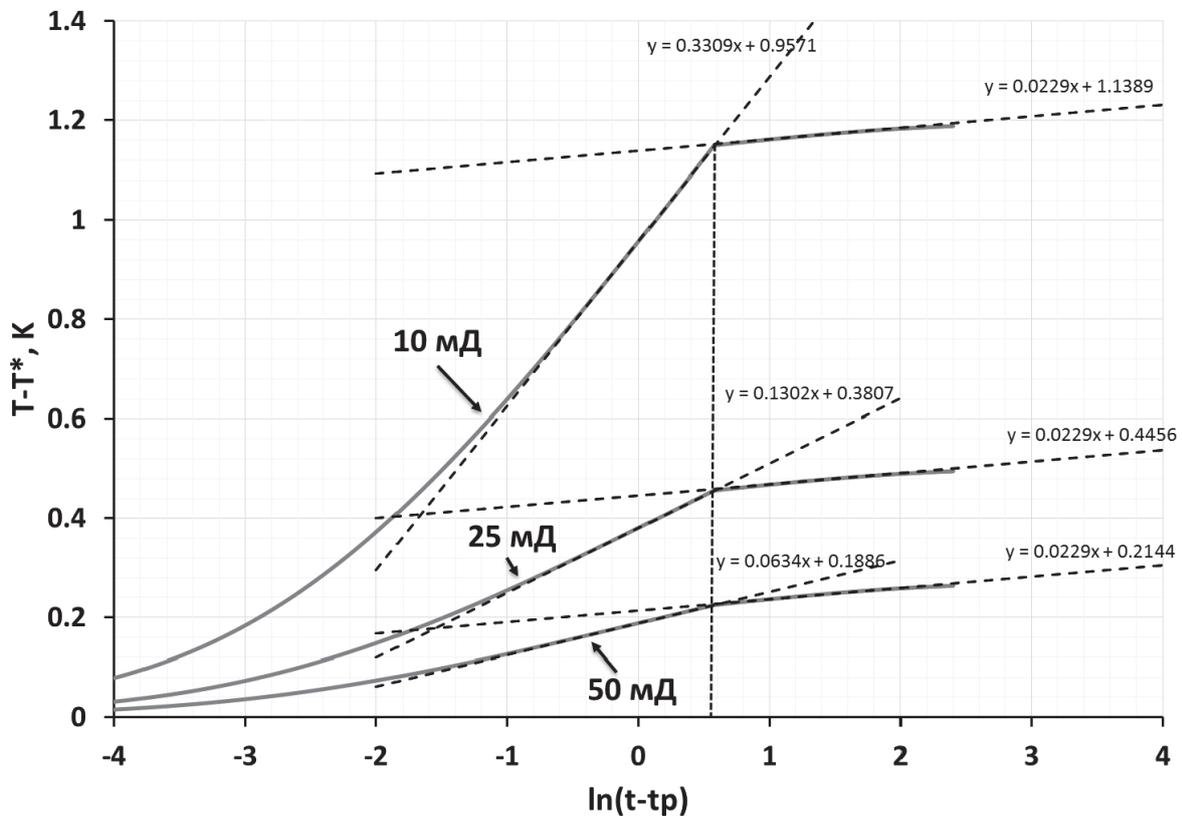


Рис. 6. График изменения температуры на стенке скважины после изменения дебита (проницаемость прискважинной зоны пласта 10, 25, 50 мД)

Fig. 6. Sandface temperature change after changing flow rate (permeability of near wellbore zone 10, 25, 50 md)

цию о радиусе нарушенной зоны, проиллюстрировано на рис. 6. На примере трех модельных кривых показано, что наклон всех кривых в полулогарифмических координатах после излома совпадает, и равен 0,0229 К. Это объясняется одинаковыми проницаемостями дальних зон – 100 мД.

#### Выводы

1. Для описания нестационарного температурного поля при однофазной фильтрации жидкости в пласте с радиальной неоднородностью после изменения дебита скважины разработана аналитическая модель. Она основана на модели жесткого пласта для поля давления, учитывает

конвективный теплоперенос и баротермический эффект.

2. Сравнение расчетов по аналитической модели с численным решением, учитывающим теплопроводность и сжимаемость среды, показало, что влияние теплопроводности и сжимаемости на результаты моделирования незначительно.
3. В результате исследования модели показано, что по кривым изменения температуры во времени, зарегистрированной после изменения дебита, можно оценить радиус нарушения проницаемости в прискважинной зоне пласта.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16–29–15130 офи\_м).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Determining Multilayer Formation Properties from Transient Temperature and Pressure Measurements / W. Sui, D. Zhu, A.D. Hill, C.A. Ehlig-Economides // Paper SPE 116270. – Denver, Colorado, USA, 21–24 September 2008. – P. 387–404.
2. Thermal Modeling for Characterization of Near Wellbore Zone and Zonal Allocation / A.Sh. Ramazanov, R.A. Valiullin, A.A. Sadretdinov, V.V. Shako, V.P. Pimenov, V.N. Fedorov, K.V. Belov // Paper SPE 136256. Russia Oil & Gas Technical Conference and Exhibition. – Moscow, Russia, 26–28 October 2010. – P. 739–760.
3. Onur M., Cinar M. Temperature Transient Analysis of Slightly Compressible, Single-Phase Reservoirs // Paper SPE 180074. SPE ATCE. – Vienna, Austria, 30 May – 2 June 2016. – P. 1309–1356.
4. Onur M., Cinar M. Interpretation and Analysis of Transient Sandface and Wellbore Temperature Data // Paper SPE 181710. SPE ATCE. – Dubai, UAE, 26–28 September 2016. – P. 121–167.
5. The Use of Simulators for Designing and Interpretation of Well Thermal Survey / A. Ramazanov, R. Valiullin, R. Sharafutdinov, T. Khabirov, A. Sadretdinov, M. Zakirov, D. Islamov // Understanding the Harmony of the Earth's Resources through Integration of Geosciences: Abstract Book of 7<sup>th</sup> Saint Petersburg International Conferences & Exhibition. – Saint Petersburg, Russia, 11–14 April, 2016. – 4 p.
6. Способ определения профиля притока флюидов и параметров околоскважинного пространства: пат. Рос. Федерация № 2460878; заявл. 30.09.10; опубл. 10.09.12, Бюл. № 25. – 11 с.
7. Способ определения профиля притока флюидов многопластовых залежей: пат. Рос. Федерация № 2474687; заявл. 26.10.11; опубл. 10.02.13, Бюл. № 4. – 18 с.
8. Способ определения профиля притока и параметров околоскважинного пространства в многопластовой скважине: пат. Рос. Федерация № 2505672; заявл. 31.12.09; опубл. 27.01.14, Бюл. № 3. – 12 с.
9. Способ определения профиля притока флюидов многопластовых залежей в скважине: пат. Рос. Федерация № 2531499; заявл. 23.08.13; опубл. 20.10.14, Бюл. № 29. – 21 с.
10. Способ определения параметров забоя и призабойной зоны скважины: пат. Рос. Федерация № 2535324; заявл. 24.12.12; опубл. 10.12.14, Бюл. № 34. – 13 с.
11. Способ определения скорости фильтрации пластовых флюидов: пат. Рос. Федерация № 2537446; заявл. 18.10.13; опубл. 10.01.15, Бюл. № 1. – 11 с.
12. Чекалюк Э.Б. Термодинамика нефтяного пласта. – М.: Недра, 1965. – 238 с.
13. Исламов Д.Ф., Рамазанов А.Ш. Нестационарное температурное поле при фильтрации жидкости в неоднородном пласте // Вестник Башкирского университета. – 2016. – № 1. – С. 4–8.
14. Рамазанов А.Ш., Нагимов В.М. Аналитическая модель для расчета температурного поля в нефтяном пласте при нестационарном притоке жидкости // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2007. – № 1. URL: [http://ogbus.ru/authors/Ramazanov/Ramazanov\\_2.pdf](http://ogbus.ru/authors/Ramazanov/Ramazanov_2.pdf) (дата обращения: 19.03.2017).
15. Рамазанов А.Ш., Нагимов В.М., Ахметов Р.К. Температурное поле в пласте с учетом термодинамических эффектов при работе скважины с переменным дебитом // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2013. – № 1. URL: [http://ogbus.ru/authors/Ramazanov/Ramazanov\\_4.pdf](http://ogbus.ru/authors/Ramazanov/Ramazanov_4.pdf) (дата обращения: 19.03.2017).
16. Duru O., Horne R.N. Combined Temperature and Pressure Data Interpretation: Applications to Characterization of Near-Wellbore Reservoir Structures // Paper SPE 146614. SPE ATCE. – Denver, Colorado, USA, 30 October – 2 November 2011. – P. 98–116.
17. Рамазанов А.Ш., Филиппов А.И. Температурные поля при нестационарной фильтрации жидкости // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. – 1983. – № 4. – С. 175–178.
18. Hawkins M.F. Jr. A note on the skin effect // Trans. AIME. – 1956. – V. 207. – P. 356–357.
19. Басниев К.С., Кочина И.Н., Максимов В.М. Подземная гидромеханика. – М.: Недра, 1993. – 416 с.
20. Lichtenecker K., Rother K. Die Herleitung des logarithmischen Mischung-gesetzes aus allgemeinen Prinzipien des stationaren Stroming // Phys. Z. – 1931. – № 32. – P. 255–260.

*Поступила 29.03.2017 г.*

#### Информация об авторах

**Рамазанов А.Ш.**, доктор технических наук, профессор кафедры геофизики Башкирского государственного университета.

**Исламов Д.Ф.**, аспирант кафедры геофизики Башкирского государственного университета.

UDC 550.3:536.2

**ANALYTICAL MODEL OF NON-STATIONARY TEMPERATURE IN HETEROGENEOUS RESERVOIR**

**Airat Sh. Ramazanov<sup>1</sup>,**  
ramaz@geotec.ru

**Denis F. Islamov<sup>1</sup>,**  
islamovden@rambler.ru

<sup>1</sup> Bashkir State University,  
32, Zaki Validi street, Ufa, 450074, Russia.

**The relevance of the research.** At present time the interest in quantitative interpretation of temperature surveys is growing. Individual flow rate and reservoir pressure of each layer, behind-casing flow rate, hydrodynamic layer parameters, characterization of permeability changing at near-wellbore zone become the purposes of quantitative interpretation. Non-stationary temperature and pressure in the well are used as input data for transient processes analysis, and temperature logs are used for quasi-stationary analysis. Determination of individual layer flow rates and near-wellbore zone parameters are of particular interest.

**The main aim** of the work is to develop and provide rationale for simplified analytical model of non-isothermal single-phase fluid filtration in heterogeneous reservoir.

**The methods used in the study.** Analytical solution for temperature field in the layer after flow rate change is obtained by the method of characteristics. Two assumptions were made in solving the problem: radial thermal conduction and compressibility of saturated porous medium are ignored. Analytical models are compared with the numerical solution of the problem.

**The results.** The paper studies the problem of unsteady temperature field in heterogeneous reservoir during fluid filtration. Radial heat conduction and compressibility of oil- or water-saturated reservoirs influence insignificantly the unsteady temperature field after the flow rate changes. It is possible to solve the inverse problem on evaluation of the damage zone radius of permeability in the reservoir basing on the model curves of the temperature change after flow rate change. The paper gives a detailed algorithm for solving the inverse problem. The possibility of that method realization is demonstrated on model curves of the temperature change.

**Key words:**

Temperature, pressure, filtration, convection, thermal conduction, compressibility, barothermal effect, reservoir, well, heterogeneous reservoir.

*The research was financially supported by the RFBR (project no. 16–29–15130 oφu\_m).*

**REFERENCES**

- Sui W., Zhu D., Hill A.D., Ehlig-Economides C.A. Determining Multilayer Formation Properties from Transient Temperature and Pressure Measurements. *Paper SPE 116270 presented at the SPE ATCE*. Denver, Colorado, USA, 21–24 September 2008. pp. 387–404.
- Ramazanov A.Sh., Valiullin R.A., Sadretdinov A.A., Shako V.V., Pimenov V.P., Fedorov V.N., Belov K.V. Thermal Modeling for Characterization of Near Wellbore Zone and Zonal Allocation. *Paper SPE 136256 presented at the SPE Russia Oil & Gas Technical Conference and Exhibition*. Moscow, Russia, 26–28 October 2010. pp. 739–760.
- Onur M., Cinar M. Temperature Transient Analysis of Slightly Compressible, Single-Phase Reservoirs. *Paper SPE 180074 presented at the SPE ATCE*. Vienna, Austria, 30 May – 2 June 2016. pp. 1309–1356.
- Onur M., Cinar M. Interpretation and Analysis of Transient Sandface and Wellbore Temperature Data. *Paper SPE 181710 presented at the SPE ATCE*. Dubai, UAE, 26–28 September 2016. pp. 121–167.
- Ramazanov A., Valiullin R., Sharafutdinov R., Khabirov T., Sadretdinov A., Zakirov M., Islamov D. The Use of Simulators for Designing and Interpretation of Well Thermal Survey. *Abstract Book of 7<sup>th</sup> Saint Petersburg International Conferences & Exhibition. Understanding the Harmony of the Earth's Resources through Integration of Geosciences*. Saint Petersburg, Russia, 11–14 April, 2016. 4 p.
- Shako V.V., Pimenov V.P., Kuchuk F.D. *Sposob opredeleniya profilya pritoka flyuidov i parametrov okoloskvazhinnogo prostranstva* [Method for determining profile of fluid influx and parameters of borehole environment]. Patent RF, no. 2460878, 2012.
- Shako V.V., Pimenov V.P., Teveni B. *Sposob opredeleniya profilya pritoka flyuidov mnogoplastovykh zalezhey* [Method for determining profile of fluid influx of multiformation deposits]. Patent RF, no. 2474687, 2013.
- Shako V.V., Pimenov V.P. *Sposob opredeleniya profilya pritoka i parametrov okoloskvazhinnogo prostranstva v mnogoplastovoy skvazhine* [Method for determining of influx profile and borehole environment parameters in multilayer well]. Patent RF, no. 2505672, 2014.
- Shako V.V., Pimenov V.P., Teveni B., Sidorova M.V. *Sposob opredeleniya profilya pritoka flyuidov mnogoplastovykh zalezhey v skvazhine* [Method for determining fluid movement profile of stacked pools in well]. Patent RF, no. 2531499, 2014.
- Spesivtsev P.E., Shako V.V., Teveni B. *Sposob opredeleniya parametrov zaboya i prizaboynoy zony skvazhiny* [Method for determining parameters for well bottom hole and bottom hole area]. Patent RF, no. 2535324, 2014.
- Shako V.V., Pimenov V.P., Teveni B., Sidorova M.V. *Sposob opredeleniya skorosti filtratsii plastovykh flyuidov* [Method for determining filtration rate of formation fluids]. Patent RF, no. 2537446, 2015.
- Chekalyuk E.B. *Termodinamika neftyanogo plasta* [Thermodynamics of oil reservoir]. Moscow, Nedra Publ., 1965. 238 p.
- Islamov D.F., Ramazanov A.Sh. Non-stationary temperature field for fluid flow in heterogeneous reservoir. *Vestnik Bashkirskogo universiteta – Bullet of Bashkir University*, 2016, no. 1, pp. 4–8. In Rus.
- Ramazanov A.Sh., Nagimov V.M. *Analiticheskaya model dlya rascheta temperaturnogo polya v neftyanom plaste pri nestatsionarnom pritoke zhidkosti* [Analytical Model for Calculating Temperature Distribution in Oil Reservoir during Unsteady Fluid In-

- flow]. *Elektronnyy nauchnyy zhurnal «Neftegazovoe delo»*, 2007, no. 1. Available at: [http://ogbus.ru/authors/Ramazanov/Ramazanov\\_2.pdf](http://ogbus.ru/authors/Ramazanov/Ramazanov_2.pdf) (accessed 19 March 2017).
15. Ramazanov A.Sh., Nagimov V.M., Akhmetov R.K. Temperaturnoe pole v plaste s uchetom termodinamicheskikh ehffektov pri rabote skvazhiny s peremennym debitom [Analytical model of temperature prediction for a given production history]. *Elektronnyy nauchnyy zhurnal «Neftegazovoe delo»*, 2013, no. 1. Available at: [http://ogbus.ru/authors/Ramazanov/Ramazanov\\_2.pdf](http://ogbus.ru/authors/Ramazanov/Ramazanov_2.pdf) (accessed 19 March 2017).
  16. Duru O., Horne R.N. Combined Temperature and Pressure Data Interpretation: Applications to Characterization of Near-Wellbore Reservoir Structures. *Paper SPE 146614 presented at the SPE ATCE*. Denver, Colorado, USA, 30 October – 2 November 2011. pp. 98–116.
  17. Ramazanov A.Sh., Filippov A.I. Temperature field in non-stationary filtration. *Izvestiya AN SSSR. Mekhanika Zhidkosti i Gaza*, 1983, no. 4, pp. 175–178. In Rus.
  18. Hawkins M.F. Jr. A note on the skin effect. *Trans. AIME*, 1956, vol. 207, pp. 356–357.
  19. Basniev K.S., Kochina I.N., Maksimov V.M. *Podzemnaya gidromekhanika* [Underground Fluid Mechanics]. Moscow, Nedra Publ., 1993. 416 p.
  20. Lichtenecke, K., Rother K. Die Herleitung des logarithmischen Mischungsgesetzes aus allgemeinen Prinzipien der stationären Stromung [The derivation of the logarithmic mixture law on General principles of the stationary flow]. *Physikal*, 1931, no. 32, pp. 255–260.

*Received: 29 March 2017.*

#### Information about the authors

**Airat Sh. Ramazanov**, Dr. Sc., professor, Bashkir State University.

**Denis F. Islamov**, postgraduate, Bashkir State University.

УДК 620.97

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭНЕРГИИ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ФОТОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Дмитриенко Виталий Николаевич<sup>1</sup>,  
dvn@sibtehproekt.com

Лукутин Борис Владимирович<sup>1</sup>,  
lukutin48@mail.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность работы обусловлена необходимостью автономной электрификации объектов нефтегазовой транспортной системы. **Цель:** представление методики расчета энергии солнечного излучения, используемой автономными фотоэлектростанциями, позволяющей повысить точность моделирования инсоляции при проектировании автономных систем электроснабжения с фотоэлектростанциями. Использование предлагаемой методики позволит эффективно моделировать режимы всех элементов автономной фотоэлектрической станции в суточном цикле с интервалом дискретизации равным одному часу.

**Методы исследования.** Методика оценки энергии солнечного излучения основана на использовании программных пакетов: PVsyst, Excel, компьютерных баз метеоданных NASA, Meteororm.

**Результаты.** В результате проведенной работы предлагается методика определения энергетического потенциала солнечного излучения, основанная на использовании программного комплекса PVsyst и понятия «характерные сутки» для получения почасовой зависимости мощности солнечного излучения, характерной для каждого месяца года. Данная методика имеет широкие возможности для исследования инсоляции конкретной местности, в частности ее можно использовать для оптимизации взаимодействия элементов автономных гибридных комплексов, таких как солнечно-дизельные (СЭС-ДЭС). Интервал дискретизации в один час позволит максимально эффективно оценить вклад энергии солнечного излучения в общий график электропотребления. На основе полученных данных можно оценить степень загрузки дизельной электростанции в течение года и, соответственно, количество потребляемого топлива за отчетный период времени. Это в свою очередь позволит планировать объем поставок дизельного топлива в конкретную местность. Тестирование данной методики на реальной фотоэлектростанции показало ее приемлемую точность, характеризующую относительной погрешностью около 10 %, по годовой выработке электроэнергии.

### Ключевые слова:

Фотоэлектрические станции, солнечное излучение, программный комплекс, «характерные сутки», PVsyst, Meteororm.

### Введение

В связи с потребностью освоения месторождений углеводородного сырья в отдаленных районах, не имеющих транспортной и энергетической инфраструктуры, необходимостью электрификации объектов нефтегазовой транспортной системы все большую актуальность приобретают автономные энергоустановки, использующие ресурсы различной физической природы.

Известные перспективы имеют возобновляемые энергоисточники – ветровые и фотоэлектрические электростанции. Их достоинствами являются: отсутствие потребности в топливе, большой срок службы, возможность длительной работы в автоматическом режиме, достаточно отработанные технологии энергопреобразования. Стремительное развитие фотоэнергетики в последние годы определяет практический интерес к ее использованию в автономных системах электроснабжения, в том числе в объектах нефтегазовой промышленности.

Исходной информацией для проектирования фотоэлектростанций, наряду с электрическими нагрузками, является энергетический потенциал солнечного излучения. Инсоляция существенно зависит от географической широты местности, времени года и суток, прозрачности атмосферы, характера подстилающей поверхности и других факторов.

Изучение фотоэлектрического потенциала с целью его адекватного представления в форме, удобной для последующих оптимизационных расчетов фотоэлектростанций, является актуальной задачей. Исследованиям в данной области посвящены многие работы [1–12].

Как правило, анализ энергии солнечного излучения проводится либо на основе данных метеостанции, установленной на рассматриваемой территории [3–5], либо с использованием открытой базы данных NASA-SSE [13]. В ряде работ приводятся астрономические алгоритмы [2, 6], позволяющие моделировать интенсивность солнечного излучения.

В настоящее время имеются программные пакеты, позволяющие анализировать системы электроснабжения с учетом энергоустановок возобновляемой энергетики. Широкое распространение получили: HOMER (Hybrid optimization modeling software), HOGA (Hybrid optimization by genesis algorithm), HYPORA (Hybrid power optimized for rural/remote areas) и ряд других. Основой построения большинства оптимизационных комплексов для анализа комбинированных энергетических систем с участием возобновляемых энергоисточников являются работы [14, 15].

Указанные программные комплексы решают задачу оптимизации стоимости генерируемой электроэнергии путем выбора наилучшего соотно-

шения установленных мощностей генерирующего и аккумулирующего оборудования.

Мощность генерации массива фотоэлектрических панелей определяется в соответствии с их общей площадью, коэффициентом полезного действия и среднемесячной удельной солнечной радиацией на горизонтальную поверхность. Использование в расчетах среднемесячной инсоляции противоречит суточному циклу работы фотоэлектростанции и ограничивает возможности имитационного моделирования режимов работы ее элементов.

#### Цель исследований

В работе предлагается методика построения временной зависимости мощности инсоляции на исследуемой территории для «характерных» суток каждого месяца, что позволит моделировать режимы всех элементов фотоэлектростанции на суточном цикле ее работы с определенным интервалом дискретизации, например часовым.

#### Объект исследований

В работе рассматривается моделирование энергетического потенциала солнечного излучения в течение суток с часовой дискретизацией. Применение полученных моделей инсоляции проиллюстрировано на примерах фотоэлектростанций, расположенных в Якутии.

Стремление анализировать режимы работы фотоэлектростанции в реальном масштабе времени требует наличия информации о зависимости энергии солнечного излучения от времени суток. Программный комплекс «PVsyst» [16] позволяет получать данные об уровне инсоляции на наклонную или горизонтальную поверхность с учетом реальной облачности за каждый час суток конкретного дня, месяца рассматриваемого года.

Исходной информацией для программного пакета PVsyst являются данные с метеостанций NASA-SSE и Meteonorm [17]. База Meteonorm включает погодные данные с 1200 метеостанций мира. Период наблюдений составляет 10...30 лет. Для максимального приближения данных к реальным значениям Meteonorm интерполирует значения с 3-х ближайших метеостанций, расположенных в районе исследуемой точки. PVsyst позволяет добавлять информацию в базу данных, для этого требуется указать метеостанцию в исследуемом районе.

Процесс моделирования работы фотоэлектрической системы начинается с задания географических координат места предполагаемого строительства фотоэлектростанции. Далее выбираются способы установки и ориентации фотоэлектрических панелей: угол наклона, азимут, тип крепления панелей: фиксированный угол, несколько углов, сезонный угол, одноплоскостной или двухплоскостной трекер. Следующим этапом моделирования является выбор типа и количества фотоэлектрических панелей и инверторов. Программный ком-

плекс позволяет учесть электрические потери в соединительных кабелях, трансформаторах, инверторах. Кроме этого, PVsyst позволяет учитывать потери, определяемые уровнем освещенности, температурой, рассогласованием массива фотоэлектрических панелей и др.

Комплекс имеет развитый интерфейс, что обеспечивает удобство пользования. Очевидно, что значение текущей инсоляции на рассматриваемом интервале времени имеет переменный характер, что не позволяет непосредственно использовать ее для проектных расчетов фотоэлектростанции. В частности, уровень инсоляции в один и тот же час в начале и в конце месяца будет отличаться в соответствии с изменением астрономического положения солнца.

Для ограничения объемов вычислений на разумном уровне целесообразно ввести понятие «характерные сутки» для каждого месяца с интервалом дискретизации степени инсоляции в 1 час. Тогда с помощью программного комплекса PVsyst можно получить данные о почасовой инсоляции на горизонтальную поверхность за каждый день рассматриваемого месяца в исследуемом районе (1).

Интегральный уровень инсоляции для рассматриваемого месяца для  $i$ -го часа характерных суток вычисляется по формуле:

$$P_{ixc} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n P_{ij}. \quad (1)$$

где  $P_{ixc}$  – инсоляция на  $i$ -м часе характерных суток;  $P_{ij}$  – мощность инсоляции на приемную поверхность на  $i$ -м часе в  $j$ -й день месяца;  $n$  – количество дней в месяце;  $i=(0...23)$  час суток;  $j=(1-n)$  – день месяца.

Суммарная энергия инсоляции за характерные сутки месяца –  $W_{xc}$  определяется по выражению (2):

$$W_{xc} = \sum_{i=0}^{23} P_{ixc}. \quad (2)$$

Месячная энергия  $W_M$ , соответственно (3):

$$W_M = nW_{xc}. \quad (3)$$

#### Результаты исследования

Используя возможности PVsyst, на основе энергетических характеристик солнечного излучения в течение характерных суток, проведен анализ объемов генерируемой электроэнергии массива фотоэлектрических панелей с заданной установленной мощностью, размещенных определенным образом на местности с фиксированными географическими координатами.

Изменение мощности фотоэлектростанции в течение характерных суток с часовым интервалом дискретизации в сочетании с почасовым электропотреблением позволяет строить имитационные модели режимов работы генерирующего и аккумулирующего оборудования фотоэлектрической системы электроснабжения [18–20].

**Таблица 1.** Инсоляция на горизонтальную поверхность (характерные сутки), Вт/м<sup>2</sup>

**Table 1.** Horizontal irradiation (typical day), W/m<sup>2</sup>

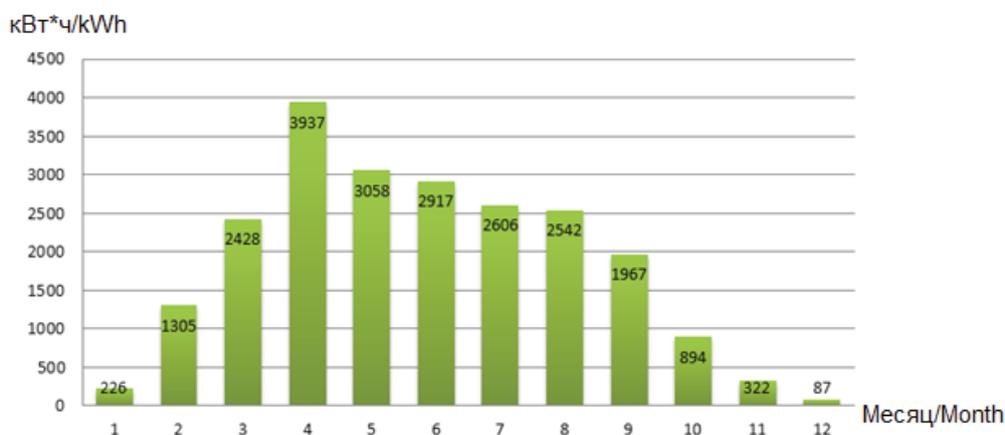
п. Ючугей (метеостанция Верхоянск) /v. Yuchugey (Verkhoyansk weather station)												
Инсоляция на горизонтальную поверхность (характерные сутки), Вт/м <sup>2</sup> /Horizontal solar irradiation (typical day), W/m <sup>2</sup>												
	Янв. Jan.	Фев. Feb.	Март March	Апр. April	Май May	Июнь June	Июль July	Авг. Aug.	Сент. Sep.	Окт. Oct.	Нояб. Nov.	
0:00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,54	19,26	9,97	0,00	0,00	0,00	0,00	
1:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,21	1,98	0,00	0,00	0,00	0,00	
2:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,45	1,41	0,00	0,00	0,00	0,00	
3:00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,21	18,48	6,11	0,00	0,00	0,00	0,00	
4:00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,62	34,05	19,95	0,00	0,00	0,00	0,00	
5:00	0,00	0,00	0,00	0,00	38,15	64,49	49,66	6,32	0,00	0,00	0,00	
6:00	0,00	0,00	0,00	15,76	85,89	118,9	97,33	30,48	0,00	0,00	0,00	
7:00	0,00	0,00	0,00	63,12	155,1	183	170,1	76,18	8,17	0,00	0,00	
8:00	0,00	0,00	16,06	141,25	245,2	258,9	247,5	139,3	39,31	0,00	0,00	
9:00	0,00	0,00	65,23	234,73	317,8	334,7	327,9	200	95,02	13,66	0,00	
10:00	0,00	11,90	136,34	329,47	401	394,1	406,4	268,2	137,7	48,63	0,00	
11:00	0,00	40,51	210,95	409,53	440,8	461,3	450,3	313,8	190,9	90,25	12,94	
12:00	5,63	71,51	272,29	464,19	483,9	489,7	487,8	357,2	242,2	128,90	31,54	
13:00	15,53	107,2	307,98	493,25	513,2	520	506,8	383,2	257,2	146,21	40,59	
14:00	13,92	117,9	318,92	489,49	520,3	543,7	509,5	381,9	274,5	140,50	34,39	
15:00	9,43	101,9	293,41	464,08	497,8	517,8	469,3	380,4	235,1	126,03	21,53	
16:00	2,65	66,95	247,83	407,48	458,7	483,9	417,7	347,1	207,3	86,78	6,60	
17:00	0,00	27,91	175,89	332,11	383,4	417,9	376,7	293,5	160,4	49,61	0,00	
18:00	0,00	5,05	100,65	247,82	311,9	342,8	305,9	227,5	97,47	13,11	0,00	
19:00	0,00	0,00	35,15	155,11	230,9	275,3	218,5	162,5	43,44	0,00	0,00	
20:00	0,00	0,00	3,16	75,06	154,8	199,9	150,7	97,06	9,44	0,00	0,00	
21:00	0,00	0,00	0,00	20,90	90,24	132,9	95,06	49,94	0,00	0,00	0,00	
22:00	0,00	0,00	0,00	0,87	43,60	78,71	53,23	14,20	0,00	0,00	0,00	
23:00	0,00	0,00	0,00	0,00	12,51	41,26	25,17	0,32	0,00	0,00	0,00	
Итого кВт*ч/м <sup>2</sup> день / In total kWh/m <sup>2</sup> *day	0,05	0,55	2,18	4,34	5,40	5,95	5,41	3,73	2,00	0,84	0,15	

Иллюстрация возможностей PVsyst и предлагаемой методики анализа фотоэлектрических систем проведена на примере фотоэлектростанции п. Ючугей (Якутия). Установленная мощность станции 20 кВт. Для ее построения использованы поликристаллические панели, ориентированные на юг и установленные под углом 45° к горизонту.

Данные имитационного моделирования фотопреобразования приведены в табл. 1, где для каждого месяца определены характерные сутки с точ-

ки зрения интегральных значений инсоляции. Статистический подход к моделированию, заложенный в комплексе PVsyst, позволяет косвенно учесть реальную облачность и другие характеристики прозрачности атмосферы.

Расчетная выработка электроэнергии ФЭС п. Ючугей на основе данных инсоляции для характерных суток за каждый месяц приведена в табл. 2. В табл. 1, 2 отсутствуют данные за декабрь, в течение которого на рассматриваемой широте наблюдается полярная ночь.



**Рисунок.** Реальные значения выработки электрической энергии ФЭС п. Ючугей

**Figure.** Actual PV plant electric power generation in Yuchugey village

**Таблица 2.** Расчетная выработка электрической энергии ФЭС, Вт

**Table 2.** Estimated PV plant electricity production, W

п. Ючугей (метеостанция Верхоянск), ФЭС установленной мощностью 20 кВт, угол наклона панелей 45° v. Yuchugey (Verkhoyansk weather station), PV station 20 kWp, tilt 45°											
Энергия выдаваемая в сеть (характерные сутки), Вт/Energy injected to the grid (typical day), W											
	Янв. Jan.	Фев./Feb.	Март- March	Апр. April	Май May	Июнь- June	Июль July	Авг. Aug.	Сент. Sep.	Окт. Oct.	Нояб. Nov
0:00	0	0	0	0	17	191	98	0	0	0	0
1:00	0	0	0	0	0	141	22	0	0	0	0
2:00	0	0	0	0	0	119	13	0	0	0	0
3:00	0	0	0	0	12	176	80	0	0	0	0
4:00	0	0	0	0	135	282	173	0	0	0	0
5:00	0	0	0	0	350	526	427	54	0	0	0
6:00	0	0	0	154	661	929	787	229	0	0	0
7:00	0	0	0	500	1008	1327	1211	547	57	0	0
8:00	0	0	295	2426	3778	3692	3287	1984	702	0	0
9:00	0	0	2697	6754	7054	6495	6356	4346	2978	456	0
10:00	0	727	7093	11232	10282	8748	9232	6804	4925	2852	0
11:00	0	2845	11393	14861	11987	11022	10979	8457	6982	5296	958
12:00	258	5954	14775	17093	13531	12045	12232	9927	8561	7106	3258
13:00	1493	8611	16538	18196	14454	12878	12729	10620	9184	8015	4372
14:00	1212	9505	17107	17872	14658	13617	12737	10642	9728	7975	3487
15:00	503	8358	15720	16899	13886	12828	11428	10524	8209	7219	1761
16:00	60	5613	13335	14544	12408	11549	9851	9389	7329	5020	310
17:00	0	2105	9254	11199	9614	9348	8400	7562	5591	2718	0
18:00	0	159	4852	7316	6836	6719	6029	5201	2961	538	0
19:00	0	0	1040	3104	3753	4164	3383	2794	817	0	0
20:00	0	0	40	546	1239	1475	1274	750	46	0	0
21:00	0	0	0	194	768	925	736	400	0	0	0
22:00	0	0	0	11	409	592	416	114	0	0	0
23:00	0	0	0	0	9	315	180	0	0	0	0
Итого кВт*ч/день/ In total kWh/day	3,53	43,88	114,14	142,90	126,85	120,10	112,06	90,34	68,07	47,19	14,15

Реальные ежемесячные данные выработки электрической энергии фотоэлектрической станцией за 2012 г. в графическом виде представлены на рисунке.

Сравнение расчетных и фактических объемов выработки электроэнергии рассматриваемой фотоэлектростанции представлено в табл. 3.

**Таблица 3.** Сравнение выработки электрической энергии

**Table 3.** Comparison of electricity generation

Месяц Month	Реальные значения Real value	Расчетные значения PVsyst Calculated value	Относительная разница между реальной выработкой и расчетной, % Relative difference between the actual output and the estimated one, %
Янв./Jan.	226	101	55
Фев./Feb.	1305	1135	13
Март/March	2428	3277	35
Апр./April	3937	3953	0,4
Май/May	3058	3609	18
Июнь/June	2917	3285	13
Июль/July	2606	3154	21
Авг./Aug.	2542	2548	0,2
Сент./Sep.	1967	1862	5,3
Окт./Oct.	894	1340	50
Нояб./Nov	322	389	21
Дек./Dec.	87	0	-
Год./Annual	22289	24655	10,6

Расчеты проведены с помощью программного комплекса PVsyst с исходными данными, соответствующими реальным. В табл. 3 приведены объемы ежемесячной фактической выработки ФЭС п. Ючугей, расчетной выработки и относительной разницы между фактическими и расчетными значениями генерируемой электроэнергии за каждый месяц (4):

$$\Delta W_i = \frac{|W_{\Phi i} - W_{pi}|}{W_{pi}} \cdot 100 \%, \quad (4)$$

где  $W_{\Phi i} - W_{pi}$  – фактическая и расчетная электроэнергия за  $i$ -месяц.

Тестирование программного комплекса PVsyst показало, что расчетная погрешность по годовой выработке составляет около 10 %, что вполне приемлемо для оценки потенциала возобновляемых энергоисточников. Следует отметить, что данные о фактической выработке электроэнергии могут содержать ряд погрешностей технического характера, для оценки которых необходимы тщательно организованные наблюдения. В частности, объемы электроэнергии ФЭС автономной системы зависят не только от потенциальных возможностей фотопреобразователей, но и от уровня потребления или аккумуляции генерируемой электроэнергии. Тем не менее, данные коммерческого учета ФЭС п. Ючугей могут рассматриваться как критерий для сравнения с расчетными.

## Заключение

На основании проведенной работы предлагается методика определения энергетического потенциала солнечного излучения, основанная на использовании программного комплекса PVsyst и понятия «характерные сутки» для получения почасовой зависимости мощности солнечного излучения, характерной для каждого месяца года. Данная методика позволяет разумными средствами осуществить

имитационное моделирование работы основных элементов фотоэлектростанции совместно с электрическими нагрузками, представляемыми графиком, обычно имеющим почасовую дискретизацию.

Тестирование данной методики на реальной фотоэлектростанции показало ее приемлемую точность, характеризующую относительной погрешностью около 10 %, по годовой выработке электроэнергии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rajesh Kumar, Gupta R.A., Ajay Kumar Bansal. Economic analysis and power management of a stand-alone wind/photovoltaic hybrid energy system using biogeography based optimization algorithm // Swarm and Evolutionary Computation. – 2013. – V. 8. – P. 33–43.
2. Aggarwal R.K. Estimation of Total Solar Radiation on Tilted Surface // Journal of Environmental Engineering and Technology. – 2013. – V. 2. – P. 4–6.
3. A review of optimum sizing of hybrid PV-Wind renewable energy systems in Oman / Ahmed Said Al Busaidi, Hussein A. Kazem, Abdullah H. Al-Badi, Mohammad Farooq Khan // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2015. – V. 53. – P. 185–193.
4. Amit Kumer Yadav, Chandel S.S. Solar energy potential assessment of western Himalayan Indian state of Himachal Pradesh using J48 algorithm of WEKA in ANN based prediction model // Applied Soft Computing. – 2015. – V. 75. – P. 675–693.
5. Ershad A.M., Brecha R.J., Haliman K. Analysis of solar photovoltaic and wind power potential in Afghanistan // Renewable Energy. – 2016. – V. 85. – P. 445–453.
6. Radosavljevic J., Dordevic A. Defining of the intensity of solar radiation on horizontal and oblique surface Earth // Facta Universitatis. – 2001. – V. 2. – P. 77–86.
7. Photovoltaic Module Modeling using Simulink/Matlab / Krismanidinata, Nasrudin Abd. Rahim, Hew Wooi Ping, Jeyraj Selvaraj // Procedia Environmental Sciences. – 2013. – V. 17. – P. 537–546.
8. Villalva M.G., Gazoli J.R., Filho E.R. Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays // Power Electronics, IEEE Transactions. – 2009. – V. 24. – P. 1198–1208.
9. Effect of Distributed Photovoltaic Generation on the Voltage Magnitude in Self-Contained Power Supply System / B.V. Lukutin, E.B. Shandarova, A.F. Makarova, I.B. Shvartsman // TOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 6 May 2016. – V. 127. – Iss. 1. – Article number 012005.
10. Саврасов Ф.В., Лукутин Б.В. Расчет эффективности использования автономных систем электроснабжения с фотоэлектростанциями в условиях Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 6. – С. 17–21.
11. Дмитриенко В.Н., Лукутин Б.В. Выбор мощности генерирующего оборудования автономной солнечно-дизельной электростанции мегаваттного класса // Фундаментальные исследования – 2015. – № 4. – С. 61–66. URL: <https://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=37124> (дата обращения 24.12.2016).
12. Дмитриенко В.Н., Лукутин Б.В. Солнечно-дизельные системы электроснабжения северных поселков // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3. – URL: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=13070> (дата обращения 24.12.2016).
13. Aeidapu Mahesh, Kanwarjit Singh Sandhu. Hybrid wind/photovoltaic energy system developments: critical review and findings // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2015. – V. 52. – P. 1135–1147.
14. Multi-objective optimization minimizing cost and life cycle emissions of stand-alone PV-wind-diesel systems with batteries storage / R. Duffo-Lopez, J.L. Bernal-Agustin, J.M. Yusta-Loyo, J.A. Dominguez-Navarro, I.J. Ramirez-Rosado, J. Lujano, I. Aso // Applied Energy. – 2011. – V. 88. – P. 4033–4041.
15. Ranjeva M., Kulkarni A.K. Design Optimization of Hybrid, Small, Decentralized Power Plant for Remote/Rural Areas // Energy Procedia. – 2012. – V. 20. – P. 258–270.
16. Программный продукт для проектирования фотоэлектрических систем. URL: <http://www.pvsyst.com/en/software> (дата обращения 24.12.2016).
17. Программный продукт, база метеоданных. URL: <http://www.meteonorm.com/en/downloads> (дата обращения 24.12.2016).
18. Руководящий технический материал РТМ 36.18.32.4–92 Указания по расчету электрических нагрузок. – М.: ВНИПИ ТЯЖПРОМЭЛЕКТРОПРОЕКТ, 1992. – 52 с.
19. Алюнов А.Н. Онлайн Электрик: Интерактивные расчеты систем электроснабжения URL: <http://online-electric.ru> (дата обращения: 24.12.2016).
20. Фролов Ю., Шелякин В. Основы электроснабжения. – СПб.: Изд-во «Лань», 2012. – 480 с.

Поступила 04.04.2017 г.

## Информация об авторах

**Дмитриенко В.Н.**, аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий Энергетического Института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Лукутин Б.В.**, доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий Энергетического Института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 620.97

## METHOD FOR ESTIMATING SOLAR RADIATION ENERGY FOR PHOTOVOLTAIC PLANTS

Vitaliy N. Dmitrienko<sup>1</sup>,  
dvn@sibtehproekt.com

Boris V. Lukutin<sup>1</sup>,  
lukutin48@mail.ru

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

*Relevance of the research is caused by the need for objects autonomous electrification of oil and gas transport system.*

**The aim** of the research is to develop the calculation method for solar energy, used by autonomous photovoltaic plants, which allows increasing the accuracy of insolation modeling in design of autonomous power systems with photovoltaic power. Using the technique will allow simulating effectively all the elements of autonomous photovoltaic plant in a daily cycle with one hour sampling interval.

**Methods.** Method of assessing solar energy is based on the use of software packages: PVsyst, Excel, NASA meteorological data, Meteoronorm.

**Results.** The authors have proposed the method of determining solar radiation energy potential, based on the use of PVsyst software system and the «typical day» concept for obtaining the hour of the solar radiation power typical for each month of the year. This technique has great potential for research specific area solar insolation; in particular it can be used for optimization of elements interaction of autonomous hybrid systems, such as solar-diesel (PV-genset). One hour sampling interval will allow most effectively assessing the extent of solar energy penetration in the total load curve. Based on these results it will be possible to plan in advance the diesel power loading degree, and thus the amount of fuel consumed for the reference period. This in its turn will allow planning the amount of diesel fuel supply to a specific area. Testing this method on a real photovoltaic plant shown its reasonable accuracy, characterized by a 10 % relative error, at annual electricity production.

**Key words:**

Photovoltaic plants, solar irradiance, software system, «typical day», PVsyst, Meteoronorm.

## REFERENCES

- Rajesh Kumar, R.A. Gupta, Ajay Kumar Bansal. Economic analysis and power management of a stand-alone wind/photovoltaic hybrid energy system using biogeography based optimization algorithm. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2013, vol. 8, pp. 33–43.
- Aggarwal R.K. Estimation of Total Solar Radiation on Tilted Surface. *Journal of Environmental Engineering and Technology*, 2013, vol. 2, pp. 4–6.
- Ahmed Said Al Busaidi, Hussein A. Kazem, Abdullah H Al-Badi, Mohammad Farooq Khan. A review of optimum sizing of hybrid PV-Wind renewable energy systems in Oman. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 53, pp. 185–193.
- Amit Kumer Yadav, Chandel S.S. Solar energy potential assessment of western Himalayan Indian state of Himachal Pradesh using J48 algorithm or WEKA in ANN based prediction model. *Applied Soft Computing*, 2015, vol. 75, pp. 675–693.
- Ershad A.M., Brecha R.J., Haliman K. Analysis of solar photovoltaic and wind power potential in Afghanistan. *Renewable Energy*, 2016, vol. 85, pp. 445–453.
- Radosavljevic J., Dordevic A. Defining of the intensity of solar radiation on horizontal and oblique surface Earth. *Facta Universitatis*, 2001, vol. 2, pp. 77–86.
- Krismadinata, Nasrudin Abd. Rahim, Hew Wooi Ping, Jeyraj Selvaraj. Photovoltaic Module Modeling using Simulink/Matlab. *Procedia Environmental Sciences*, 2013, vol. 17, pp. 537–546.
- Villalva M.G., Gazoli J.R., Filho E.R.. Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. *Power Electronics, IEEE Transactions*, 2009, vol. 24, pp. 1198–1208.
- Lukutin B.V., Shandarova E.B., Makarova A.F., Shvartsman I.B. Effect of Distributed Photovoltaic Generation on the Voltage Magnitude in Self-Contained Power Supply System. *TOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 6 May 2016, vol. 127, Iss. 1, Article number 012005.
- Savrasov F.V., Lukutin B.V. The efficiency of calculation of using autonomous power supply systems with photovoltaic power plants in Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 6, pp. 17–21. In Rus.
- Dmitrienko V.N., Lukutin B.V. The choice of capacity of generation equipment in autonomous solar-diesel plant of megawatt class. *Fundamental research*, 2015, no. 4, pp. 61–66. In Rus. Available at: <https://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=37124> (accessed 24 December 2016).
- Dmitrienko V.N., Lukutin B.V. Solar-diesel power systems of the northern settlements. *Modern problems of science and education*, 2014, no. 3. In Rus. Available at: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=13070> (accessed 24 December 2016)
- Aeidapu Mahesh, Kanwarjit Singh Sandhu. Hybrid wind/photovoltaic energy system developments: Critical review and findings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 52, pp. 1135–1147.
- Dufo-Lopez R., Bernal-Agustin J.L., Yusta-Loyo J.M., Dominguez-Navarro J.A., Ramirez-Rosado I.J., Lujano J., Aso I. Multi-objective optimization minimizing cost and life cycle emissions of stand-alone PV-wind-diesel systems with batteries storage. *Applied Energy*, 2011, vol. 88, pp. 4033–4041.
- Ranjiva M., Kulkarni A.K. Design Optimization of Hybrid, Small, Decentralized Power Plant for Remote/Rural Areas. *Energy Procedia*, 2012, vol. 20, pp. 258–270.
- Programny product dlya proektirovaniya Folelectricheskikh sistem [Software for PV system projects]. Available at: <http://www.pvsyst.com/en/software> (accessed 24 December 2016).
- Programny product, bazy meteorodannykh [Software, Meteorodata base]. Available at: <http://www.meteoronorm.com/en/downloads> (accessed 24 December 2016).
- Rukovodnyashchiiy tekhnicheskiiy material RTM 36.18.32.4–92. Ukazaniya po raschetu elektricheskikh nagruzok [Guidance mate-

- rial RTM 36.18.32.4–92. Guidelines for the electrical loads calculation]. Moscow, VNIPI TYAZHPROMELEKTROPROEKT Publ., 1992. 52 p.
19. Alyunov A.N. *Online Electric: Interaktivne raschety sistem elektrosnabzheniya* [Power supply system interactive calculation]. Available at: <http://online-electric.ru> (accessed 24 December 2016).
20. Frolov Yu., Shelakin V. *Osnovy elektrosnabzheniya* [Fundamentals of power supply]. St. Petersburg, Lan Publ. house, 2012. 480 p.

*Received: 4 April 2017.*

#### **Information about the authors**

**Vitaliy N. Dmitrienko**, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University; head of the department, Ltd. SibTehProject.

**Boris V. Lukutin**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 621.313.045:621.315.61

## КОНТРОЛЬ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ПОСЛЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ПРОПИТКИ И СУШКИ

Смирнов Геннадий Васильевич<sup>1</sup>,  
smirnov@main.tusur.ru

Смирнов Дмитрий Геннадьевич<sup>1</sup>,  
smirnov@main.tusur.ru

<sup>1</sup> Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,  
Россия, 634045, г. Томск пр. Ленина, 40.

**Актуальность работы** обусловлена тем, что электрические машины являются одним из самых распространенных видов продукции электротехнической промышленности и применяются в разнообразных отраслях промышленности. Отказ электрической машины приводит к аварийным ситуациям, к простоем оборудования и, как следствие, к высоким экономическим затратам на ликвидацию результатов отказа машины. Особенно ощутимы результаты отказа электрических машин при разведке, добыче и транспортировке георесурсов в нефтедобывающей, горнорудной, угольной, химической и других отраслях промышленности, так как эти отрасли в настоящее время являются основой формирования бюджета страны. Надежность и безотказность работы этих машин в значительной степени определяется операциями пропитки и сушки обмоток, так как на этих операциях формируются важнейшие качественные характеристики обмоток: электроизоляционные, тепловые, влагостойкие и механические. Все эти свойства зависят от степени заполнения межвитковых и прикорпусных полостей обмотки пропиточным составом и от степени его полимеризации (отверждения). В случае недостаточной высушенности (завершенности процесса отверждения компаунда; процессов полимеризации и т. п.) обмоток после пропитки возможно появление дефектов в межвитковой изоляции в период хранения и транспортировки оборудования к месту эксплуатации, что неизбежно приводит к снижению надежности изоляции обмоток. Совершенствование указанных операций невозможно реализовать без надлежащих способов неразрушающего контроля качества проведения этих операций. Поэтому разработка методов контроля качества пропитки и степени отверждения пропиточного состава в обмотках является весьма злободневным.

**Цель работы** показать возможность контроля распределенности пропиточного состава по обмотке и степени его отверждения по результатам измерения ёмкости обмоток относительно магнитного сердечника на двух частотах электромагнитного поля.

**Методы исследования:** электромагнитные, для исследования зависимости диэлектрической проницаемости пропиточного состава от частоты электромагнитного поля и степени его отверждения.

**Результаты.** Рассмотрен ёмкостной способ контроля степени отверждения пропиточного состава в изоляции обмоток электротехнических изделий. Приведены полученные экспериментальным путем графики зависимости диэлектрической проницаемости компаунда КП-34 от частоты электромагнитного поля, снятые при различных степенях высушенности компаунда. Обоснованы физические основы контроля качества пропитки и сушки, и приведен вывод основных критериев оценки качества указанных технологических операций. Приведена схема прибора контроля, и рассмотрен принцип его работы.

### Ключевые слова:

Обмотка, пропиточный состав, степень отверждения, частотная зависимость, диэлектрическая проницаемость, ёмкость, усилитель, синхронный детектор, вычислительный блок.

### Введение

Электрические машины – это один из самых распространенных видов продукции электротехнической промышленности, применяемый во многих сферах деятельности человека. Поэтому надежность этого вида продукции является чрезвычайно важным показателем, так как отказ двигателя приводит к аварийным и часто к опасным для здоровья и жизни людей факторам. Особенно опасны отказы электродвигателей в производствах горнодобывающей, нефтяной, газовой и других производствах сырьевой промышленности [1]. Именно в этой отрасли промышленности электрические машины широко используют в качестве электроприводов бурильных установок [2], шахтных вентиляционных устройств [3], в погружных электроцентробежных насосах при добыче нефти [4], в лебедках и других транспортных средствах [5], где их отказ может привести к возникновению чрезвычайных ситуаций и даже к гибели людей. Самым ненадежным узлом электрической машины является изоляция

обмоток электрических машин [1, 6]. Низкая надежность изоляции обмоток электрических машин во многом зависит от качества изоляции обмоточного провода, от намоточного оборудования и технологии пропитки и сушки обмоток [7–12]. Именно в процессе пропитки обмоток пленкой пропиточного состава скрываются дефекты в витковой, межфазной и корпусной изоляции. При этом качество изоляции пропитанных обмоток зависит не только от того, какое количество пропиточного состава проникло в полости обмоток, и как он распределился по указанным полостям, но также и от того, до какой степени проникший в обмотку пропиточный состав компаундировался. При недосушенной изоляции часть пропиточного состава находится в не отвержденном состоянии, что приводит к повышенной разрушаемости изоляции обмоток при эксплуатации. Если же пересушить пропиточный состав в обмотке, то в изоляции обмоток возникает множество дефектов в виде микротрещин, пор и капилляров, что также приводит к повышению веро-

ятности отказа обмоток при их эксплуатации. Если же пропитка и сушка проведены в оптимальных режимах, то в результате этих операций повышаются не только электроизоляционные свойства обмоток, но и их теплопроводность, влагостойкость, монолитность и другие характеристики, повышающие надежность изоляции обмоток.

Высокие и низкие температуры воздуха оказывают неблагоприятное воздействие на изоляцию обмоток электроприводов, вызывая их старение. Солнечная радиация, действуя на машину, ускоряет процесс естественного старения изоляции обмоток электрических машин. Материалы становятся более ломкими, в них образуются трещины, поэтому снижается механическая прочность и электрическое сопротивление изоляции. Содержание влаги в воздухе ускоряет процесс изнашивания полимерных материалов, снижает электрическую прочность (пробивное напряжение) изоляции обмоток [1]. Процесс проникновения влаги и пыли в обмотки электрических машин усугубляется при плохой пропитке и сушке обмоток, когда степень заполненности межвитковых и прикорпусных полостей пропиточным составом низка. При этом в изоляции обмоток образуются многочисленные поры и капилляры, в которые происходит проникновение и адсорбция влаги и пыли, что приводит к ускоренному старению изоляции обмоток, к значительному повышению вероятности отказа изоляции указанных обмоток [7–14]. Большую опасность представляет недопустимый нагрев обмоток электрических машин, вызываемый длительными перегрузками, ухудшением условий охлаждения электрооборудования, обрывом одной из фаз сети и работой электрооборудования в неполнофазном режиме, отклонениями напряжения выше допустимых пределов, частыми или затянувшимися пусками электродвигателей, а также их опрокидыванием и заклиниванием ротора и др. [1].

Все эти качественные изменения свойств обмотки после пропитки и сушки связаны не только с физическими свойствами, но и с количеством пропиточного состава, проникшего в полости обмотки и оставшегося в них после операции пропитки и сушки, а также с его распределенностью по полостям обмотки и степени его высушенности. Повышение качества изоляции обмоток невозможно осуществить без совершенствования технологии пропитки и сушки. Однако совершенствование этих операций, оперативное устранение технологических причин, приводящих к некачественной пропитке и сушке, невозможно без разработки и внедрения неразрушающих методов контроля качества указанных технологических операций. Результаты, полученные авторами, позволяют минимизировать вероятность выпуска машин с неудовлетворительным качеством пропитки, а именно с не полностью высушенным компаундом с низкой и неравномерной распределенностью по обмотке пропиточного состава.

### Экспериментальная часть

В работах [15–29] рассмотрены вопросы, связанные с контролем качества пропитки корпусной изоляции обмоток по ёмкости обмоток относительно магнитного сердечника. Недостатком такого контроля является невозможность определить, как распределится пропиточный состав по фазам обмотки, обычно соединенным звездой, и до какой степени этот состав высушен.

В настоящее время контроль степени высыхания лакокрасочных материалов осуществляют по ГОСТ 19007–73 [30]. В соответствии с указанным документом выделяют 7 степеней высыхания, а контроль производят на специально подготовленных плоских образцах лакокрасочного материала. Недостатком такого контроля является его применение только на плоских, специально приготовленных образцах контролируемого лакокрасочного материала.

Целью настоящей работы является показать возможность контроля распределенности пропиточного состава по фазам обмотки и степени его отверждения по результатам измерения ёмкости обмоток относительно магнитного сердечника на двух частотах электромагнитного поля.

Диэлектрическая проницаемость образцов пропиточного изоляционного состава измерялась при температуре 20 °С на трехэлектродной ячейке по ГОСТ 6433.4–71 с помощью цифрового измерителя ёмкости Е8–4 (рис. 1, а). Как следует из рис. 1, а, частотные зависимости пропиточного состава имеют две характерные области: область (А), в которой наблюдается явно выраженная зависимость диэлектрической проницаемости от частоты, и область (Б), где зависимость диэлектрической проницаемости от частоты электромагнитного поля практически отсутствует. Область (А) условно называется дисперсионной, а область (Б) – оптической. При отверждении (сушке) компаундов частотная зависимость диэлектрической проницаемости выглаживается, а затем практически исчезает. Если выбрать две частоты измерения диэлектрической проницаемости пропиточного состава, одна из которых  $f_1$  лежит в дисперсионной области, а другая частота  $f_2$  – в оптической области, то, используя зависимости, приведенные на рис. 1, а, можно представить график зависимости степени высушенности пропиточного состава от отношения (К) логарифмов диэлектрических проницаемостей  $K = \frac{\lg \varepsilon_{nc}(f_2)}{\lg \varepsilon_{nc}(f_1)}$  на выбранных частотах  $f_2$

и  $f_1$  соответственно (рис. 1, б).

При этом если каким-то образом в контролируемой обмотке измерить диэлектрические проницаемости на выбранных частотах, то можно, используя график, представленный на рис. 1, б, определить степень высушенности пропиточной изоляции в упомянутой контролируемой обмотке.

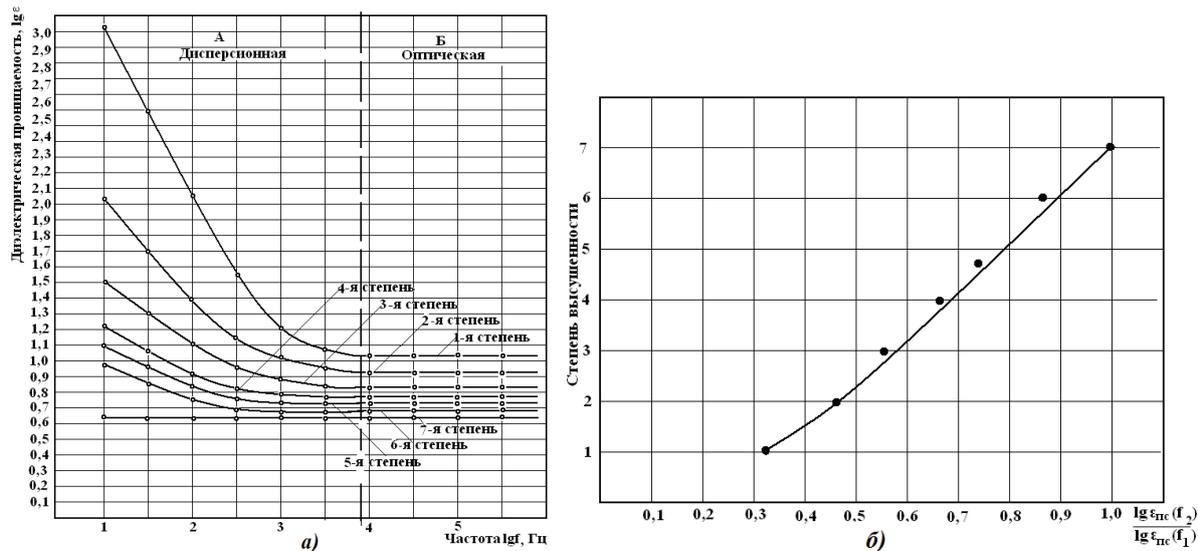


Рис. 1. Частотные зависимости диэлектрической проницаемости компаунда КР-34 (а) и зависимость степени его высушенности от отношения логарифмов диэлектрических проницаемостей, измеренных на двух частотах (б)

Fig. 1. Frequency dependence of dielectric constant of the compound KP-34 (a) and dependence of its dryness degree on ratio of dielectric permittivity logarithms measured at two frequencies (b)

### Теоретическая часть

Рассмотрим, как найти отношение  $K$  в контролируемой обмотке и по нему определить степень высушенности обмотки. Условно обмотку электротехнического изделия до пропитки можно представить в виде слоистого анизотропного тела (рис. 2, А), состоящего из медного провода – 1, эмалевой изоляции – 2, межвитковых воздушных полостей – 3, корпусной изоляции – 4, прикорпусных воздушных полостей – 5. Обмотка всыпана в пазы массивного стального сердечника – 6.

Обмотку после пропитки и сушки также можно представить в виде анизотропного слоистого тела (рис. 2, Б). На рис. 2, Б введены те же обозначения, что и на рис. 2, А, только воздушные полости – 3 и 5 (рис. 2, А) обозначены цифрами 7 и 8, так как эти полости после пропитки и сушки заполнены пропиточным составом. Так как толщина  $d_2$  эмалевой изоляции провода – 2, толщина  $d_4$  корпусной изоляции – 4 и суммарная толщина  $d_3$  воздушных полостей – 3 и 5 между поверхностью обмотки и поверхностью паза пренебрежительно малы и составляют несколько микрон, то емкость обмотки относительно корпуса можно с пренебрежительно малой погрешностью представить в виде слоистого плоского конденсатора.

Покажем, как по измерениям ёмкостей двух фаз обмотки относительно корпуса до пропитки и после неё можно определить степень высушенности пропиточной изоляции обмотки и коэффициенты пропитки каждой из фаз обмотки.

Введем следующие величины:  $C_{дн12}(f_1)$ ,  $C_{дн13}(f_1)$ ,  $C_{дн23}(f_1)$  – ёмкости относительно магнитного сердечника (корпуса) двух фаз непропитанной обмотки, измеренные на частоте электромагнитного поля  $f_1$ ;  $C_{дн12}(f_2)$ ,  $C_{дн13}(f_2)$ ,  $C_{дн23}(f_2)$  – ёмкости относительно маг-

нитного сердечника (корпуса) двух фаз непропитанной обмотки, измеренные на частоте электромагнитного поля  $f_2$ ;  $C_{мн12}(f_1)$ ,  $C_{мн13}(f_1)$ ,  $C_{мн23}(f_1)$  – ёмкости относительно магнитного сердечника (корпуса) двух фаз пропитанной обмотки, измеренные на частоте электромагнитного поля  $f_1$ ;  $C_{мн12}(f_2)$ ,  $C_{мн13}(f_2)$ ,  $C_{мн23}(f_2)$  – ёмкости относительно магнитного сердечника (корпуса) двух фаз пропитанной обмотки, измеренные на частоте электромагнитного поля  $f_2$ .

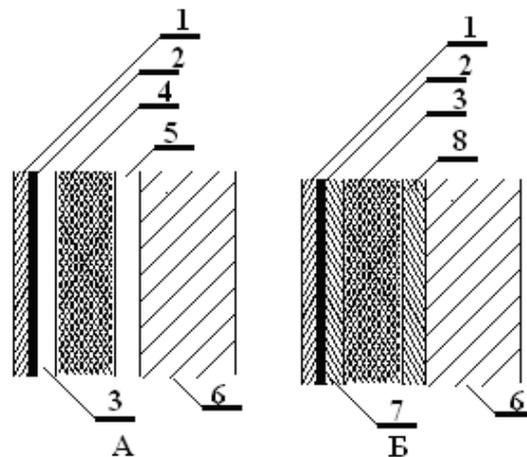


Рис. 2. Представление обмотки в виде анизотропного слоистого тела: 1 – жила провода; 2 – эмалевая изоляция; 3 – воздушные полости между обмоткой и корпусной изоляцией; 4 – корпусная изоляция; 5 – прикорпусные воздушные полости; 6 – магнитный сердечник; 7 и 8 – пропиточный состав

Fig. 2. Representation of the winding in the form of anisotropic laminated body: 1 is the wire strand; 2 is the enamel insulation; 3 is the air cavity between the winding and ground insulation; 4 is the ground insulation; 5 is the air cavity; 6 is the magnetic core; 7 and 8 is the compound

Рассмотрим сущность предлагаемого способа контроля качества пропитки обмоток электрических машин и степени отверждения пропиточного состава после сушки обмоток, используя любые две фазы обмотки. Введём индексы номеров фаз обмотки  $k$  и  $j$ , позволяющие сократить описание, рассматривая в обобщенном виде все сочетания двух фаз обмотки (1–2, 1–3, 2–3) в одном выражении, не прибегая к дублированию формул, запись которых аналогична для любых двух фаз, а отличие их состоит только в сочетании номеров фаз.

Если до пропитки измерить ёмкость  $C_{дн12}(f_1)$  двух фаз обмотки относительно магнитного сердечника на частоте  $f_1$ , то в соответствии с рис. 2 эту ёмкость можно представить в виде суммы трех емкостей, соединенных последовательно

$$\frac{1}{C_{дн12}(f_1)} = \frac{1}{C_а(f_1)} + \frac{1}{C_к(f_1)} + \frac{1}{C_в}, \quad (1)$$

где  $C_а(f_1)$  – ёмкость слоя эмалевой изоляции провода на частоте  $f_1$ ;  $C_к(f_1)$  – ёмкость слоя корпусной изоляции на частоте  $f_1$ ;  $C_в(f_1)$  – суммарные ёмкости воздушных слоев 5 и 6 (рис. 2, А).

В общем случае диэлектрическая проницаемость эмалевой и корпусной изоляции может иметь зависимость от частоты. Поэтому обозначим диэлектрические проницаемости эмалевой и корпусной изоляции на частоте  $f_1$  соответственно  $\varepsilon_а(f_1)$  и  $\varepsilon_к(f_1)$ .

С учетом введенных обозначений для плоского конденсатора можно записать

$$C_а(f_1) = \frac{2}{3} p \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_а(f_1) S}{d_а}, \quad (2)$$

$$C_к = \frac{2}{3} p \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_к(f_1) S}{d_к}, \quad (3)$$

$$C_в = \frac{2}{3} p \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_в S}{d_{в12}}, \quad (4)$$

где  $p$  – количество пазов в магнитном сердечнике статора;  $\frac{2}{3} p$  – количество пазов в магнитном сердечнике статора, в которые всыпана контролируемая обмотка  $\varepsilon_в$  – диэлектрическая проницаемость воздуха,  $\varepsilon_0=8,854187817 \cdot 10^{-12}$  электрическая постоянная;  $C_в$  – суммарная ёмкость воздушных слоев 5 и 6 (рис. 2). Подставив выражения (2)–(4) в формулу (1) и учитывая, что диэлектрическая проницаемость воздуха  $\varepsilon_а=1$ , можно записать

$$\frac{1}{C_{днkj}(f_1)} = \frac{3d_а}{2p\varepsilon_а(f_1)\varepsilon_0S} + \frac{3d_к}{2p\varepsilon_0\varepsilon_к(f_1)S} + \frac{3d_в}{2p\varepsilon_0S}, \quad (5)$$

Из выражения (5) следует

$$d_в = \frac{2}{3} p S \varepsilon_0 \times \left[ \frac{1}{C_{днkj}(f_1)} - \frac{3d_а}{2p\varepsilon_0\varepsilon_а(f_1)S} - \frac{3d_к}{2p\varepsilon_0\varepsilon_к(f_1)S} \right] = \frac{\left( 2pS\varepsilon_0\varepsilon_а(f_1)\varepsilon_к(f_1) - \left[ -3C_{днkj}(f_1)[d_а\varepsilon_к(f_1) + d_к\varepsilon_а(f_1)] \right] \right)}{3\varepsilon_а(f_1)\varepsilon_к(f_1)C_{днkj}(f_1)}. \quad (6)$$

После пропитки и сушки обмоток объемы полостей 5 и 6 частично заполняются пропиточным составом, имеющим измеренную на частоте  $f_1$  диэлектрическую проницаемость  $\varepsilon_н(f_1)$  (рис. 1, Б). Так как пропиточный состав не полностью заполняет объемы полостей 8 и 9, а статистически распределен по этим полостям, то в упомянутых полостях образуется бинарная статистическая смесь, состоящая из частиц пропиточного состава и частиц воздуха, с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon^*(f_1)$ . Диэлектрическая проницаемость бинарной смеси  $\varepsilon^*(f_1)$  подчиняется распределению Лихтенеккера–Ротера [5], в соответствии с которым можно записать

$$\ln \varepsilon^*(f_1) = \frac{V_{пckj}}{V_0} \ln \varepsilon_и(f_1) + \frac{V_0 - V_{пckj}}{V_0} \ln \varepsilon_в, \quad (7)$$

где  $V_0$  – объем полостей 5 и 6 в двух фазах обмотки (рис. 2, А);  $V_{пckj}$  – объем в двух фазах  $kj$  обмотки, который занимают частицы пропиточного состава в слоях 8 и 9;  $V_0 - V_{пckj}$  – объем воздуха в слоях 8 и 9;  $\varepsilon_и(f_1)$  – диэлектрическая проницаемость статистической смеси в слоях 8 и 9.

Учитывая, что диэлектрическая проницаемость воздуха  $\varepsilon_а=1$ , а  $\ln \varepsilon_а=0$ , выражение (7) можно записать в виде

$$\ln \varepsilon^*(f_1) = \frac{V_{пckj}}{V_0} \ln \varepsilon_н(f_1) = K_{пckj} \ln \varepsilon_н(f_1). \quad (8)$$

В выражении (8) отношение  $\frac{V_{пckj}}{V_0}$  есть не что иное,

как коэффициент пропитки  $K_{пckj}$  объёмов полостей 8 и 9 двух фаз обмотки, характеризующий степень заполнения объёма полостей  $V_0$  пропиточным составом.

Если после пропитки и сушки измерить на частоте  $f_1$  ёмкость у той же контролируемой части обмотки относительно корпуса  $C_{пckj}(f_1)$  и учесть, что пропиточный состав, диэлектрическая проницаемость которого  $\varepsilon_н(f_1)$  статистически распределится по объёмам полостей 8 и 9 (рис. 2, Б), то ёмкость  $C_{пckj}(f_1)$  слоев 8 и 9 можно представить выражением

$$C_{пckj}(f_1) = \frac{2}{3} p \frac{\varepsilon_0 \varepsilon^*(f_1) S}{d_в}. \quad (9)$$

Подставив в уравнение (5) вместо  $C_в$  величину  $C_{пckj}(f_1)$  (9), можно записать выражение для ёмкости двух фаз обмотки относительно корпуса после пропитки и сушки  $C_{пckj}(f_1)$  в виде

$$\frac{1}{C_{пckj}(f_1)} = \frac{3d_а}{2p\varepsilon_0\varepsilon_а(f_1)S} + \frac{3d_к}{2p\varepsilon_0\varepsilon_к(f_1)S} + \frac{3d_в}{2p\varepsilon_0\varepsilon^*(f_1)S}. \quad (10)$$

Из соотношения (10) найдем выражение для величины зазора  $d_в$

$$d_в = \varepsilon^*(f_1) \times \left[ \frac{2pS\varepsilon_0\varepsilon_а(f_1)\varepsilon_к(f_1) - \left[ -3C_{пckj}(f_1)[d_а\varepsilon_к(f_1) + d_к\varepsilon_а(f_1)] \right]}{3\varepsilon_а(f_1)\varepsilon_к(f_1)C_{пckj}(f_1)} \right]. \quad (11)$$

Так как после пропитки и сушки зазоры 8 и 9 (рис. 2, Б) в контролируемой части обмотки не изменились и остались равны зазорам 5 и 6 (рис. 2, А) в непропитанной обмотке, то, приравняв правую часть выражения (6) к правой части выражения (11), получим

$$\varepsilon^*(f_1) \times \left[ \frac{\left( 2pS\varepsilon_0\varepsilon_9(f_1)\varepsilon_{\kappa}(f_1) - 3C_{\text{ппк}j}(f_1)[d_9\varepsilon_{\kappa}(f_1) + d_{\kappa}\varepsilon_9(f_1)] \right)}{3\varepsilon_9(f_1)\varepsilon_{\kappa}(f_1)C_{\text{ппк}j}(f_1)} \right] = \frac{\left( 2pS\varepsilon_0\varepsilon_9(f_1)\varepsilon_{\kappa}(f_1) - 3C_{\text{дпк}j}[d_9\varepsilon_{\kappa}(f_1) + d_{\kappa}\varepsilon_9(f_1)] \right)}{3\varepsilon_9(f_1)\varepsilon_{\kappa}(f_1)C_{\text{дпк}j}(f_1)}. \quad (12)$$

Преобразовав полученное выражение, запишем

$$\varepsilon^*(f_1) = \frac{C_{\text{ппк}j}(f_1)[C_{\text{эКВ}}(f_1) - C_{\text{дпк}j}(f_1)]}{C_{\text{дпк}j}(f_1)[C_{\text{эКВ}}(f_1) - C_{\text{ппк}j}(f_1)]}, \quad (13)$$

где

$$C_{\text{эКВ}}(f_1) = \frac{2pS\varepsilon_0\varepsilon_9(f_1)\varepsilon_{\kappa}(f_1)}{3[d_9\varepsilon_{\kappa}(f_1) + d_{\kappa}\varepsilon_9(f_1)]} \quad (14)$$

– эквивалентная емкость последовательно соединенных емкостей эмалевой и корпусной изоляции двух фаз обмотки на частоте  $f_1$ .

Выразим из соотношения (8) коэффициент пропитки  $K_{\text{ппк}j}$  и получим

$$K_{\text{ппк}j} = \frac{\ln \varepsilon^*(f_1)}{\ln \varepsilon_{\text{пс}}(f_1)}. \quad (15)$$

Подставив в выражение (15) значение  $\varepsilon^*(f_1)$  из соотношения (13), получим

$$K_{\text{ппк}j} = \frac{1}{\ln \varepsilon_{\text{пс}}(f_1)} \times \ln \frac{C_{\text{ппк}j}(f_1)[C_{\text{эКВ}}(f_1) - C_{\text{дпк}j}(f_1)]}{C_{\text{дпк}j}(f_1)[C_{\text{эКВ}}(f_1) - C_{\text{ппк}j}(f_1)]}, \quad (16)$$

где  $C_{\text{эКВ}}(f_1)$  определяется по формуле (14).

Произведя аналогичные преобразования для емкостей контролируемой обмотки на частоте электромагнитного поля  $f_2$ , можно показать, что

$$K_{\text{ппк}j} = \frac{1}{\ln \varepsilon_{\text{пс}}(f_2)} \times \ln \frac{C_{\text{ппк}j}(f_2)[C_{\text{эКВ}}(f_2) - C_{\text{дпк}j}(f_2)]}{C_{\text{дпк}j}(f_2)[C_{\text{эКВ}}(f_2) - C_{\text{ппк}j}(f_2)]}. \quad (17)$$

Любую из формул (16) или (17) можно использовать для определения коэффициента пропитки  $K_{\text{ппк}j}$  двух фаз  $kj$  обмотки при условии, что в этих формулах известна величина  $\ln \varepsilon_{\text{пс}}(f_1)$  или величина  $\ln \varepsilon_{\text{пс}}(f_2)$ . В реальности же ни одна из этих величин не известна, и их нужно определить, используя только значения тех величин, которые могут быть измерены в реальной обмотке, а именно емкости двух фаз обмотки относительно корпуса, измеренные на частотах  $f_1$  или  $f_2$ .

Рассмотрим, как можно определить хотя бы одну, или обе указанные величины  $\ln \varepsilon_{\text{пс}}(f_1)$ ,  $\ln \varepsilon_{\text{пс}}(f_2)$ .

Так как значение коэффициента пропитки должно оставаться неизменным, независимо от того на какой частоте производились измерения соответствующих параметров обмотки, то можно приравнять правые и левые части выражений (16) и (17). Тогда получим:

$$\frac{1}{\ln \varepsilon_{\text{пс}}(f_1)} \ln \frac{C_{\text{ппк}j}(f_1)[C_{\text{эКВ}}(f_1) - C_{\text{дпк}j}(f_1)]}{C_{\text{дпк}j}(f_1)[C_{\text{эКВ}}(f_1) - C_{\text{ппк}j}(f_1)]} = \frac{1}{\ln \varepsilon_{\text{пс}}(f_2)} \ln \frac{C_{\text{ппк}j}(f_2)[C_{\text{эКВ}}(f_2) - C_{\text{дпк}j}(f_2)]}{C_{\text{дпк}j}(f_2)[C_{\text{эКВ}}(f_2) - C_{\text{ппк}j}(f_2)]}. \quad (18)$$

Из формулы (18) следует

$$\frac{\ln \varepsilon_{\text{пс}}(f_2)}{\ln \varepsilon_{\text{пс}}(f_1)} \times \left\{ \begin{aligned} & \ln C_{\text{ппк}j}(f_1) + \ln C_{\text{эКВ}}(f_1) - C_{\text{дпк}j}(f_1) - \\ & \ln C_{\text{дпк}j}(f_1) - \ln C_{\text{эКВ}}(f_1) - \tilde{N}_{\text{ппк}j}(f_1) \end{aligned} \right\} = \left\{ \begin{aligned} & \ln C_{\text{ппк}j}(f_2) + \ln C_{\text{эКВ}}(f_2) - C_{\text{дпк}j}(f_2) - \\ & \ln C_{\text{дпк}j}(f_2) - \ln C_{\text{эКВ}}(f_2) - C_{\text{ппк}j}(f_2) \end{aligned} \right\}. \quad (19)$$

Так как натуральный логарифм связан с десятичным логарифмом соотношением

$$\ln N = a \cdot \lg N, \quad (20)$$

где  $a \approx 2,30259$  – постоянная величина, то справедливо равенство

$$K = \frac{\ln \varepsilon_{\text{пс}}(f_2)}{\ln \varepsilon_{\text{пс}}(f_1)} = \frac{\lg \varepsilon_{\text{пс}}(f_2)}{\lg \varepsilon_{\text{пс}}(f_1)}, \quad (21)$$

где  $K$  – коэффициент, определяющий степень высушенности (компаундирования) пропиточного состава в обмотке.

Выразим из формулы (19) с учетом формулы

$$(21) \text{ отношение } \frac{\lg \varepsilon_{\text{пс}}(f_2)}{\lg \varepsilon_{\text{пс}}(f_1)} \quad K = \frac{\lg \varepsilon_{\text{пс}}(f_2)}{\lg \varepsilon_{\text{пс}}(f_1)} =$$

$$\frac{\left( \ln C_{\text{ппк}j}(f_2) + \ln [C_{\text{эКВ}}(f_2) - C_{\text{дпк}j}(f_2)] - \right.}{\left. - \ln C_{\text{дпк}j}(f_2) - \ln [C_{\text{эКВ}}(f_2) - C_{\text{ппк}j}(f_2)] \right)} = \frac{\left( \ln C_{\text{ппк}j}(f_1) + \ln [C_{\text{эКВ}}(f_1) - C_{\text{дпк}j}(f_1)] - \right.}{\left. - \ln C_{\text{дпк}j}(f_1) - \ln [C_{\text{эКВ}}(f_1) - C_{\text{ппк}j}(f_1)] \right)}. \quad (22)$$

Таким образом, измерив ёмкость контролируемой части обмотки относительно корпуса на двух выбранных частотах  $f_1$  и  $f_2$  до пропитки  $C_{\text{дпк}j}(f_1)$ ,  $C_{\text{дпк}j}(f_2)$  и после пропитки и сушки  $C_{\text{ппк}j}(f_1)$ ,  $C_{\text{ппк}j}(f_2)$ , а также значения диэлектрических проницаемостей эмалевой  $\varepsilon_9(f_1)$ ,  $\varepsilon_9(f_2)$  и корпусной изоляции  $\varepsilon_{\kappa}(f_1)$ ,  $\varepsilon_{\kappa}(f_2)$  на тех же упомянутых частотах  $f_1$  и  $f_2$  и вычислив из конструктивных обмоточных данных величины  $C_{\text{эКВ}}(f_1)$  и  $C_{\text{эКВ}}(f_2)$ , можно рассчитать по выражению (22) отношение  $K = \frac{\lg \varepsilon_{\text{пс}}(f_2)}{\lg \varepsilon_{\text{пс}}(f_1)}$  и по графику, приведенному на рис. 4, определить степень высушенности каждой контролируемой обмотки.

Следует отметить, что при контроле любых однопольных обмоток величины  $\varepsilon_o(f_1)$ ,  $\varepsilon_o(f_2)$ ,  $\varepsilon_k(f_1)$ ,  $\varepsilon_k(f_2)$  измеряются лишь один раз на тех же упомянутых частотах  $f_1$  и  $f_2$ , и также один раз рассчитываются из конструктивных обмоточных данных величины  $C_{\text{эвк}}(f_1)$  или  $C_{\text{эвк}}(f_2)$ . После этого у всех контролируемых обмоток измеряются ёмкости двух фаз относительно корпуса на двух выбранных частотах до пропитки и после неё, и затем, используя соотношение (22) и график, приведенный на рис. 1, определяют степень высушенности пропиточного состава в каждой контролируемой обмотке.

После определения степени  $K$  высушенности пропиточного состава по графикам, представленным на рис. 1, определяют величины  $\lg \varepsilon_{\text{nc}}(f_1)$  и  $\lg \varepsilon_{\text{nc}}(f_2)$ , и по формуле (21) вычисляют величины  $\ln \varepsilon_{\text{nc}}(f_1)$  и  $\ln \varepsilon_{\text{nc}}(f_2)$ . После этого, используя любую из формул – (16) или (17), подставив в неё соответствующие значения  $\ln \varepsilon_{\text{nc}}(f_1)$  или  $\ln \varepsilon_{\text{nc}}(f_2)$ , а также соответствующие значения ёмкостей относительно корпуса двух фаз обмотки, измеренных до пропитки и после пропитки и сушки, соответственно на частоте  $f_1$  или частоте  $f_2$ , можно определить реальное значение коэффициента пропитки упомянутых двух фаз обмотки.

Если значения диэлектрических проницаемостей эмалевого и корпусной изоляции на двух выбранных частотах  $f_1$  и  $f_2$  одинаковы, т. е.  $\varepsilon_o(f_1)=\varepsilon_o(f_2)=\varepsilon_o$ ,  $\varepsilon_k(f_1)=\varepsilon_k(f_2)=\varepsilon_k$ , что наиболее часто распространено на практике, тогда также равны друг другу величины ёмкости обмоток относительно корпуса до пропитки, измеренные на упомянутых частотах  $C_{\text{дп12}}(f_1)=C_{\text{дп12}}(f_2)=C_{\text{дп12}}$ , и величины  $C_{\text{эвк}}(f_1)=C_{\text{эвк}}(f_2)=C_{\text{эвк}}$ .

В этом случае отпадает необходимость измерять ёмкость каждой контролируемой обмотки до пропитки дважды на каждой из выбранных частот  $f_1$  и  $f_2$ , а достаточно измерить упомянутую ёмкость только на одной из выбранных частот. При равенстве  $\varepsilon_o(f_1)=\varepsilon_o(f_2)=\varepsilon_o$ ,  $\varepsilon_k(f_1)=\varepsilon_k(f_2)=\varepsilon_k$  существенно упрощается и формула (22), которую можно записать в виде:

$$K = \frac{\lg \varepsilon_{\text{nc}}(f_2)}{\lg \varepsilon_{\text{nc}}(f_1)} = \frac{\left( \ln C_{\text{пнкj}}(f_2) + \ln(C_{\text{эвк}} - C_{\text{дпkj}}) - \right.}{\left. - \ln C_{\text{дпkj}} - \ln[C_{\text{эвк}} - C_{\text{пнкj}}(f_2)] \right)} = \frac{\left( \ln C_{\text{пнкj}}(f_1) + \ln(C_{\text{эвк}} - C_{\text{дпkj}}) - \right.}{\left. - \ln C_{\text{дпkj}} - \ln[C_{\text{эвк}} - C_{\text{пнкj}}(f_1)] \right)} = \frac{\ln C_{\text{пнкj}}(f_2) - \ln[C_{\text{эвк}} - C_{\text{пнкj}}(f_2)] + A}{\ln C_{\text{пнкj}}(f_1) - \ln[C_{\text{эвк}} - C_{\text{пнкj}}(f_1)] + A}, \quad (23)$$

где  $A = \ln(C_{\text{эвк}} - C_{\text{дпkj}}) - \ln C_{\text{дпkj}} = \ln \frac{C_{\text{эвк}} - C_{\text{дпkj}}}{C_{\text{дпkj}}}$ .

Формулы (16) и (17) могут быть записаны в виде

$$K_{\text{пнкj}} = \frac{1}{\ln \varepsilon_{\text{nc}}(f_1)} \ln \frac{C_{\text{пнкj}}(f_1)[C_{\text{эвк}} - C_{\text{дпkj}}]}{C_{\text{дпkj}}[C_{\text{эвк}} - C_{\text{пнкj}}(f_1)]}. \quad (24)$$

Произведя аналогичные преобразования для ёмкостей контролируемой обмотки на частоте электромагнитного поля  $f_2$ , можно показать, что

$$K_{\text{пнкj}} = \frac{1}{\ln \varepsilon_{\text{nc}}(f_1)} \ln \frac{C_{\text{пнкj}}(f_2)[C_{\text{эвк}} - C_{\text{дпkj}}]}{C_{\text{дпkj}}[C_{\text{эвк}} - C_{\text{пнкj}}(f_2)]}. \quad (25)$$

Заменив в вышеприведенных формулах индексы  $kj$  на конкретные номера фаз, можно определить коэффициенты пропитки любых двух фаз обмотки  $K_{\text{пр12}}$ ,  $K_{\text{пр13}}$ ,  $K_{\text{пр23}}$ .

Коэффициенты пропитки  $K_{\text{пр12}}$ ,  $K_{\text{пр13}}$ ,  $K_{\text{пр23}}$  являются среднестатистической характеристикой пропитки соответствующих двух фаз, и их величины можно определить из выражений:

$$K_{\text{пр12}} = \frac{K_{\text{пр1}} + K_{\text{пр2}}}{2}, \quad (26)$$

$$K_{\text{пр13}} = \frac{K_{\text{пр1}} + K_{\text{пр3}}}{2}, \quad (27)$$

$$K_{\text{пр23}} = \frac{K_{\text{пр2}} + K_{\text{пр3}}}{2}, \quad (28)$$

где  $K_{\text{пр1}}$ ,  $K_{\text{пр2}}$ ,  $K_{\text{пр3}}$  – коэффициенты пропитки фаз 1, 2 и 3.

Решив систему уравнений (26)–(28) относительно коэффициентов пропитки фаз  $K_{\text{пр1}}$ ,  $K_{\text{пр2}}$ ,  $K_{\text{пр3}}$ , получим

$$K_{\text{пр1}} = K_{\text{пр12}} - K_{\text{пр23}} + K_{\text{пр13}}, \quad (29)$$

$$K_{\text{пр2}} = K_{\text{пр23}} - K_{\text{пр13}} + K_{\text{пр12}}, \quad (30)$$

$$K_{\text{пр3}} = K_{\text{пр13}} - K_{\text{пр12}} + K_{\text{пр23}}. \quad (31)$$

### Практическая реализация результатов

На рис. 3 приведена функциональная электрическая схема устройства для определения степени высушенности пропиточного состава по коэффициенту  $K$  в обмотках электродвигателя, реализующего предлагаемый способ и эпюры напряжений, поясняющие работу устройства. Устройство для определения коэффициента пропитки обмоток электрических машин (рис. 3, А), содержит: двухчастотный генератор – 1, измерительный усилитель – 2, синхронный детектор – 3, аналого-цифровой преобразователь – 4, преобразователь – 5 двоичного кода в двоично-десятичный последовательно-параллельный код, блок сопряжения – 6, вычислительный блок – 7, блок управления – 8. К первому выходу генератора – 1 подключена обмотка – 9 контролируемого изделия, корпус которого соединен с входом – 3 измерительного усилителя – 2.

Второй выход генератора – 1 соединен с управляющим входом синхронного детектора – 3. Измерительный усилитель – 2 соединен с входом синхронного детектора – 3, который соединен с АЦП – 4. Выход АЦП – 4 подключён к преобразователю – 5 двоичного кода в двоично-десятичный последовательно-параллельный код. Выход преобразователя – 5 соединен с блоком сопряжения – 6, выход – 4 которого соединен с входом блока упра-

вления – 8. Информационный выход блока сопряжения – 6 соединен с входом вычислительного блока – 7. Выходы блока управления – 8 подключены к входу генератора – 1 и ко второму входу аналого-цифрового преобразователя соответственно. Устройство работает следующим образом. Нажимают кнопку «Пуск» и напряжение треугольной формы с частотой, например 100 Гц (рис. 3, эпюра *a*), лежащей в дисперсионной области, формируемое двухчастотным генератором – 1, поступает через испытываемую емкость  $C_x$  между статором и обмоткой на усилитель тока – 2. В усилителе – 2 напряжение в результате дифференцирования приобретает форму прямоугольного импульса с амплитудой, пропорциональной емкости  $C_x$  (рис. 3, эпюра *б*). Сформированный импульс далее через синхронный детектор – 3 поступает на АЦП – 4, где происходит преобразование напряжения в двоичный параллельный код, который поступает на вход преобразователя – 5. В преобразователе – 5 осуществляется преобразование двоичного кода в двоично-десятичный последовательно-параллельный код, который, в свою очередь, преобразуется в последовательный десятичный код в блоке сопряжения – 6 и вводится в память вычислительного блока – 7.

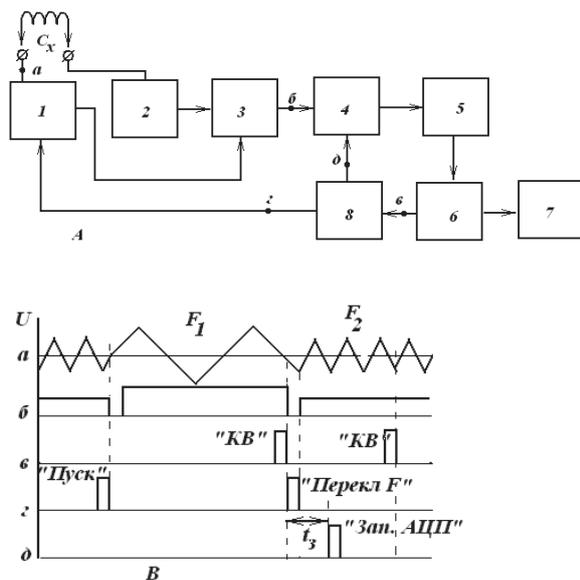


Рис. 3. Функциональная электрическая схема устройства контроля коэффициента пропитки (А) и эпюры (В)

Fig. 3. Functional electric diagram of the device for controlling the coefficient of impregnation (А) and plot (В)

По окончании ввода блок сопряжения вырабатывает сигнал «Конец ввода» («КВ») (рис. 3, эпюра В), который поступает в блок управления – 8, где формируются два сигнала (рис. 3, эпюры *г* и *д*), разрешающие повторное измерение  $C_x$  на частоте, лежащей в оптической области, например, 5000 Гц, и запись в память. По результату измерений  $C_{дп1}$ ,  $C_{дп2}$ ,  $C_{мп1}$ ,  $C_{мп2}$ , введенных в память вычислительного блока – 7 автоматически вычисляется не только коэффициент пропитки корпусных по-

лостей обмотки, коэффициент пропитки в соответствии с выражениями (7) или (8), но и определяется степень отверждения пропиточного состава по выражению (12).

По предлагаемому способу осуществлялся контроль пропитки в фазах пропитанной обмотки статоров двигателя типа 4АИР112М [31, 32]. Обмотка статора, соединенная звездой, пропитывалась струйным методом компаундом КП-34 и после пропитки сушились.

Предварительно перед контролем подготавливали партию образцов компаунда КП-4 по ГОСТ 19007–73 с различными, отличающимися от образца к образцу, степенями высушенности, и у каждого из упомянутых образцов снимали зависимость диэлектрической проницаемости от частоты электромагнитного поля. Снятые зависимости приведены на рис. 1, *a*. Выбирали две частоты измерения:  $f_1=1000$  Гц, лежащую в дисперсионной области частотной зависимости компаунда КП-34,  $f_2=10$  кГц в оптической области не отвержденного изоляционного пропиточного состава КП-34. Затем, после выбора двух частоты измерения, используя снятые для образцов частотные зависимости, строили график зависимости (рис. 1, *б*) степени высушенности пропиточного компаунда КП-34 от отношения диэлектрических проницаемостей

$$K = \frac{\lg \varepsilon_{nc}(f_2)}{\lg \varepsilon_{nc}(f_1)}, \text{ где } \varepsilon_{nc}(f_1) \text{ и } \varepsilon_{nc}(f_2) - \text{ диэлектрические}$$

проницаемости пропиточного состава, измеренные на частотах  $f_1$  и  $f_2$  электромагнитного поля соответственно.

У соответствующих двух фаз непропитанной обмотки измеряли ёмкости относительно корпуса на двух выбранных частотах  $C_{дп12}(f_1)$  и  $C_{дп13}(f_1)$ ,  $C_{дп23}(f_1)$  и  $C_{дп12}(f_2)$ ,  $C_{дп13}(f_2)$  и  $C_{дп23}(f_2)$ . Во всех случаях для каждой двух фаз контролируемой обмотки значения ёмкости относительно корпуса, измеренные на двух частотах, были одинаковыми, т. е.  $C_{дп12}(f_1)=C_{дп12}(f_2)=C_{дп12}$ ,  $C_{дп13}(f_1)=C_{дп13}(f_2)=C_{дп13}$ ,  $C_{дп23}(f_1)=C_{дп23}(f_2)=C_{дп23}$ . Это указывало на то, что диэлектрические проницаемости эмалевого и корпусной изоляции в выбранном диапазоне частот не зависят от частоты. Выявленное равенство послужило основанием для того, чтобы считать, что для всех контролируемых обмоток справедливы равенства:  $\varepsilon_s(f_1)=\varepsilon_s(f_2)=\varepsilon_s$ ,  $\varepsilon_k(f_1)=\varepsilon_k(f_2)=\varepsilon_k$ , и  $C_{экв}(f_1)=C_{экв}(f_2)=C_{экв}$ . Однако в общем случае емкости  $C_{дп12}(f_1) \neq C_{дп13}(f_1) \neq C_{дп23}(f_1)$  и  $C_{дп12}(f_2) \neq C_{дп13}(f_2) \neq C_{дп23}(f_2)$  не равны друг другу, так как их величины зависят от того, как уложены витки упомянутых фаз в обмотке, и от неодинаковых значений полостей в пазах. Полученные результаты показали, что для оценки степени отверждения пропиточного состава в каждой из контролируемых обмоток можно использовать формулу (23).

Затем у каждой из двух фаз контролируемой обмотки измеряли на выбранных двух частотах емкости относительно корпуса после пропитки и сушки обмотки  $C_{мп12}(f_1)$ ,  $C_{мп13}(f_1)$ ,  $C_{мп23}(f_1)$  и  $C_{мп12}(f_2)$ ,

$C_{\text{нн13}}(f_2), C_{\text{нн23}}(f_2)$ , и по результатам измерений вычи-

слали отношение  $K = \frac{\lg \varepsilon_{\text{nc}}(f_2)}{\lg \varepsilon_{\text{nc}}(f_1)}$  по формуле

$$K = \frac{\lg \varepsilon_{\text{nc}}(f_2)}{\lg \varepsilon_{\text{nc}}(f_1)} = \frac{\ln C_{\text{ннkj}}(f_2) - \ln[C_{\text{экв}} - C_{\text{ннhj}}(f_2)] + A}{\ln C_{\text{ннhi}}(f_1) - \ln[C_{\text{экв}} - C_{\text{ннhj}}(f_1)] + A}, \quad (32)$$

где  $C_{\text{экв}}(f_1) = C_{\text{экв}}(f_2) = C_{\text{экв}} = \frac{2pS\varepsilon_0\varepsilon_a\varepsilon_k}{3[d_a\varepsilon_k + d_k\varepsilon_a]}$  – эк-

вивалентные емкости двух фаз обмотки, складывающиеся из последовательно соединенных емкостей эмалевой и корпусной изоляции контролируемой обмотки на частотах  $f_1$  и  $f_2$  электромагнитного поля соответственно,  $p = 36$  – количество пазов в магнитном сердечнике, в которые всыпана контролируемая часть обмотки;  $S = 0,5375 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$  – площадь паза;  $\varepsilon_0 = 8,854187 \cdot 10^{-12}$  – электрическая постоянная;  $\varepsilon_a = 3,85$  – диэлектрическая проницаемость эмалевой изоляции провода обмотки на частотах  $f_1$  и  $f_2$  электромагнитного поля;  $\varepsilon_k = 5,92$  – диэлектрические проницаемости корпусной изоляции на частотах  $f_1$  и  $f_2$  электромагнитного поля соответственно;  $d_a = 0,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  – толщина эмалевой изоляции провода;  $d_k = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  – толщина корпусной изоляции. Расчетная постоянная величина  $C_{\text{экв}}$ , которую использовали для оценки степени отверждения всех контролируемых обмоток, была равна

$$C_{\text{экв}} = \frac{2pS\varepsilon_0\varepsilon_a\varepsilon_k}{3[d_a\varepsilon_k + d_k\varepsilon_a]} = \frac{2 \cdot 36 \cdot 1,402 \cdot 10^{-2} \cdot 8,854187817 \cdot 10^{-12} \cdot 3,85 \cdot 5,92}{23,982 \cdot 10^{-3}} = 8493,73 \text{ пФ}.$$

После чего по вычисленной величине

$K = \frac{\lg \varepsilon_{\text{nc}}(f_2)}{\lg \varepsilon_{\text{nc}}(f_1)}$  определяли из графика зависимости

(рис. 1) степень высушенности пропиточного состава от отношения диэлектрических проницаемостей в каждой контролируемой обмотке.

Результаты измерений и расчетов сведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Результаты измерений и расчетов

**Table 1.** Results of measurements and calculations

$C_{\text{нн}}$ , пФ	$C_{\text{нн}}(f_1)$ , пФ	$C_{\text{нн}}(f_2)$ , пФ	A	$\frac{\lg \varepsilon_{\text{nc}}(f_2)}{\lg \varepsilon_{\text{nc}}(f_1)}$	Степень высушенности Dryness degree
$C_{\text{нн12}}=1660$	$C_{\text{нн12}}=2410$	$C_{\text{нн12}}=2241,9$	1,415	0,796	5
$C_{\text{нн13}}=1590$	$C_{\text{нн13}}=2380$	$C_{\text{нн13}}=2160,4$	1,468	0,73	4
$C_{\text{нн23}}=1630$	$C_{\text{нн23}}=2425$	$C_{\text{нн23}}=2255,3$	1,438	0,8	5

Как следует из табл. 1, все три фазы обмотки имеют 4–5 степень высушенности, т. е. являются недо-

сушенными, что служит показателем их низкого качества. Поэтому для повышения качества обмоток нужно пересмотреть режимы и время их сушки.

Из графика на рис. 1, б определяем, что

$$K = \frac{\lg \varepsilon_{\text{nc}}(f_2)}{\lg \varepsilon_{\text{nc}}(f_1)} \cong 0,8, \text{ что соответствует пятой степе-}$$

ни высушенности пропиточного состава. По графикам, приведенным на рис. 1, находим, что на частоте  $f_2=10$  кГц диэлектрическая проницаемость не отвержденного пропиточного состава  $\varepsilon_{\text{н}}=6,31$ . Результаты контроля внесены в табл. 2.

**Таблица 2.** Сравнительный анализ

**Table 2.** Comparative analysis

По предлагаемому способу According to the proposed method			По способу-прототипу [31] According to the method-prototype [31]		
$K_{12}=0,21$	$K_{13}=0,21$	$K_{23}=0,22$	$K_{12}=0,27$	$K_{13}=0,27$	$K_{23}=0,29$
$K_1=0,2$	$K_2=0,22$	$K_3=0,22$	$K_1=0,25$	$K_2=0,29$	$K_3=29$

Затем по формуле (25) рассчитывали коэффициенты пропитки двух фаз обмотки по предлагаемому способу и по способу [31]. В способе [31] при расчете коэффициентов пропитки фаз диэлектрическая проницаемость отвержденного до 7 степени компаунда КП-34 равняется  $\varepsilon_{\text{н}}=4,2$ . По формулам (29)–(32) определяли коэффициенты пропитки и сушки каждой из трёх фаз.

Как следует из табл. 2, погрешность определения коэффициента пропитки по предлагаемому способу на (25–32) % выше, чем по способу прототипу.

### Заключение

Таким образом, рассмотренный способ и устройство контроля распределенности пропиточного состава по фазам обмотки и одновременного контроля степени отверждения пропиточного состава, по сравнению с известными способами контроля указанных параметров [23, 24], более информативны. Ёмкостные способы контроля качества пропитки во всех известных аналогах не учитывают степени отверждения пропиточного состава. Это приводит к тому, что коэффициент пропитки, определяемый указанными способами, может существенно отличаться от реального коэффициента. Кроме того, ни один из аналогов не позволяет определить степень высушенности пропиточного в обмотки пропиточного состава, что снижает не только точность, но и информативность контроля. Предлагаемый способ, по сравнению известными аналогами, устраняет недостатки аналогов и имеет более высокую точность определения коэффициента пропитки обмоток, что связано с учетом степени отверждения пропиточного состава и с возможностью более точного определением его диэлектрической проницаемости в обмотке. Предлагаемый способ особенно важен для контроля изоляции обмоток электрических машин горнодобывающей промышленности, где безотказность и надежность изделий наиболее важны для предотвращения аварийных и катастрофических ситуаций.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курбатова О.А., Павлюченко В.М. Монтаж и ремонт горных машин и электрооборудования. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2004. – 286 с.
2. Колмаков Е.А., Кондрашов П.М., Зеньков И.В. Обзор конструкций фильтров в составе погружных электроцентробежных насосов при добыче нефти // Вестник КузГТУ. – 2016. – № 1. – С. 150–155.
3. Компьютерная система для функциональной диагностики электроприводов карьерных экскаваторов / В.Г. Каширских, А.Н. Гаргаев, В.М. Завьялов, И.Ю. Семькина // Вестник КузГТУ. – 2016. – № 6. – С. 159–168.
4. Русский Е.Ю. Анализ прочности роторов шахтных осевых вентиляторов // Вестник КузГТУ. – 2015. – № 2. – С. 31–34.
5. Герике П.Б. Определение дефектов динамического оборудования тяговых лебедок экскаваторов типа драглайн по параметрам механических колебаний // Вестник КузГТУ. – 2014. – № 1. – С. 21–26.
6. Применение магнитоэлектрического композита на основе ультрадисперсного порошка никель-цинковых частиц для ресурсосберегающей технологии пропитки обмоток электрических машин / Г.В. Смирнов, О.Л. Хасанов, Д.Г. Смирнов, В.В. Полисадова, М.С. Петюкевич, З.Г. Бикбаева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 11. – С. 106–117.
7. Gupta B. Risk in surge testing of turn insulation in windings of rotating machines // Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Technology Conference. – Chicago, June, 2003. – P. 459–462.
8. A new generation of aluminum enameled winding wires / B. Smyrak, T. Knych, A. Mamala, P. Uliasz, M. Jabłoński // Wire Journal International. – 2012. – V. 45. – № 1. – P. 55–61.
9. PDIV characteristics of twisted-pair of magnet wires with repetitive impulse voltage / K. Kimura, S. Ushirono, T. Koyanagi, M. Hikita // IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Ins. – Chicago, June 2007. – V. 14. – № 3. – P. 744–750.
10. Chapman M., Frost N., Bruetsch R. Insulation systems for rotating low-voltage machines // IEEE International Symposium on Electrical Insulation. – Chicago, June, 2008. – P. 257–260.
11. Accessing the insulation characteristics for stator windings of low-voltage induction motors for adjustable-speed drive applications / D. Hwang, K. Lee, Y. Kim, I. Lee, T. Lim, D. Kim // IEEE Industry Application Conference. – Chicago, June, 2003. – V. 1. – P. 432–438.
12. Electrical aging of the insulation of low voltage machines: model definition and test with the design of experiments / N. Lahoud, J. Faucher, D. Malec, P. Maussion // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2013. – V. 60. – № 5. – P. 60–67.
13. Leonov A.P., Redko V.V., Soldatenko E.Yu. Estimation of winding insulation resistance to the corona discharges // OP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2014. – V. 66. – P. 1–5.
14. A survey on testing and monitoring methods for stator insulation systems of low-voltage induction machines focusing on turn insulation problems / S. Grubic, J.M. Aller, B. Lu, T.G. Habetler // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2008. – V. 55. – № 12. – P. 4127–4134.
15. ГОСТ ИЕС 60851–5–2011. Провода обмоточные. Методы испытаний. Ч. 5. Электрические свойства. – М.: Стандартинформ, 2014. – 19 с.
16. Bellomo J.P., Castelan P., Lebey T. The effect of pulsed voltages on dielectric material properties // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 1999. – V. 6. – № 2. – P. 20–26.
17. Борисенко А.И., Костиков О.Н., Яковлев А.И. Охлаждение промышленных электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
18. Тепловые свойства магнитоэлектрических композиционных составов на основе компаунда КП-34 и ультрадисперсного никель-цинкового порошка / Г.В. Смирнов, О.Л. Хасанов, Д.Г. Смирнов, В.В. Полисадова, М.С. Петюкевич, С.А. Понамарева // Известия вузов. Физика. – 2015. – Т. 58. – № 6/2. – С. 291–296.
19. Fenger M., Campbell S.R., Pedersen J. Motor winding problems caused by inverter drives // IEEE Industry Applications Magazine. – 2003. – V. 9. – № 4. – P. 22–31.
20. Prasad A., Prasad K. Effective permittivity of random composite media: a comparative study // Physica. – 2007. – V. 396. – № 3. – P. 132–137.
21. Похолоков Ю.П., Бесперстов П.П., Пыхтин В.В. Исследование влияния технологического процесса изготовления обмоток на дефектность витковой изоляции асинхронных двигателей // Известия Томского политехнического института. – 1975. – Т. 222. – С. 52–65.
22. Кондратьева Н.Г., Кузнецов Н.А. Сравнительная оценка коэффициентов заполнения паза пропиточным составом, определенных различными методами // Технология электротехнического производства. – 1981. – № 12. – С. 14–16.
23. Дудкин А.Н. Разработка методов оценки технологического процесса пропитки обмоток асинхронных двигателей: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 1980. – 163 с.
24. Смирнов Г.В., Смирнов Д.Г. Ёмкостной контроль качества пропитки обмоток электрических машин общего назначения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 4. – С. 69–78.
25. Смирнов Г.В. Надежность изоляции обмоток электротехнических изделий. – Томск: Изд-во Томского государственного университета, 1990. – 192 с.
26. Frost N., Chapman M., Bruetsch R. Considerations for rotating low-voltage machine insulation designs // IEEE Insulation. – 2008. – V. 1. – № 4. – P. 571–574.
27. A survey on testing and monitoring methods for stator insulation systems of low-voltage induction machines focusing on turn insulation problems / S. Grubic, J.M. Aller, B. Lu, T.G. Habetler // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2008. – V. 55. – № 12. – P. 4127–4134.
28. Halpem E.H. Interaction of varnish with magnet wire enamel // IEEE Transactions on Electrical Insulation. – 1967. – V. 2. – № 3. – P. 141–145.
29. ГОСТ 19007–73. Материалы лакокрасочные. Метод определения времени и степени высыхания. Госстандарт России. – М.: Государственный стандарт Союза ССР, 1974. – С. 5.
30. Способ определения коэффициента пропитки обмоток электрических машин: авт. свид. СССР № 1241361; заявл. 24.06.83; опубл. 30.06.86. Бюл. № 24. – 4 с.
31. Способ определения коэффициента пропитки отверждаемым полимерным составом обмоток электрических машин: пат. Рос. Федерация № 2521439; заявл. 25.10.12; опубл. 27.06.2014, Бюл. № 18. – 22 с.

Поступила 05.04.2017 г.

## Информация об авторах

**Смирнов Г.В.**, доктор технических наук, профессор, директор Научно-исследовательского института электронного технологического оборудования и систем связи Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

**Смирнов Д.Г.**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института электронного технологического оборудования и систем связи Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

UDC 621.313.045:621.315.61

## CONTROL OVER INSULATION OF ELECTRIC DRIVES WINDINGS IN MINING EQUIPMENT AFTER TECHNOLOGICAL OPERATIONS OF IMPREGNATION AND DRYING

Gennadiy V. Smirnov<sup>1</sup>,  
smirnov@main.tusur.ru

Dmitriy G. Smirnov<sup>1</sup>,  
smirnov@main.tusur.ru

<sup>1</sup> Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,  
40, Lenin Avenue, Tomsk, 634045, Russia.

**The relevance** of the work is caused by the fact that electric machines are one of the most common types of electrical industry products, and they are used in varied industries. The failure of the electrical machine leads to a crash, shutdown and, consequently, to high economic cost of eliminating the results of machine failure. The results of electric machines failure are especially tangible in exploration, production and transportation of geo-resources in the oil, mining, coal, chemical and other industries, as these industries are currently the basis for formation of the budget of the country. The reliability and uptime of these machines are largely determined by impregnation and drying of windings, as these operations form the important qualitative characteristics of the windings: insulating, thermal, moisture and mechanical. All these properties depend on the degree of filling winding cavities with impregnating composition and the degree of its polymerization (curing). In the case of lack of dryness (compound curing completion; polymerization, etc.) of the windings after impregnation the defects can occur in the inter-turn insulation during storage and transportation of equipment to the operation site, which inevitably leads to decrease in windings resistance insulation. Improvement of the operations is impossible without adequate methods of non-destructive quality control of carrying out these operations. Therefore, the development of methods to control the quality of impregnation and the degree of rejection of the impregnating composition in the windings is very topical.

**The aim** of the work is to demonstrate the possibility of controlling the impregnating composition distribution in the winding and the degree of its curing by the results of measuring the capacitance of the windings relative to the magnetic core at two frequencies of the electromagnetic field.

**Research methods:** electromagnetic, to study the dependence of dielectric permittivity of the impregnating composition on the electromagnetic field frequency and curing degree.

**Results.** The paper considers the capacitive method of monitoring the curing degree of the impregnating composition in the windings of electrical products and introduces the experimentally obtained graphs of dependence of the compound KP-34 dielectric permeability on the electromagnetic field frequency taken at different dryness degrees of the compound. The authors have justified the physical bases of controlling the quality of impregnation and drying. The paper introduces the main criteria for assessing the quality of these technological operations and the diagram of the monitoring device and considers the principle of its operation.

### Key words:

Winding, impregnating composition, degree of cure, frequency dependence, dielectric constant, capacitance, amplifier, synchronous detector, computing unit.

### REFERENCES

1. Kurbatova O.A., Pavlyuchenko V.M. *Montazh i remont gornykh mashin i elektrooborudovaniya* [installation and repairing of mining machinery and electrical equipment]. Vladivostok, DVGU Publ. house, 2004. 286 p.
2. Kolmakov E.A., Kondrashov P.M., Zenkov I.V. Obzor konstrukt-sii filtrov v sostave pogruzhnykh elektrosentrobezhnykh nasosov pri dobyche nefiti [Review of filter design in the composition of electrical submersible pumps in oil production]. *Vestnik KuzGTU*, 2016, no. 1, pp. 150–155.
3. Kashirskikh V.G., Garaev A.N., Zavyalov V.M., Semykina I.Yu. Computernaya sistema dlya funktsionalnoy diagnostiki elektroprivodov karyernykh ekskavatorov [Computer system for functional diagnostics of electric drives of quarry excavators]. *Bulletin of KuzGTU*, 2016, no. 6, pp. 159–168.
4. Russky E.Yu. Analiz prochnosti rotorov shakhtnykh osevykh ventilyatorov [Analysis of rotor strength in the mine axial fans]. *Vestnik KuzGTU*, 2015, no. 2, pp. 31–34.
5. Gerike P.B. Opredelenie defektov dinamicheskogo oborudovaniya tyagovykh lebedok ekskavatorov tipa draglayn po parametram mekhanicheskikh kolebaniy [Defining the defects of dynamic equipment of traction hoists in the dragline type excavators by the parameters of mechanical vibrations]. *Vestnik KuzGTU*, 2014, no. 1, pp. 21–26.
6. Smirnov G.V., Khasanov O.L., Smirnov D.G., Polissadov V.I., Petukovich M.S., Bikbaeva Z.G. Application of magneto-electric composite based on ultrafine powder of nickel-zinc particles for resource-saving technology of impregnation of windings of electrical machines. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 11, pp. 106–117. In Rus.
7. Gupta B. Risk in surge testing of turn insulation in windings of rotating machines. *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Technology Conference*. Chicago, June, 2003. pp. 459–462.
8. Smyrak B., Knych T., Mamala A., Uliasz P., Jabłoński M. A new generation of aluminum enameled winding wires. *Wire Journal International*, 2012, vol. 45, no. 1, pp. 55–61.
9. Kimura K., Ushirone S., Koyanagi T., Hikita M. PDIV characteristics of twisted-pair of magnet wires with repetitive impulse voltage. *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Ins.* Chicago, June 2007. Vol. 14, no. 3, pp. 744–750.
10. Chapman M., Frost N., Bruetsch R. Insulation systems for rotating low-voltage machines. *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. Chicago, June, 2008. pp. 257–260.
11. Hwang D., Lee K., Kim Y., Lee I., Lim T., Kim D. Accessing the insulation characteristics for stator windings of low-voltage induction motors for adjustable-speed drive applications. *IEEE Industry Application Conference*. Chicago, June, 2003. Vol. 1, pp. 432–438.

12. Lahoud N., Faucher J., Malec D., Maussion P. Electrical aging of the insulation of low voltage machines: model definition and test with the design of experiments. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, vol. 60, no. 5, pp. 60–67.
13. Leonov A.P., Redko V.V., Soldatenko E.Yu. Estimation of winding insulation resistance to the corona discharges. *OP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 66, pp. 1–5.
14. Grubic S., Aller J.M., Lu B., Habetler T.G. A survey on testing and monitoring methods for stator insulation systems of low-voltage induction machines focusing on turn insulation problems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, vol. 55, no. 12, pp. 4127–4134.
15. GOST IEC 60851–5-2011. *Provoda obmototchnye. Metody ispitaniy. Ch. 5. Elektricheskie svoystva* [State Standard 60851–5-2011. Magnet wires. Test methods. P. 5. Electrical properties]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 19 P.
16. Bellomo J.P., Castelan P., Lebey T. The effect of pulsed voltages on dielectric material properties. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1999, vol. 6, no. 2, pp. 20–26.
17. Borisenko A., Kostikov O.N., Yakovlev A.I. *Okhlazhdenie promyshlennykh elektricheskikh mashin* [Cooling industrial electric machines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 296 p.
18. Smirnov G.V., Khasanov O.L., Smirnov D.G., Polisadov V.I., Petukevich M.S., Ponamarev S.A. Thermal properties of magneto-dielectric composition based on the compound KP-34, and ultrafine nickel-zinc powder. *Izvestiya vuzov. Physics*, 2015, vol. 58, no. 6/2, pp. 291–296. In Rus.
19. Fenger M., Campbell S.R., Pedersen J. Motor winding problems caused by inverter drives. *IEEE Industry Applications Magazine*, 2003, vol. 9, no. 4, pp. 22–31.
20. Prasad A., Prasad K. Effective permittivity of random composite media: a comparative study. *Physica*, 2007, vol. 396, no. 11, pp. 132–137.
21. Pokholkov Yu.P., Besperstov P.P., Pykhtin V.V. Issledovanie vliyaniya tekhnologicheskogo protsessa izgotovleniya obmotok na defektnost vitkovoy izolyatsii asinkhronnykh dvigateley [Study of the influence of technological process of manufacturing the windings on the deficiency of turn insulation of induction motors]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic Institute*, 1975, vol. 222, pp. 52–65.
22. Kondrateva G.N., Kuznetsov I.N. Sravnitel'naya otsenka koeffitsientov zapolneniya paza propitotchnym sostavom, opredelennykh razlichnymi metodami [Comparative evaluation of the fill factor of the groove of the impregnating composition defined by different methods]. *Technology electrical production*, 1981, no. 12, pp. 14–16
23. Dudkin A.N. *Razrabotka metodov otsenki tekhnologicheskogo protsessa propitki obmotok asinkhronnykh dvigateley*. Dis. Kand. nauk [Development of methods for evaluation of technological process of impregnation of induction motor windings. Cand. Diss.]. Tomsk, 1980. 163 p.
24. Smirnov G.V., Smirnov D.G. Capacitive method for controlling the quality of winding impregnation in electric motor for general industrial use. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 4, pp. 69–77. In Rus.
25. Smirnov G.V. *Nadezhnost izolyatsii obmotok elektrotekhnicheskikh izdeliy* [Reliability of winding insulation in electrical products]. Tomsk, Tomsk State University Press, 1990. 192 p.
26. Frost N., Chapman M., Bruetsch R. Considerations for rotating low-voltage machine insulation designs. *IEEE Insulation*, 2008, vol. 1, no. 4, pp. 571–574.
27. Grubic S., Aller J.M., Lu B., Habetler T.G. A survey on testing and monitoring methods for stator insulation systems of low-voltage induction machines focusing on turn insulation problems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, vol. 55, no. 12, pp. 4127–4134.
28. Halpem E.H. Interaction of varnish with magnet wire enamel. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1967, vol. 2, no. 3, pp. 141–145.
29. GOST 19007–73. *Materiali lakokrasotchnie. Metod opredeleniya vremeni i stepeni visichania*. [Paint and varnish materials. Method of determining the time and extent of drying]. Moscow, State standard of the USSR, 1974. 5 p.
30. Smirnov G.V., Smirnov D.G. *Sposob opredeleniya koeffitsienta propitki otverzhaemym polimernym sostavom obmotok elektricheskikh mashin* [Method of determining the impregnation coefficient of windings of electrical machines]. Author certificate. The USSR, no. 1241361, 1986.
31. Smirnov G.V., Smirnov D.G. *Sposob opredeleniya koeffitsienta propitki otverzhaemym polimernym sostavom obmotok elektricheskikh mashin* [Method of determining the coefficient of winding impregnation with curable polymer composition in electrical machines]. Patent RF, no. 2521439, 2014.

Received: 5 April 2017.s

#### Information about the authors

**Gennadiy V. Smirnov**, Dr. Sc., professor, director, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.

**Dmitriy G. Smirnov**, Cand. Sc., senior researcher, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.

УДК 622.271

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ОТВАЛООБРАЗОВАНИЯ ВСКРЫШНЫХ ПОРОД В КАРЬЕРНОЙ ВЫЕМКЕ СМЕЖНОГО УЧАСТКА

Курехин Евгений Владимирович,  
ogdm@yandex.ru

Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачёва,  
Россия, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28.

**Актуальность работы** обусловлена групповым расположением участков открытой угледобычи и ограничением площадей для внешнего отвалообразования. Развитию открытой отработки угольных месторождений участками с групповым расположением способствуют относительно небольшие инвестиции, быстрый ввод в эксплуатацию, низкая себестоимость 1 т угля. Следует отметить, что разработка большого количества участков с ограниченными запасами ухудшает экологическую обстановку. В этой связи на первое место при решении перспективного развития открытых работ в Кузбассе выдвигаются требования по снижению уровня отрицательного воздействия на экологию региона угольными разрезами. Одно из направлений решения этого вопроса – проектирование технологии разработки участков с учетом требований по снижению землеемкости за счет отвалообразования породы во внутренних отвалах и в карьерной выемке смежного участка.

**Цель работы.** Обоснование технологии отвалообразования вскрышных пород в карьерной выемке смежного участка (прежнего пользователя недр) и технико-экономическое обоснование нового способа отвалообразования; обоснование параметров продольного и поперечного отвалообразования вскрышных пород в карьерной выемке смежного участка с применением драглайна, бульдозера и автомобильного транспорта; разработка методики определения расстояний транспортирования вскрышных пород при групповом расположении участков открытой угледобычи; разработка технологических схем отвалообразования вскрышных пород в карьерной выемке смежного участка с применением современного программного комплекса Microsoft Office Visio.

**Методы исследования:** системный анализ при исследовании пространственного расположения участков открытой угледобычи, моделирование процесса отвалообразования вскрышных пород и технико-экономические расчёты с применением программного обеспечения (Microsoft Office Excel).

**Результаты.** Разработаны технологические схемы отвалообразования вскрышных пород в карьерной выемке смежного участка (прежнего пользователя недр) с продольным и поперечным складированием пород. Землесберегающий способ отвалообразования повышает эффективность открытой угледобычи. Использование карьерной выемки смежного участка позволит снизить стоимостные затраты на транспортирование вскрышных пород автотранспортом. Предложенные схемы могут быть использованы при проектировании новых участков открытой угледобычи с групповым расположением.

### Ключевые слова.

Открытый способ угледобычи, групповое расположение карьерных полей, складирование вскрышных пород, карьерная выемка смежного участка, расстояние транспортирования, экскаватор-драглайн, технологические схемы отвалообразования в карьерной выемке.

Перспективным способом добычи угля в Кузнецком угольном бассейне являются открытые горные работы. В центральной части Кузнецкого бассейна угольные разрезы располагаются группами, например на Караканском месторождении 19 участков открытой угледобычи [1], расположенных на площади 250 км<sup>2</sup>. При этом параметры карьерных полей имеют небольшие размеры по простиранию (до 1–2 км) и находятся на небольшом расстоянии друг от друга (0,1–2,0 км) (рис. 1).

Анализ горно-геологических условий показал, что распределение угольных пластов наклонного (15–45°) и крутого (более 45°) падения с удельным весом общего их количества составляет: в северной части 82 %, в центральной и южной части Кузнецкого бассейна соответственно 100 и 21 %. Следовательно, в перспективе добычи открытым способом большая часть вскрышных пород будет размещаться на внешних отвалах.

Наименее землеёмкой при открытой угледобыче является технология с частичным внутренним отвалообразованием и с отвалообразованием вскрышных пород – в карьерной выемке смежного участка (прежнего пользователя недр) [2, 3].

Добыча угля открытым способом сопровождается нарушением земной поверхности. При крутом падении свит угольных пластов и групповом расположении участков открытой угледобычи возникает проблема складирования вскрышных пород на внешних отвалах и, следовательно, увеличивается дальность их транспортирования, которая составляет 6–8 км и более.

Для решения этой проблемы предлагается складировать вскрышные породы в карьерных выемках (прежних пользователей недр), оставшихся после открытой разработки.

В соответствии с законодательством Российской Федерации пользователи недр имеют право на передачу пользования участками другому пользователю недр, а также использование карьерных выемок, перешедших от других пользователей недр, для складирования вскрышных пород [4–6].

К установленным способам складирования вскрышных пород в отвалах относятся:

- внешние отвалы, расположенные за пределами горного отвода;
- на поверхности внутренних бестранспортных отвалов;

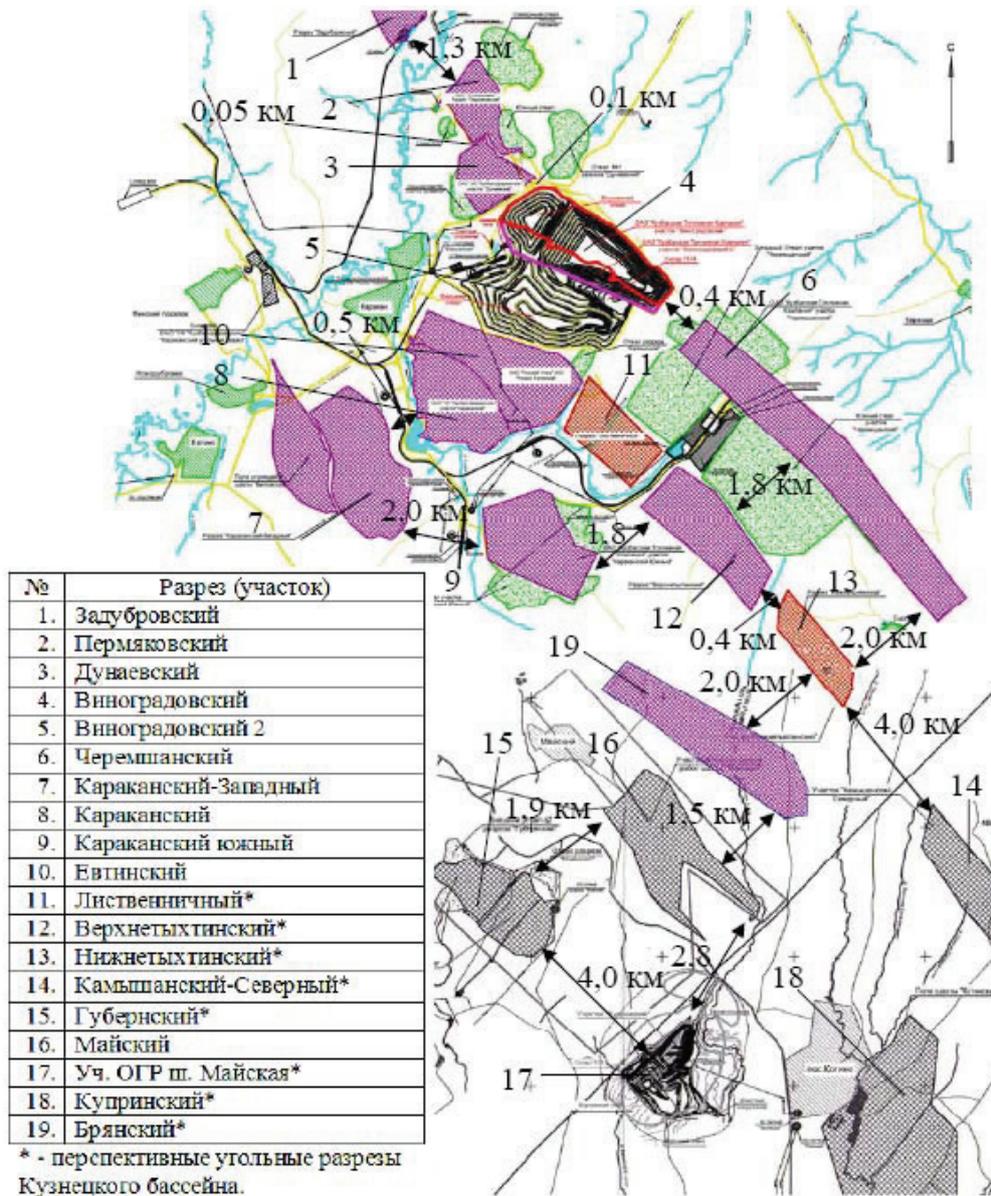


Рис. 1. Групповое расположение карьерных полей на Караканском месторождении Ерунаковского геолого-экономического района

Fig. 1. Group arrangement of open pit mining on Karakansky area of Erunakovsky geological and economic region

• отвалообразование в выработанном пространстве карьеров смежных участков [2].

Исследования, выполненными учёными ИГД СО РАН (г. Новосибирск) [7], установили, что при разработке свит угольных пластов полого падения (5–15°) от 40 до 70 % вскрышных породы складываются во внутренний отвал.

Зарубежный опыт открытой разработки на карьерах (США) показывает, что, как правило, восстановительные работы (засыпка карьерной выемки) проводятся непосредственно вслед за горными [8]. Применяемая техника на внешних отвалах и технология горно-технической рекультивации отвалов находятся в прямой зависимости от типа вскрышного и отвального оборудования (эк-

скаваторы драглайны, бульдозеры и др.) и технологических схем [9–21].

Задачами проектирования при разработке новых участков открытой угледобычи с групповым расположением карьерных полей являются:

- 1) обоснование места складирования вскрышных пород (в карьерной выемке или во внешнем отвале);
- 2) определение расстояний транспортирования вскрышных пород;
- 3) технико-экономическое обоснование технологии отвалообразования и времени складирования вскрышных пород в карьерной выемке смежного участка.

При выборе места складирования вскрышных пород руководствуются следующими положениями:

отвалы должны располагаться по возможности ближе к карьеру, чтобы снизить затраты на транспортирование породы; отвалы, расположенные в логах, могут восстановить неровный рельеф земной поверхности; отвалы, расположенные в карьерных выемках смежных участков, позволят полностью восстановить искусственно нарушенный рельеф земной поверхности.

Для группового расположения угольных разрезов в Кузнецком угольном бассейне (Ерунаковский район) предлагаются следующие схемы автотранспортирования вскрышных пород (рис. 1):

- 1) с разреза Черемшанский на внешний отвал, расположенный на расстоянии 0,1 км;
- 2) с разреза Евтинский на внешний отвал, расположенный на расстоянии 7,0 км;
- 3) с разреза Евтинский в карьерную выемку смежного участка Лиственничный, расположенную на расстоянии 0,1 км;
- 4) с разреза Брянский в карьерную выемку участка Нижнетыхтинский, расположенную на расстоянии 2,0 км.

Для проектирования новых участков открытой угледобычи предлагается следующая методика определения расстояний транспортирования вскрышных пород с применением автомобильного транспорта, определяется по формулам (1)–(8).

Расстояние транспортирования вскрышных пород от забоя карьера до внешнего отвала определяется выражением, км:

$$L_{ТВ} = L_3 + \sum_{i=1}^n L_C + L_{КТ} + L_{СТ} + \sum_{i=1}^{n-1} L_0 + L_n, \quad (1)$$

где  $L_3$  – длина забойных дорог;  $L_C$  – длина съездов в карьере;  $n$  – количество съездов ( $n$  принимается равным количеству уступов в карьере);  $L_{КТ}$  – длина дороги в капитальной траншее;  $L_{СТ}$  – длина транспортирования вскрышных пород по стационарным дорогам (расстояние от эксплуатационного участка до внешнего отвала);  $L_0$  – длина заездов на ярусы отвала;  $n_{я}$  – количество ярусов отвала ( $n_{я}=3$ );  $L_n$  – длина дороги до места разгрузки породы (на последнем ярусе отвала), км.

Длина съездов в карьере, км:

$$L_C = n_C \frac{1000 H_y}{i_C}, \quad (2)$$

где  $n_C$  – количество съездов;  $H_y$  – высота уступа, м;  $i_C$  – величина уклона съезда, ‰.

Длина капитальной траншеи [22], км:

$$L_{КТ} = \frac{1000 H_{КТ}}{i_{КТ}}, \quad (3)$$

где  $H_{КТ}$  – глубина капитальной траншеи, км;  $i_{КТ}$  – величина уклона траншеи, ‰.

Длина заездов на ярусы внешнего отвала, км:

$$L_0 = (n_{я} - 1) \frac{1000 h_{я}}{i_{я}}, \quad (4)$$

где  $n_{я}$  – количество ярусов отвала;  $h_{я}$  – высота яруса отвала, м;  $i_{я}$  – величина уклона заезда на ярусы отвала, ‰.

Длина транспортирования вскрышных пород на последнем ярусе отвала, км:

$$L_n = L_2, \quad (5)$$

где  $L_2$  – длина транспортирования вскрышных пород на втором ярусе отвала, км.

Расстояние транспортирования вскрышных пород от забоя карьера до места разгрузки в карьерной выемке смежного участка определяется выражением, км:

$$L_{ТК} = L_3 + \sum_{i=1}^n L_C + L_{КТ} + L_{СТК} + L_{СК} + L_K, \quad (6)$$

где  $L_{СТК}$  – дальность транспортирования вскрышных пород по стационарным дорогам (расстояние от эксплуатационного участка до карьерной выемки смежного участка), км;  $L_{СК}$  – длина съезда в карьерной выемке, км;  $L_K$  – длина дорог в карьерной выемке (до места разгрузки), км.

Расстояние транспортирования в карьерной выемке при продольном складировании вскрышных пород с разгрузкой вскрышных пород с поверхности определяется выражением, км:

$$L_K = (m L_{КВ} - 1000 R_p) + (N_3 - 1) 1000 R_{ч}, \quad (7)$$

где  $L_{КВ}$  – длина карьерной выемки в плане, км;  $R_{ч}$ ,  $R_p$  – радиус черпания и разгрузки экскаватора драглайна, м;  $N_3$  – количество отвальных заходов (табл. 1), ед.;  $m$  – коэффициент, учитывающий место заезда автосамосвала в карьерную выемку (с торца  $m=1$ ; с середины борта карьерной выемки  $m=0,5$ ).

Количество продольных, поперечных отвальных заходов определяется в зависимости от рабочих параметров экскаватора драглайна (радиуса черпания и разгрузки) и ширины карьерной выемки в плане (табл. 1).

Длина съезда в карьерной выемке, км:

$$L_{СК} = \frac{1000 H_y}{i_C}. \quad (8)$$

Анализ типовых технологических схем и методических рекомендаций [23–28] показал, что отсутствует методический подход к определению способов и параметров складирования вскрышных пород в карьерной выемке смежного участка.

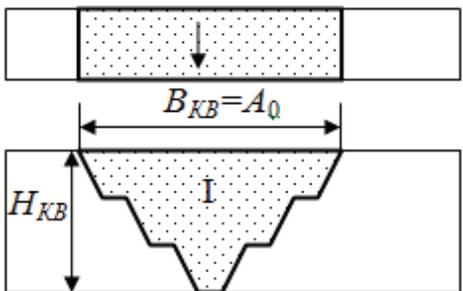
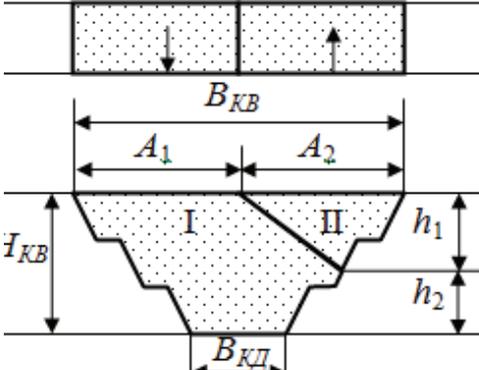
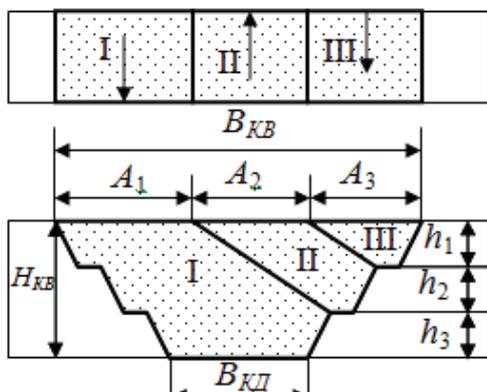
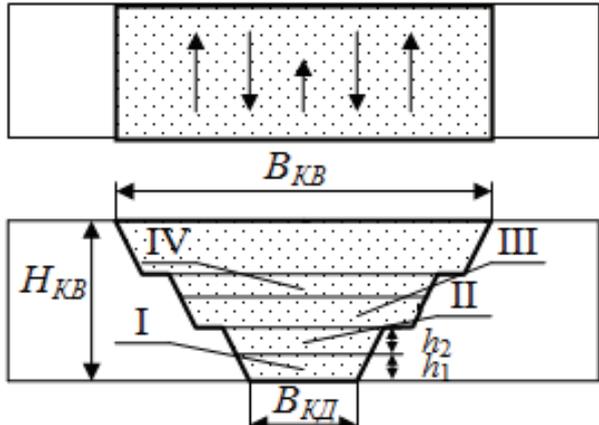
В нормативных документах [23–26] отсутствуют технологические схемы отвалообразования вскрышных пород в карьерной выемке смежного участка.

Поэтому разработка и обоснование параметров землесберегающей технологии открытой угледобычи является приоритетной задачей при проектировании новых участков открытой угледобычи.

Для снижения землеёмкости открытой угледобычи предлагаются следующие способы складирования вскрышных пород в карьерной выемке смежного участка (табл. 1):

- 1) отвалообразование с применением драглайна и автомобильного транспорта;
- 2) отвалообразование с применением бульдозера и автомобильного транспорта.

**Таблица 1.** Схемы отвалообразования вскрышных пород в карьерной выемке смежного участка  
**Table 1.** Schemes of overburden dumping in borrow excavation of the adjacent area

Наименование Name	Схема Scheme	Аналитическое выражение Analytical expression
Продольное отвалообразование (одной отвальной заходкой) Longitudinal dumping (with one dump)		$N_3 = (1000 B_{KB}) / A_0;$ $B_{KB} = A_0;$ $N_3 = 1$
Продольное отвалообразование (двумя отвальными заходками) Longitudinal dumping (with two dumps)		$B_{KB} = A_1 + A_2;$ $N_3 = 2$
Продольное отвалообразование (тремя отвальными заходками) Longitudinal dumping (with three dumps)		$B_{KB} = 2A_1 + A_3;$ $N_3 = 3$
Продольное, послойное отвалообразование (бульдозерное) Longitudinal, layer-by-layer dumping (dozer)		$N_3 > 2$

Окончание табл. 1

Table 1

Наименование Name	Схема Scheme	Аналитическое выражение Analytical expression
Поперечное отвалообразование (одной отвальной заходкой) Transverse dumping (with one dump)		$L_{KB} = A_0;$ $N_3 = 1$
Поперечное отвалообразование (двумя и более отвальными заходками) Transverse dumping (with two or more dumps)		$L_{KB} = A_1 + A_2 + A_N;$ $N_3 \geq 2$

Примечание. Цифрами I, II, III показана последовательность отвальных заходок при складировании вскрышных пород.  $B_{KB}$  – ширина карьерной выемки в плане, м;  $A_0$  – ширина отвальной заходки, м;  $H_{KB}$  – глубина карьерной выемки, м;  $A_1, A_2, A_3$  – ширина первой, второй и третьей отвальной заходки, м;  $h_1, h_2, h_3$  – глубина верхней, средней, нижней части карьерной выемки, м;  $L_{KB}$  – длина карьерной выемки в плане;  $N_3$  – количество отвальных заходок;  $B_{КД}$  – ширина карьерной выемки по дну, м.

Note. I, II, III indicate the subsequence of overburden cuts when storing overburden.  $B_{KB}$  is the width of the borrow cut in the plan, m;  $A_0$  is the width of the overburden cut, m;  $H_{KB}$  is the depth of the borrow cut, m;  $A_1, A_2, A_3$  is the width of the first, second and third overburden cuts, m;  $h_1, h_2, h_3$  is the depth of the upper, medium and low parts of the borrow cut, m;  $L_{KB}$  is the length of the borrow cut in the plan;  $N_3$  is the number of overburden cuts;  $B_{КД}$  is the bottom width of the borrow cut, m.

Технология отвалообразования вскрышных пород в карьерной выемке смежного участка заключается в следующем.

I. Продольное отвалообразование одной заходкой

Вскрышные породы складированы в карьерную выемку смежного участка экскаватором-драглайном одной продольной заходкой на полную её глубину до 30 м (рис. 2). Первоначально бульдозер создаёт скользящий съезд и пионерную насыпь для установки на ней драглайна. Драглайн создаёт приёмную яму (глубиной до 5 м) для разгрузки вскрышной породы автосамосвалами.

Основным условием эффективной работы драглайна является то, что он должен находиться на устойчивом основании.

В целях безопасности, чтобы исключить возможность падения автосамосвала в приёмную яму при непосредственной разгрузке под откос, у верхней бровки приёмной ямы отсыпают породный вал, высотой  $h_{ПВ}$  не менее 0,5 диаметра колеса разгружающегося автомобиля [15].

Драглайн черпает вскрышную породу из приёмной ямы и складировывает её на радиус разгрузки одной продольной отвальной заходкой ( $B_{KB} = A_0$ ) на полную глубину карьерной выемки (рис. 2, I). Перемещение драглайна осуществляется вдоль фронта отвальных работ до торца карьерной выемки (рис. 2).

Вскрышные породы укладываются в карьерную выемку с учётом осадки слоя пород ( $h_1, h_2$ ) на величину 1,5–3,0 м (рис. 2). После завершения за-

сыпки карьерной выемки складированы мягкие породы мощностью  $h_0$  (рис. 2). Заключительным этапом является рекультивация насыпного слоя потенциально плодородных пород после усадки должна быть не менее 1,0 м [20].

Для определения времени складирования вскрышных пород в карьерной выемке необходимо рассчитать объём вскрышных пород и параметры отвальной заходки, определяемые по формулам (9)–(13).

Объём вскрышных пород, складированный в отвале, определяется по выражению [15]:

$$V_0 = A_0 H_0 L_0 / K_p, \quad (9)$$

$A_0$  – ширина отвальной заходки, м;  $H_0$  – высота отвала, м;  $L_0$  – длина отвального фронта, м;  $K_p$  – коэффициент, учитывающий остаточное разрыхление породы в отвале ( $K_p=1,06–1,15$ ).

Ширина отвальной заходки определяется по формуле, м:

$$A_0 = R_q + R_p, \quad (10)$$

где  $R_q$ ,  $R_p$  – радиус черпания и разгрузки экскаватора драглайна, м.

С учётом выражения (10) объём вскрышных пород ( $m^3$ ), складированный в карьерной выемке смежного участка, определяется по формуле:

$$V_1 = (R_q + R_p) H_{кв} L_{кв} k^{-1} / K_p, \quad (11)$$

где  $H_{кв}$  – глубина карьерной выемки, м;  $L_{кв}$  – длина карьерной выемки в плане, м.;  $k$  – коэффициент, учитывающий размер карьерной выемки (табл. 3).

### II. Продольное отвалообразование двумя заходками

Вскрышные породы складированы в карьерную выемку экскаватором-драглайном двумя продольными заходками на полную её глубину до 50 м (рис. 3).

Первоначально бульдозер создаёт скользящий съезд и пионерную насыпь в торце карьерной выемки для установки на ней драглайна. Драглайн создаёт приёмную яму для разгрузки вскрышной породы автосамосвалами.

Вскрышная порода размещается на радиус разгрузки драглайна, по всей ширине отвальной заходки. Перемещение фронта отвальных работ происходит вдоль борта карьера до торца карьерной выемки. Для снижения дальности автотранспортирования бульдозер создаёт второй скользящий съезд (рис. 3).

После завершения складирования вскрышных пород первой продольной отвальной заходкой экскаватор-драглайн перемещается в обратном направлении вдоль другого борта карьера и складировывает вскрышные породы на радиус разгрузки второй продольной отвальной заходкой в оставшуюся часть карьерной выемки (рис. 3, II).

Вскрышные породы укладываются в карьерную выемку с учётом осадки слоя пород ( $h_1, h_2$ ) на величину 1,5–3,0 м (рис. 3). После завершения насыпки карьерной выемки складированы мягкие

породы мощностью  $h_0$  (рис. 3). Заключительным этапом является рекультивация. Мощность насыпного слоя потенциально плодородных пород после усадки должна быть не менее 1,0 м [20].

Объём вскрышных пород ( $m^3$ ), складированный в карьерной выемке смежного участка двумя продольными отвальными заходками, определяется выражением:

$$V_2 = \sum_{i=1}^{N=2} V_i =$$

$$= (A_1 0,7 H_{кв} L_{кв} + 0,5 A_2 0,7 H_{кв} L_{кв}) k^{-1} / K_p, \quad (12)$$

где  $V_i$  – объём  $i$ ,  $2$  отвальной заходки,  $m^3$ ;  $A_1$ ,  $A_2$  – ширина первой и второй отвальной заходки, м;  $H_{кв}$  – глубина карьерной выемки, м.

### III. Продольное отвалообразование тремя заходками

Вскрышные породы складированы в карьерную выемку экскаватором-драглайном тремя отвальными заходками в карьерную выемку на полную её глубину до 70 м (рис. 4). Первоначально бульдозер создаёт скользящий съезд и пионерную насыпь для установки на ней экскаватора-драглайна (рис. 4). Драглайн создаёт приёмную яму для разгрузки в ней вскрышных пород автомобильным транспортом. Драглайн черпает вскрышную породу из приёмной ямы и складировывает её на радиус разгрузки первой продольной отвальной заходкой на полную глубину карьерной выемки (рис. 4, I). Далее экскаватор складировывает вскрышные породы вдоль фронта отвальных работ до торца карьерной выемки. Для снижения расстояний автотранспортирования вскрышных пород бульдозер создаёт второй скользящий съезд (рис. 4, II). Драглайн перемещается вдоль фронта отвальных работ до средней части торца карьерной выемки. После завершения складирования вскрышных пород первой продольной отвальной заходкой экскаватор-драглайн перемещается в обратном направлении вдоль другого борта карьера и складировывает вскрышные породы на радиус разгрузки второй продольной отвальной заходкой в среднюю часть карьерной выемки (рис. 4, II). Изменяя направление фронта отвальных работ, драглайн складировывает вскрышные породы в оставшуюся третью часть карьерной выемки (рис. 4, III).

Вскрышные породы укладываются в карьерную выемку с учётом осадки слоя пород ( $h_1, h_2$ ) на величину 1,5–3,0 м (рис. 4). После завершения насыпки карьерной выемки складированы мягкие породы мощностью  $h_0$  (рис. 4). Заключительным этапом является рекультивация. Мощность насыпного слоя потенциально плодородных пород после усадки должна быть не менее 1,0 м [20].

Транспортирование вскрышных пород автосамосвалами может осуществляться как с первого, так и со второго скользящего съезда (рис. 4, II).

Объём вскрышных пород ( $m^3$ ), складированный в карьерной выемке смежного участка тремя продольными отвальными заходками, определяется выражением:

$$V_3 = \sum_{i=1}^{N=3} V_i = \frac{\left( A_1 H_{KB} L_{KB} + A_2 0,54 H_{KB} L_{KB} + \right. \\ \left. + 0,5 A_2 0,45 H_{KB} L_{KB} + \right. \\ \left. + 0,5 A_3 0,54 H_{KB} L_{KB} \right) k^{-1}}{K_p}, \quad (13)$$

где  $V_i$  – объём 1, 2, 3 отвальной заходки, м<sup>3</sup>;  $A_1, A_2, A_3$  – ширина первой, второй и третьей отвальной заходки, м;  $H_{KB}$  – глубина карьерной выемки, м.

#### IV. Бульдозерное отвалообразование в карьерной выемке

Вскрышные породы складываются в карьерную выемку (глубиной до 100 м) смежного участка с применением бульдозера и автомобильного транспорта послойно.

Отвалообразование вскрышных пород в карьерной выемке с применением бульдозера и автомобильного транспорта осуществляется в следующем порядке (рис. 6). Складирование вскрышных пород в карьерной выемке осуществляется послойно снизу вверх. Транспортирование вскрышных пород осуществляется автомобильным транспортом по дорогам, которые остались в карьерной выемке. Первоначально разгрузка породы осуществляется автомобильным транспортом на дне карьерной выемки, по всей ее длине. При этом для устойчивости складирования породы в его основание должны укладываться скальные и полускальные породы. Далее бульдозер создает первый ( $h_{сл1}$ ) и второй ( $h_{сл2}$ ) слой отвальных пород, складываемый на дне карьерной выемки ( $H_1$ ).

При изменении направления движения бульдозера на противоположное, вскрышные породы складываются во втором слое ( $h_{сл2}$ ) при заполнении дна карьерной выемки ( $H_1$ ) (рис. 6).

В дальнейшем операции по отсыпке второго яруса ( $H_2$ ) и складированию породы ( $h_{сл3}, h_{сл4}$ ) повторяются в той же последовательности.

Вскрышные породы укладываются в карьерную выемку с учётом осадки слоя пород ( $h_1, h_2$ ) на величину 1,5–3,0 м (рис. 5). После завершения засыпки карьерной выемки складываются мягкие породы мощностью  $h_0$  (рис. 5). Заключительным этапом является рекультивация. Мощность насыпного слоя потенциально плодородных пород после усадки должна быть не менее 1,0 м [20].

#### V. Поперечное отвалообразование двумя и более заходками

Вскрышные породы складываются в карьерную выемку смежного участка драглайном и поперечными отвальными заходками на полную её глубину (до 30 м).

Первоначально бульдозер создаёт скользящий съезд и пионерную насыпь на борту карьера для установки на ней драглайна (рис. 6). Драглайн создаёт приёмную яму для разгрузки вскрышной породы автосамосвалами (рис. 6, I).

Драглайн черпает вскрышную породу из приёмной ямы и складывает её по всей ширине отвальной заходки до противоположного борта карьерной выемки на полную её глубину (рис. 6). Далее драглайн изменяет направление фронта отвальных работ на противоположное и складывает вскрышные породы до противоположного торца карьерной выемки. Завершающим этапом складирования породы является засыпка оставшейся торцевой части карьерной выемки. Вскрышные породы укладываются в карьерную выемку с учётом осадки слоя пород ( $h_1, h_2$ ) на величину 1,5–3,0 м (рис. 6). После завершения засыпки карьерной выемки складываются мягкие породы мощностью  $h_0$  (рис. 6). Заключительным этапом является рекультивация. Мощность насыпного слоя потенциально плодородных пород после усадки должна быть не менее 1,0 м [20].

В качестве отвального оборудования принят экскаватор-драглайн ЭШ 10.70 (ЭШ 10.100), автосамосвал БелАЗ-75491 грузоподъёмностью 75 т и бульдозер ДЗ-34С (Dressta 15-M).

**Таблица 2.** Условия применения технологической схемы отвалообразования драглайном в карьерной выемке смежного участка

**Table 2.** Conditions of applying the flow diagram of dumping by dragline excavator in borrow excavation of the adjacent area

Показатели Indicators	Обозначение Designation	Значение Value
Глубина карьерной выемки, м Depth of the borrow excavation, m	$H_{KB}$	30–100
Ширина карьерной выемки (в плане), м Width of the quarry (in plan), m	$B_{KB}$	до 290
Расстояние между карьерными полями, км Distance between open pit mining, km	$L$	0,1–2,0
Вид транспорта Type of transport	$Type$	Автомобильный Auto
Грузоподъёмность автосамосвала, т Load capacity of a dump truck, t	$q$	75
Оборудование на отвале Equipment on the heap	$Equipment$	Драглайн Dragline
Вместимость ковша, м <sup>3</sup> Bucket capacity, m <sup>3</sup>	$E$	10
Устойчивый угол откоса отвала, град. Stable angle of slope of the blade, degree	$\alpha_0$	38
Размеры разгрузочной площадки, м: Dimensions of the unloading site, m: – длина/length; – ширина/width	$L_{\Pi}$ $B_{\Pi}$	18 12
Глубина приёмной ямы, м Depth of receiving pit, m	$h_{\Pi}$	5
Длина зоны разгрузки автосамосвала, м Length of the discharge area of the dump truck, m	$L_p$	25

При разработке технологических схем отвалообразования вскрышных пород в карьерной выемке

ке (рис. 2–6) приняты параметры карьерной выемки в плане: длина 1,0 км и ширина 133–290 м. Условия применения технологической схемы отвалообразования драглайнами ЭШ-10.70 и ЭШ-10.100 представлены в табл. 2, 3.

**Таблица 3.** Расчётные показатели при отвалообразовании вскрышных пород

**Table 3.** Calculated values at overburden dumping

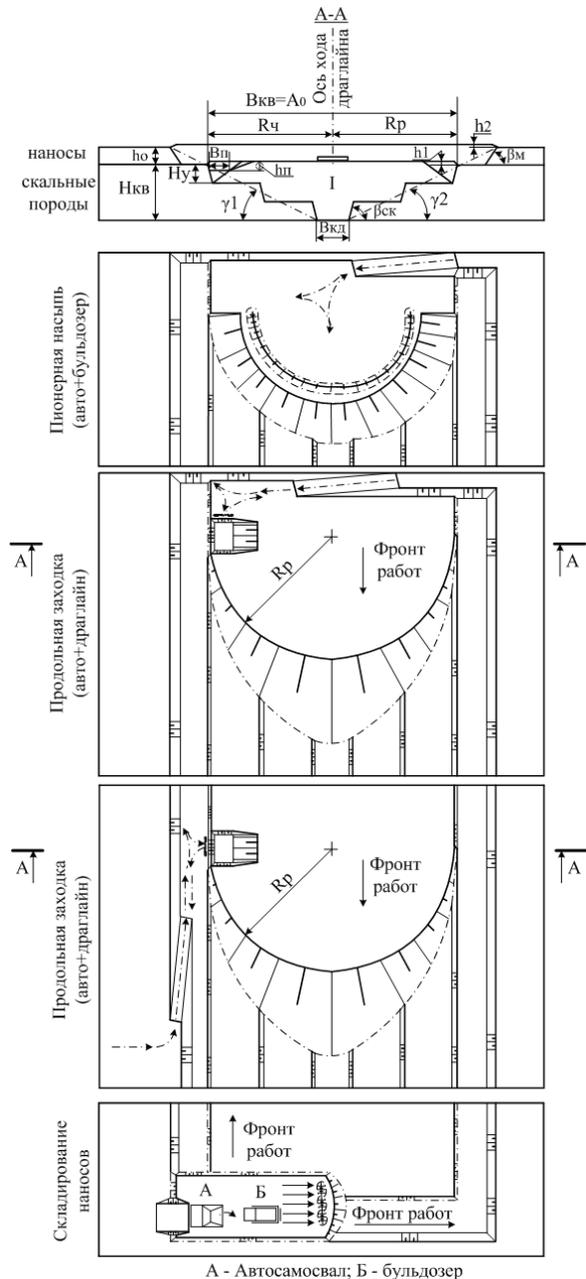
Показатели Indicators	Экскаватор/Excavator	
	ЭШ-10.70 Esh-10.70	ЭШ-10.100 Esh-100.100
Вместимость ковша экскаватора, м <sup>3</sup> Excavator bucket capacity, m <sup>3</sup>	10,0	
Длина стрелы, м Length of a boom, m	70,0	100,0
Радиус разгрузки, м Unloading radius, m	66,5	91,5
Ширина отвальной заходки, м Width of blade failure, m	133,0	183,0
Продолжительность цикла экскавации, с Duration of the excavation cycle, s	57,0	60,0
Коэффициент наполнения ковша Bucket filling factor	0,80	
Количество рабочих смен в году Number of shifts per year	756	
Коэффициент, учитывающий остаточное разрыхление породы в отвале The coefficient that takes into account the residual loosening of the rock in the heap	1,06–1,15	
Производительность экскаватора Excavator capacity		
сменная ( $Q_{ЭСМ}$ ), м <sup>3</sup> exchangeable ( $Q_{ЭСМ}$ ), m <sup>3</sup>	2806	2666
годовая ( $Q_{ЭГ}$ ), млн м <sup>3</sup> yearly ( $Q_{ЭГ}$ ), million m <sup>3</sup>	1,693	1,608

На рис. 2–6 приняты обозначения: угол откоса отвала ( $\alpha_0$ )  $\alpha_0=38^\circ$ ;  $\gamma_1, \gamma_2$  – углы откосов борта карьерной выемки, град.;  $\beta_{ск}, \beta_{м}$  – углы откосов уступов в карьерной выемке по коренным и мягким породам, град.;  $R_c, R_p$  – радиус черпания и разгрузки, м.;  $h_1, h_2$  – высота верхнего и нижнего отвала, м;  $h_0$  – мощности наносов, м;  $V_{кд}$  – ширина карьерной выемки по дну, м;  $L_{кд}$  – длина карьерной выемки по дну, м;  $V_{п}$  – ширина приемной ямы, м;  $H_y$  – высота уступа, м;  $h_{п}$  – глубина приемной ямы, м.

К технологии горных работ, наряду с экономичностью и безопасностью, должны предъявляться следующие требования по рациональному использованию земель [21]:

1. Добыча полезных ископаемых должна быть наименее земельной, т. е. расход земельных ресурсов на единицу добытого минерального сырья должен быть минимальным.
2. В процессе строительства карьера и эксплуатации месторождения режим нарушения и восстановления земель должен быть наиболее благоприятным, т. е. разрыв во времени между нарушением и восстановлением земель должен быть минимальным, а основная часть нарушений

(особенно плодородных участков) должна переноситься на более поздний период разработки.



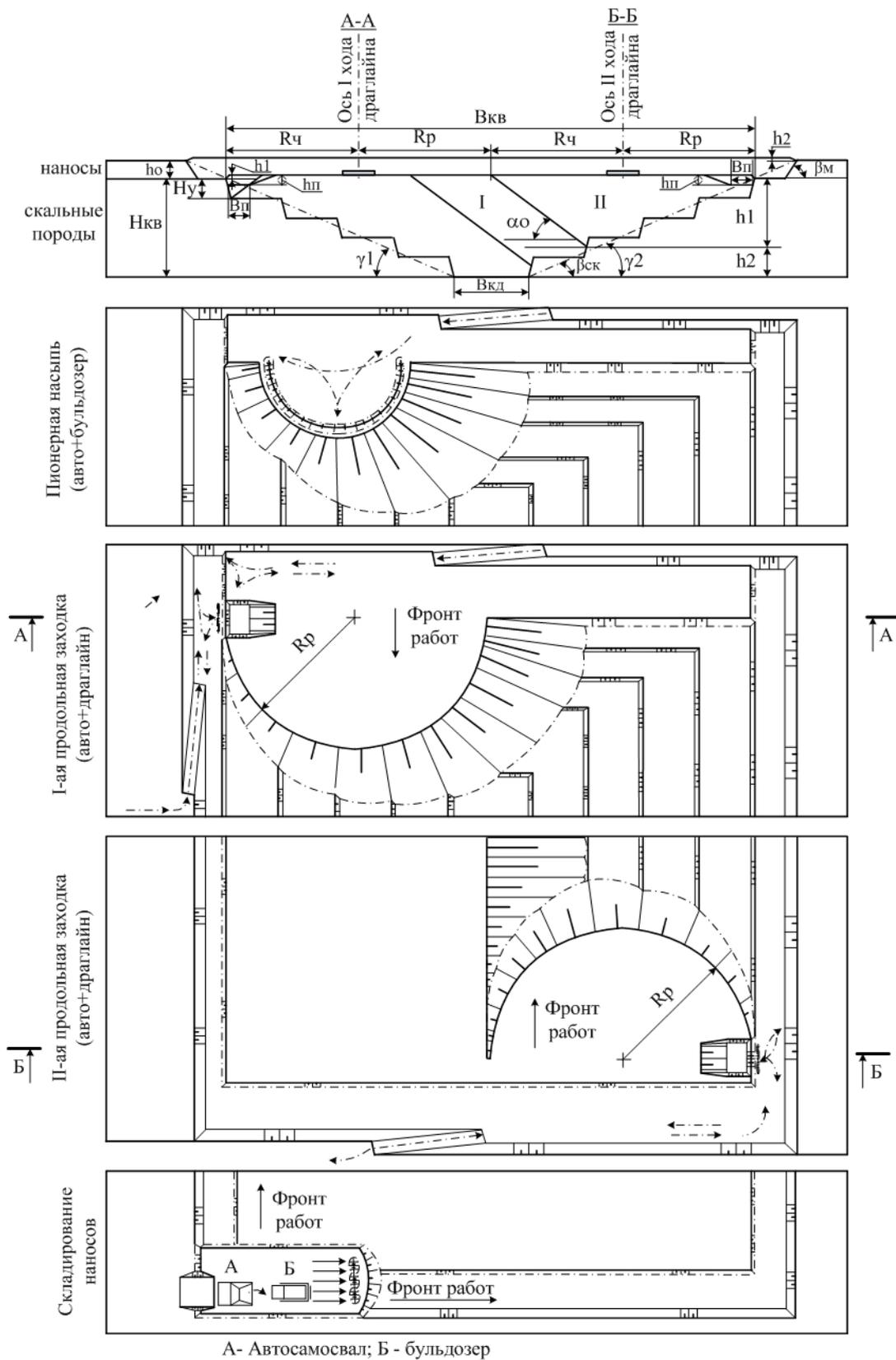
**Рис. 2.** Технологическая схема отвалообразования вскрышных пород драглайном в карьерной выемке смежного участка одной продольной заходкой

**Fig. 2.** Flow diagram of overburden dumping by dragline excavator in borrow excavation of the adjacent area

Следовательно, с учётом второго требования по рациональному использованию земель необходимо определить время складирования вскрышных пород (лет) в карьерной выемке смежного участка:

$$T_{ск} = \frac{V}{Q_{ЭГ}}, \quad (14)$$

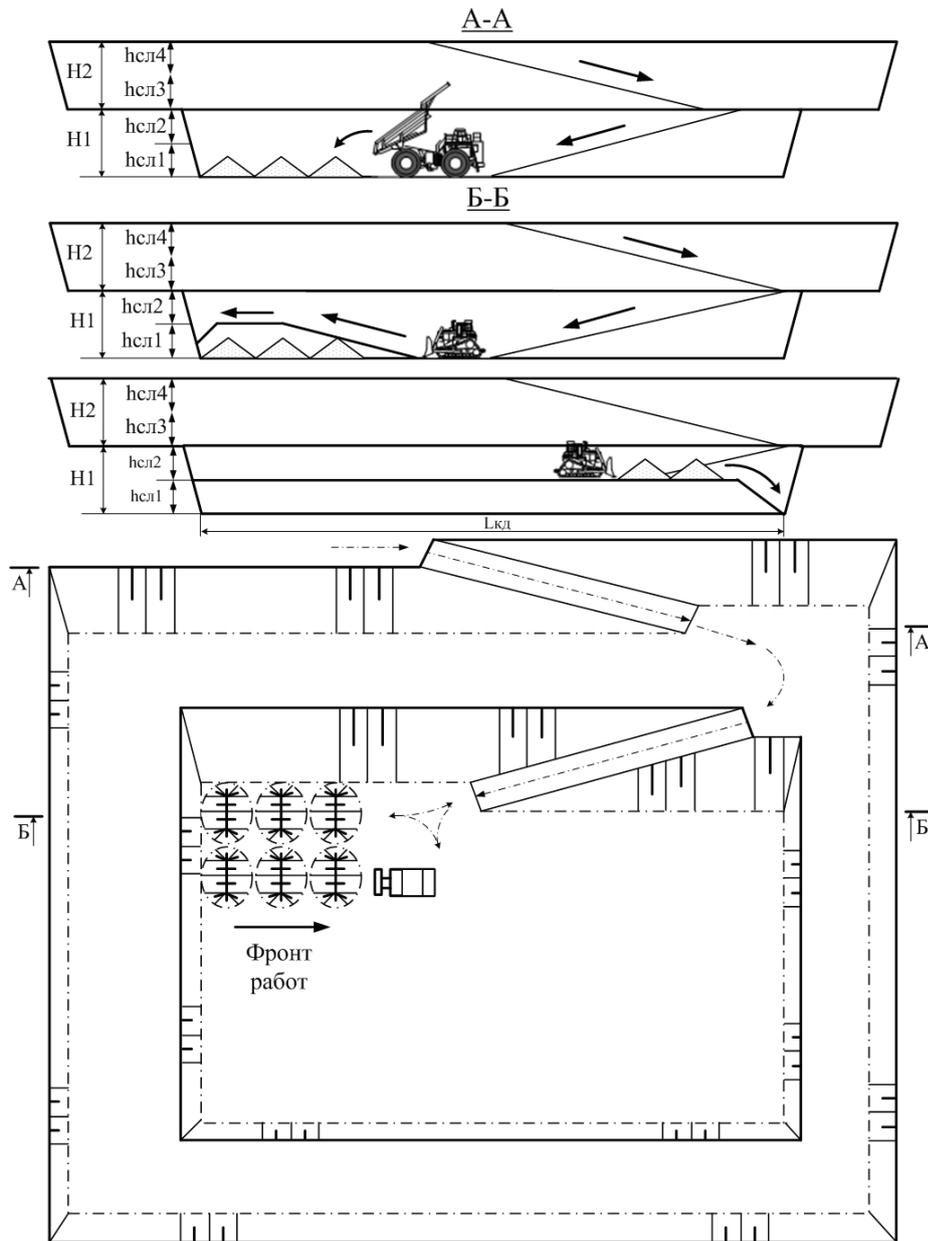
где  $V$  – объём вскрышных пород, складированный в карьерной выемке, м<sup>3</sup>/г;  $Q_{ЭГ}$  – эксплуатационная производительность экскаватора драглайна [22], м<sup>3</sup>/г.



**Рис. 3.** Технологическая схема отвалообразования вскрышных пород драглайном в карьерной выемке смежного участка двумя продольными заходками

**Fig. 3.** Flow diagram of overburden dumping by dragline excavator in borrow excavation of the adjacent area in two longitudinal cuts





**Рис. 5.** Технологическая схема отвалообразования вскрышных пород в карьерной выемке смежного участка с применением бульдозера и автомобильного транспорта

**Fig. 5.** Flow diagram of overburden dumping by dragline excavator in borrow excavation of the adjacent area with a bulldozer and road transport

В результате расчетов по формуле (14) установлено время складирования вскрышных пород в карьерной выемке смежного участка (табл. 4).

В качестве критерия оценки эффективности отвалообразования вскрышных пород в карьерной выемке смежного участка приняты стоимостные затраты (р./м<sup>3</sup>) в зависимости от отвального оборудования определяются по формулам (15)–(23):

- драглайн и автотранспорт

$$C_{\text{ОД}} = C_A + C_0 + C_B; \quad (15)$$

- бульдозер и автотранспорт

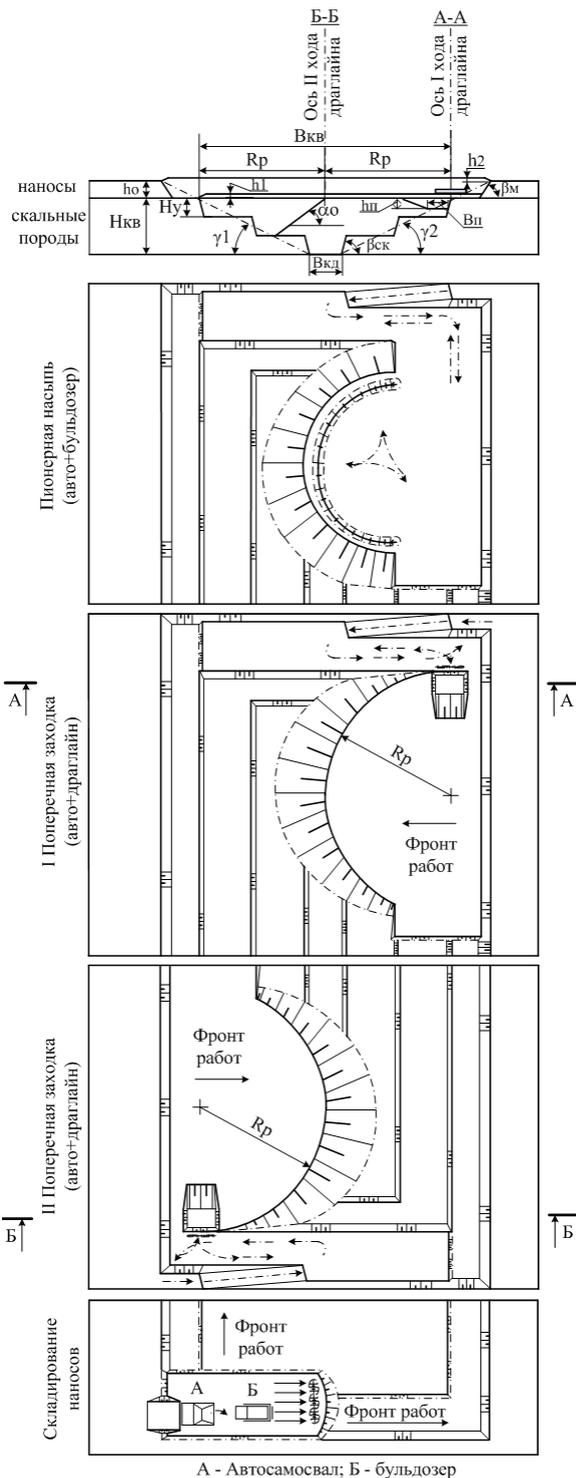
$$C_{\text{ОБ}} = C_A + C_B, \quad (16)$$

где  $C_A$  – стоимостные затраты на автотранспортирование, р/м<sup>3</sup>;  $C_0$  – стоимостные затраты на отвалообразование с применением драглайна, р/м<sup>3</sup>;  $C_B$  – стоимостные затраты на отвалообразование с применением бульдозера, р/м<sup>3</sup>.

Стоимостные затраты автотранспортирования вскрышных пород (р/м<sup>3</sup>) составляет:

$$C_A = \frac{C_{\text{М.А.}}}{Q_{\text{А.СМ}}}, \quad (17)$$

где  $C_{\text{М.А.}}$  – стоимость машино-смены автосамосвала, р;  $Q_{\text{А.СМ}}$  – сменная производительность автосамосвала при транспортировке вскрышных пород, м<sup>3</sup>.



**Рис. 6.** Технологическая схема отвалообразования вскрышных пород драглайном в карьерной выемке смежного участка поперечными заходками

**Fig. 6.** Flow diagram of overburden dumping by dragline excavator in borrow excavation of the adjacent area in transverse cuts

Стоимость машино-смены автосамосвала БелАЗ (р/смену) рассчитывается в зависимости от его грузоподъемности по выражению:

$$C_{MC.A} = 461,6q^{0,82}, \quad (18)$$

где  $q$  – грузоподъемность автосамосвала, т.

**Таблица 4.** Время складирования вскрышных пород в карьерной выемке смежного участка

**Table 4.** Time of storage of overburden in borrow excavation of the adjacent area

Наименование Name	Глубина карьерной выемки ( $H_{KB}$ ), м Depth of borrow excavation ( $H_{KB}$ ), m		
	30	50	70
Длина карьерной выемки, км Length of borrow excavation, km	0,2–0,5	0,5–1,0	0,5–1,0
Коэффициент, учитывающий размер карьерной выемки, $k$ Coefficient considering the size of borrow excavation, $k$	1,94–1,79	0,98–0,93	1,24–1,11
Объем вскрышных пород ( $V$ ), млн $m^3$ Volume of overburden ( $V$ ), million $m^3$	0,41–1,11	3,56–7,55	7,68–17,06
Время складирования вскрышных пород ( $T_{CK}$ ), лет Time of storage of overburden ( $T_{CK}$ ), years	0,24–0,66	2,10–4,46	4,53–10,07

Сменная производительность автосамосвала при транспортировке вскрышных пород определялась по выражению:

$$Q_{A.CM} = Q_{A.T} T_{CM} k_{HA}, \quad (19)$$

где  $Q_{A.T}$  – техническая производительность автосамосвала,  $m^3/ч$ ;  $T_{CM}$  – продолжительность смены ( $T_{CM}=8$ ), ч;  $k_{HA}$  – коэффициент использования автосамосвала в течение смены ( $k_{HA}=0,7-0,85$ ) [15].

Стоимостные затраты на отвалообразование вскрышных пород экскаватором- драглайном в карьерной выемке,  $p/m^3$ :

$$C_o = \frac{C_{MC}^{ЭШ}}{Q_{Э.CM}^{ЭШ}}, \quad (20)$$

где  $C_{MC}^{ЭШ}$  – стоимость машино-смены экскаватора драглайна,  $p$ ;  $Q_{Э.CM}^{ЭШ}$  – сменная производительность экскаватора драглайна при отвалообразовании вскрышных пород в карьерной выемке [30],  $m^3$ .

Стоимость машино-смены экскаватора драглайна,  $p/см$ :

$$C_{MC}^{ЭШ} = 316E_{ЭШ} + 6599, \quad (21)$$

где  $E_{ЭШ}$  – вместимость ковша экскаватора драглайна,  $m^3$ .

Стоимостные затраты на отвалообразование с применением бульдозера,  $p/m^3$ :

$$C_B = k_C \frac{C_{MC}^B}{Q_{B.CM}}, \quad (22)$$

где  $k_C$  – коэффициент, учитывающий долю стоимостных затрат (на создание пионерной насыпи и скользящего съезда бульдозером  $k_C=0,10-0,15$ ; на

бульдозерное отвалообразование  $k_c=1,0$ );  $C_{МС}^B$  – стоимость машино-смены бульдозера, р/см;  $Q_{ВСМ}$  – сменная производительность бульдозера [30],  $m^3/см$ .

**Таблица 5.** Техничко-экономическая оценка автотранспортирования и отвалообразования вскрышных пород при групповом расположении угольных разрезов

**Table 5.** Feasibility calculations of transportation by cars and overburden at group location of open cuts

Наименование Name	Отвалообразование/Dumping				
	Внешний отвал External dump		Карьерная выемка Borrow excavation		
Длина дорог в карьере, км Length of roads in the quarry, km	2,13				
Длина стационарных дорог, км Length of stationary roads, km	0,10	7,00	0,10	2,00	0,10
Длина дорог на отвале (с учётом съездов), км Length of roads on the dump (taking into account ramps), km	1,16		–		
Длина дороги до места разгрузки в карьерной выемке, км Length of the road to the unloading point in the borrow excavation, km	–		0,67	0,67	2,13
Расстояние транспортирования, км Transportation distance, km	3,39	10,29	2,90	4,80	4,36
Производительность автосамосвала, $m^3/см$ Dump truck capacity, $m^3/cm$	491,4	303,8	545,2	459,8	353,9
Стоимостные затраты на автотранспортирование ( $C_A$ ), р/ $m^3$ Cost of road transportation ( $C_A$ ), rbs/ $m^3$	32,39	52,39	29,19	34,61	44,97
Стоимостные затраты на отвалообразование, р/ $m^3$ Cost dumping of overburden ( $C_o$ ), r/ $m^3$	36,07	56,07	33,23	38,64	49,00

Примечание. Стоимостные затраты по технологии рассчитаны при глубине карьера и карьерной выемки 70 м.

Note. Costs were calculated at borrow pit and borrow cut depth of 70 m.

Стоимость машино-смены бульдозера, р/см:

$$C_{МС}^B = 1400V_B - 560, \quad (23)$$

где  $V_B$  – вместимость отвала бульдозера,  $m^3$ .

В общем виде экономия стоимостных затрат (р) на транспортирование вскрышных пород определяется выражением [30]:

$$\Delta = V_i(C_{A1} - C_{A2}), \quad (24)$$

где  $V_i$  – объём вскрышных пород, складываемый в карьерной выемке ( $i$ -отвальной заходкой),  $m^3$ ;  $C_{A1}$  – стоимостные затраты на автотранспортирование

вскрышных пород от забоя карьера до внешнего отвала, р/ $m^3$ ;  $C_{A2}$  – стоимостные затраты на автотранспортирование вскрышных пород от забоя карьера до места разгрузки в карьерной выемке смежного отвала, р/ $m^3$ .

В результате расчётов по формуле (24) установлены стоимостные затраты на транспортирование 1 млн  $m^3$  вскрышных пород автосамосвалом БеАЗ-75491 грузоподъёмностью 75 т при расстоянии транспортирования 2,9 км до карьерной выемки смежного участка, в сравнении с внешним отвалом, расположенным на расстоянии 3,39 км, составляет 3,2 млн р.

В табл. 5 представлена технико-экономическая оценка автотранспортирования и отвалообразования вскрышных пород до карьерной выемки и внешнего отвала при групповом расположении угольных разрезов Караканского месторождения (рис. 1).

### Выводы

1. При групповом расположении участков открытой угледобычи (Кузнецкий угольный бассейн, Караканское месторождение) для снижения изъятия земельных ресурсов необходимо складировать вскрышные породы в карьерных выемках смежных участков (прежних пользователей недр).
2. Предложена методика определения расстояний автотранспортирования вскрышных пород до карьерной выемки и внешнего отвала.
3. Предложен землесберегающий способ отвалообразования вскрышных пород при открытой разработке угольных месторождений.
4. Разработаны технологические схемы отвалообразования вскрышных пород в карьерной выемке (глубиной до 100 м) смежного участка с применением драглайна, бульдозера и автомобильного транспорта.
5. Время складирования вскрышных пород в карьерной выемке: длиной 0,2–0,5 км и глубиной 30 м составляет 0,2–0,6 года. С увеличением глубины карьерной выемки от 50 до 70 м и длины 0,5–1,0 км время складирования составит 2,1–10,0 лет.
6. Экономия стоимостных затрат на транспортирование 1 млн  $m^3$  вскрышных пород автосамосвалом БеАЗ-75491 грузоподъёмностью 75 т при расстоянии транспортирования 2,9 км до карьерной выемки смежного участка, в сравнении с внешним отвалом, расположенным на расстоянии 3,39 км, составляет 3,2 млн р.
7. Расчётами установлено, что наименьшие стоимостные затраты (32,23 р/ $m^3$ ) обеспечиваются способом отвалообразования вскрышных пород с карьерной выемкой смежного участка, расположенной на расстоянии 0,1 км.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курехин Е.В. Анализ взаимного расположения карьерных полей на угольных месторождениях Кузбасса // Современные тенденции и инновации в науке и производстве: Материалы III Международной науч.-практ. конф. – Междуреченск, 2–4 апреля 2014. 2014. – С. 45–46.
2. Курехин Е.В. Обоснование технологических комплексов оборудования для разработки угольных разрезов малой производственной мощности с учётом показателей эффективности использования земельных ресурсов // ФТПРПИ. – 2015. – № 5. – С. 35–42.
3. Гавришев С.Е., Бурмистров К.В., Колонюк А.А. Интенсивность формирования рабочей зоны глубоких карьеров: монография. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. тех. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. – 189 с.
4. Закон РФ от 21.02.1992 г. № 2395–1 (ред. от 30.12.2012. Статья 17.1) «О недрах». URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_343/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_343/) (дата обращения: 10.02.2017).
5. Постановление коллегии Администрации Кемеровской области «Об утверждении «Порядка определения размера арендной платы, порядка, условий и сроков внесения арендной платы за использование земельных участков, государственная собственность на которые не разграничена, на территории Кемеровской области» (от 5 февраля 2010 года № 47, с изменениями на 19 сентября 2013 года). URL: <http://docs.cntd.ru/document/990309922> (дата обращения: 10.02.2017).
6. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» (утверждены приказом Ростехнадзора от 11.12.2013, № 599, зарегистрированы в Минюсте России 02.06.2014 г. № 32935). Сер. 03. Вып. 78. – М.: ЗАО НТЦ исследований проблем промышленной безопасности, 2014. – 276 с.
7. Ческидов В.И. Очередность отработки пологих и наклонных угольных пластов с размещением вскрышных пород во внутренних отвалах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 1999. – 52 с.
8. Lee V.B. A Landslide victory // Coal Age. – 2011. – № 5 (116). – P. 48–52.
9. Lee V.B. Back from the Brink // Coal Age. – 2011. – № 8 (116). – P. 48–52.
10. Carter R. Tracks & Treads: Dozers and Loaders Dig into Production Support Roles // Coal Age. – 2011. – № 2 (117). – P. 29–33.
11. Steve F. A new World Order for Mining OEMs. Cat integrates Bucyrus and unveils its future intentions // Coal Age. – 2011. – № 10 (116). – P. 30–35.
12. Schmidt D. The Art of the Move. Top Texas lignite producer Luminant takes on not just one, but four, major dragline moves – and with enviable results // Coal. – 2015. – № 11 (120). – P. 24–27.
13. Fiscor S. North American Coal Opens Coyote Creek. A refurbished AC-powered dragline moves overburden for new lignite mining operation // Coal. – 2016. – № 5 (121). – P. 20–25.
14. Sharp R., Constancon Ch. New Options for Dragline Maintenance Optimize Production Performance. Technological innovations can help optimize and in some cases reduce maintenance and inspection workloads // Coal. – 2016. – № 8 (121). – P. 34–37
15. Study on new pattern of semi-continuous mining system used in surface mines / Ch. Shu-zhao, C. Qing-xiang, Zh. Wei, Zh. Lei // The 6<sup>th</sup> International Conference on Mining Science & Technology. Procedia Earth and Planetary Science 1. – Amsterdam, the Netherlands, 2009. – P. 243–249.
16. Arshi An. Reclamation of coalmine overburden dump through environmental friendly method // Saudi Journal of Biological Sciences. – 2017. – № 24. – P. 371–378.
17. Atmospheric dispersion modelling of the fugitive particulate matter from overburden dumps with numerical and integral models / K.E. Kakosimos, M.J. Assael, Jh.S. Lioumbas, A.S. Spiridis // Atmospheric Pollution Research. – 2011. – № 2. – P. 24–33.
18. Vegetation succession and soil infiltration characteristics under different aged refuse dumps at the Heidaigou opencast coal mine / Huang Lei, Zhang Peng, Hu Yigang, Zhao Yang // Global Ecology and Conservation. – 2015. – № 4. – P. 255–263.
19. Environmental assessment and nano-mineralogical characterization of coal, overburden and sediment from Indian coal mining acid drainage / Madhulika Dutta, Jyotilima Saikia, S.R. Taffarel, F.B. Waanders, D. de Medeiros, C.M.N.L. Cutruneo, L.F.O. Silva, B.K. Saikia // Geoscience Frontiers. – 2017. – № XXX. – P. 1–13.
20. Connolly M., Jessetta A. Integrated Support Centres – the future of dragline fleet monitoring // Procedia Engineering. – 2014. – № 83. – P. 90–99.
21. Mapping surface deformation in open pit iron mines of Carajás Province (Amazon Region) using an integrated SAR analysis / W.R. Paradella, A. Ferretti, J.C. Mura, D. Colombo, F.F. Gama, A. Tamburini, A.R. Santos, F. Novali, M. Galoc, P.O. Camargo, A.Q. Silva, G.G. Silva, A. Silva, L.L. Gomes // Engineering Geology. – 2015. – № 193. – P. 61–78.
22. Ржевский В.В. Открытые горные работы. Ч. 2. Технология и комплексная механизация. – М.: Недра, 1985. – 552 с.
23. Типовые технические схемы ведения горных работ на угольных разрезах. Корпорация «Уголь России». Российская фирма «Уголь открытых работ». Научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт по достижению полезных ископаемых открытым способом. – М.: Недра, 1982. – 405 с.
24. Типовые технологические схемы ведения горных работ на угольных разрезах. Корпорация «Уголь России». Российская фирма «Уголь открытых работ». Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт по добыче полезных ископаемых открытым способом. НИИОГР. – Челябинск, 1991. – 350 с.
25. Альбом оптимальных инженерных решений при производстве горно-вскрышных работ в нетиповых условиях на строительстве и реконструкции разрезов. – Кемерово: КузНИИшахтстрой, 1989. – 168 с.
26. Межгосударственный стандарт. Охрана природы земли. Классификация нарушенных земель для рекультивации. ГОСТ 17.5.1.02–85. – Охрана природы. Земли: Сб. ГОСТов. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002. – 9 с.
27. Деревяшкин И.В. Основы горного дела. Открытые горные работы. – М.: Изд-во МГОУ, 2011. – 259 с.
28. Бурмистров К.В., Заляднов В.Ю. Процессы открытых горных работ. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. Гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. – 222 с.
29. Открытые горные работы / сост.: М.М. Шамсутдинов, Э.В. Луллин. – Бишкек: Изд-во КРСУ, 2015. – 182 с.
30. Сысоев А.А., Литвин О.И., Литвин Я.О. Инженерно-экономические расчеты при обосновании технологических решений на разрезах. – Кемерово: КузГТУ, 2015. – 127 с.

Поступила 03.04.2017 г.

## Информация об авторах

**Курехин Е.В.**, кандидат технических наук, доцент кафедры открытых горных работ Горного института Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачёва.

UDC 622.271

## FLOW DIAGRAMS OF OVERBURDEN DUMPING IN BORROW EXCAVATION OF THE ADJACENT AREA

**Evgeny V. Kurekhin,**

ogdm@yandex.ru

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,  
28, Vesenniyaya street, Kemerovo, 650000, Russia.

*The relevance of the discussed issue is caused by group location of open pit mining and by restriction of areas for outside dumping. The development of open mining of coal deposits in areas with a group location is facilitated by relatively low investments, rapid commissioning, low cost of aton of coal. It should be noted that the development of a large number of sites with limited reserves deteriorates ecological situation. In this regard, in order to solve the long-term development of open works in Kuzbass, the requirements to reduce the negative impact on ecology of the region by coal mines are put forward. One of the directions for solving this issue is the design of the technology for developing plots, taking into account the requirements of the environment and, first of all, the reduction of the land absorption by dumping rock in the internal dumps and in borrow excavation of the adjacent area.*

**The main aim** of the study is to develop the technology of overburden dumping in a borrow excavation of the adjacent area and feasibility study of a new method; to justify the parameters of longitudinal and transverse overburden dumping in a borrow excavation of the adjacent area using dragline, dozer and automobile transport; to develop the technique for determining overburden transportation distances at their group location in open pit mining; to develop the technological schemes of overburden dumping in a borrow excavation of the adjacent area applying Microsoft Office Visio.

**The methods used in the study:** system analysis in the study of spatial arrangement of the open areas of coal mining, modeling overburden dumping and feasibility calculations using the software (Microsoft Office Excel).

**The results.** The author has developed the techniques of overburden dumping in a borrow excavation of the adjacent area with longitudinal and transverse storage. Land-saving dumping increases the efficiency of open coal mining. The use of a borrow excavation of the adjacent section will allow reducing the cost of overburden transportation by road. The proposed technological schemes can be used in designing new areas of open coal mining with group location.

### Key words:

Open pit mining, group location of open pit mining, overburden storage, borrow excavation of the adjacent area, transport distance, excavator-dragline, technological schemes of dumping in borrow excavation.

### REFERENCES

1. Kurekhin E.V. Analiz vzaimnogo raspolozheniya karyernykh poley na ugolnykh mestorozhdeniyakh Kuzbassa [Analysis of relative location of mine fields in coal deposits of Kuzbass]. *Materialy III Mezhdunarodnoy naucho-prakicheskoy konferentsii* [Proc. of the III International Scientific-Practical Conference]. Mezhdurechensk, 2014. pp. 45–46.
2. Kurekhin E.V. Obosnovaniye tekhnologicheskikh kompleksov oborudovaniya dlya razrabotki ugolnykh razrezov maloy proizvodstvennoy moshchnosti s uchedom pokazateley effektivnosti ispolzovaniya zemelnykh resursov [Substantiation of technological complexes of equipment for developing coal mines of small production capacity, taking into account indicators of land use efficiency]. *Journal of Mining Science*, 2015. vol. 51, no. 5, pp. 35–42.
3. Gavrishev S.E., Burmistrov K.V., Kolonyuk A.A. *Intensivnost formirovaniya rabochey zony glubokikh karyerov* [Intensity of formation of working zone of deep quarries]. Magnitogorsk, G.I. Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ. house, 2013. 189 p.
4. Zakon RF. 21.02.1992 g. № 2395–1. 30.12.2012. Statya 17.1. *O nedrah* [Law of the Russian Federation. On the bowels]. Available at: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_343/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_343/) (accessed 10 February 2017).
5. Postanovleniye kollegii Administratsii Kemerovskoy oblasti «Ob utverzhdenii «Poryadka opredeleniya razmera arendnoy platy, poryadka, usloviy i srokov vneseniya arendnoy platy za ispolzovaniye zemelnykh uchastkov, gosudarstvennaya sobstvennost na kotorye ne razgranichena, na territorii Kemerovskoy oblasti» No. 47 (05.02.2010, 19.09.2013) [The Decree of the Board of the Kemerovo Region Administration «On Approval of the Procedure for Determining the Size of Rent, the Procedure, Terms and Time of Making a Rent for the Use of Land Plots, State Ownership of Which Is Not Separated, in the Territory of the Kemerovo Region». No. 47 (05.02.2010, 19.09.2013)]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/990309922> (accessed 10 February 2017).
6. *Federalnye normy i pravila v oblasti promyshlennoy bezopasnosti «Pravila bezopasnosti pri vedenii gornykh rabot i pererabotke tverdykh poleznykh iskopayemykh» (utverzhdeny prikazom Rostekhnadzora (11.12.2013, № 599, zaregistrirrovany v Minyuste Rossii 02.06.2014 g. № 32935, Ser. 03, Vyp 78.)* [Federal rules and regulations in the field of industrial safety «Safety rules for mining and processing of solid minerals». Moscow, 2014. 276 p.
7. Cheskidov V.I. *Ocherednost otrabotki pologikh i naklonnykh ugolnykh plastov s razmeshcheniem vskryshnykh porod vo vnutrennikh otvalakh. Dis. Dokt. nauk* [The order of mining of shallow and inclined coal seams with overburden placement in internal dumps. Dr. Diss]. Novosibirsk, 1999. 52 p.
8. Lee B.B. A Landslide victory. *Coal Age*, 2011, no. 5 (116), pp. 48–52.
9. Lee B.B. Back from the Brink. *Coal Age*, 2011, no. 8 (116), pp. 48–52.
10. Carter R. Tracks & Treads: Dozers and Loaders Dig into Production Support Roles. *Coal Age*, 2011, no. 2 (117), pp. 29–33.
11. Steve F. A new World Order for Mining OEMs. Cat integrates Bucyrus and unveils its future intentions. *Coal Age*, 2011, no. 10 (116), pp. 30–35.
12. Schmidt D. The Art of the Move. Top Texas lignite producer Luminant takes on not just one, but four, major dragline moves – and with enviable results. *Coal*, 2015, no. 11 (120), pp. 24–27.
13. Fiscor S. North American Coal Opens Coyote Creek. A refurbished AC-powered dragline moves overburden for new lignite mining operation. *Coal*, 2016, no. 5 (121), pp. 20–25.

14. Sharp R., Constancon Ch. New Options for Dragline Maintenance Optimize Production Performance. Technological innovations can help optimize and in some cases reduce maintenance and inspection workloads. *Coal*, 2016, no. 8 (121), pp. 34–37.
15. Shu-zhao Ch., Qing-xiang C., Wei Zh., Lei Zh. Study on new pattern of semi-continuous mining system used in surface mines. *The 6<sup>th</sup> International Conference on Mining Science & Technology. Procedia Earth and Planetary Science 1*. Amsterdam, the Netherlands, 2009. pp. 243–249.
16. Arshi An. Reclamation of coalmine overburden dump through environmental friendly method. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2017, no. 24, pp. 371–378.
17. Kakosimos K.E., Assael M.J., Lioumbas Jh.S., Spiridis A.S. Atmospheric dispersion modelling of the fugitive particulate matter from overburden dumps with numerical and integral models. *Atmospheric Pollution Research*, 2011, no. 2, pp. 24–33.
18. Huang Lei, Zhang Peng, Hu Yigang, Zhao Yang. Vegetation succession and soil infiltration characteristics under different aged refuse dumps at the Heidaigou opencast coal mine. *Global Ecology and Conservation*, 2015, no. 4, pp. 255–263.
19. Madhulika Dutta, Jyotilima Saikia, Taffarel S.R., F Waanders.B., De Medeiros D., Cutruneo C.M.N.L., Silva L.F.O., Saikia B.K. Environmental assessment and nano-mineralogical characterization of coal, overburden and sediment from Indian coal mining acid drainage. *Geoscience Frontiers*, 2017, no. XXX, pp. 1–13.
20. Connolly M., Jessetta A. Integrated Support Centres – the future of dragline fleet monitoring. *Procedia Engineering*, 2014, no. 83, pp. 90–99.
21. Paradella W.R., Ferretti A., Mura J.C., Colombo D., Gama F.F., Tamburini A., Santos A.R., Novali F., Galoc M., Camargo P.O., Silva A.Q., Silva G.G., Silva A., Gomes L.L. Mapping surface deformation in open pit iron mines of Carajás Province (Amazon Region) using an integrated SAR analysis. *Engineering Geology*, 2015, no. 193, pp. 61–78.
22. Rzhvsky V.V. *Otkrytye gornye raboty. Ch. 2. Tekhnologiya i kompleksnaya mekhanizatsiya* [Open mining operations. P. 2. Technology and complex mechanization]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 552 p.
23. Tipovye tekhnologicheskiye skhemy vedeniya gornykh rabot na ugolnykh razrezakh (ministerstvo ugolnoy promyshlennosti SSSR [Typical technological schemes of mining on coal cuts (Ministry of Coal Industry of the USSR)]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 405 p.
24. Tipovye tekhnologicheskiye skhemy vedeniya gornykh rabot na ugolnykh razrezakh [Typical technological schemes for mining operations on coal mines]. Chelyabinsk, NII OGR, 1991. 350 p.
25. *Albom optimalnykh inzhenernykh resheniy pri proizvodstve gornovskryshnykh rabot v netipovykh usloviyakh na stroitelstve i rekonstruktsii razrezov* [Album of optimal engineering solutions at mining and overburden works in atypical conditions for construction and reconstruction of sections]. Kemerovo, KuzNI-Ishakhtstroy Publ., 1989. 168 p.
26. *Mezhhgosudarstvenny standart. Okhrana prirody zemli. Klassifikatsiya narushennykh zemel dlya rekultivatsii. GOST 17.5.1.02–85. – Okhrana prirody. Zemli. Sb. GOSTov* [Interstate standard. Protection of the nature of the earth. Classification of disturbed lands for reclamation. SS 17.5.1.02–85. Protection of Nature]. Moscow, IPK Publishing Standards, 2002. 9 p.
27. Derevyashkin I.V. *Osnovy gornogo dela. Otkrytye gornye raboty* [Fundamentals of mining. Open mining operations]. Moscow, MGOU Publ., 2011. 259 p.
28. Burmistrov K.V., Zalyadnov V.Yu. *Protsessy otkrytykh gornykh rabot* [Open mining]. Magnitogorsk, G.I. Nosova Magnitogorsk State Technical University Press, 2014. 222 p.
29. Shamsutdinov M.M., Lupinin E.V. *Otkrytye gornye raboty* [Open mining]. Bishkek, KRSU Publ., 2015. 182 p.
30. Sysoev A.A., Litvin O.I., Litvin Ya.O. *Inzhenerno-ekonomicheskie raschety pri obosnovanii tekhnologicheskikh resheniy na razrezakh* [Engineering and economic calculations in substantiating technological decisions on sections]. Kemerovo, KuzGTU Publ., 2015. 127 p.

Received: 3 April 2017.

#### Information about the authors

**Evgeny V. Kurekhin**, Cand. Sc., associate professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University.

УДК 553.08 + 553.063

## РЕДКИЕ ЩЕЛОЧНЫЕ МЕТАЛЛЫ В СЛЮДАХ МИАРОЛОВЫХ ПЕГМАТИТОВ ЖИЛЫ ШАХДАРИНСКОЙ (ЮГО-ЗАПАДНЫЙ ПАМИР)

Соколова Екатерина Николаевна<sup>1,2</sup>,  
ekaterina@igm.nsc.ru

Смирнов Сергей Захарович<sup>2,3</sup>,  
ssmr@igm.nsc.ru

Кунгулова Эльвира Нурфасовна<sup>3</sup>,  
kun2609@mail.ru

Королюк Владимир Николаевич<sup>2</sup>,  
camebax@igm.nsc.ru

**Коноваленко Сергей Иванович<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2.

<sup>2</sup> Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

*Работа посвящена минералогии субредкометалльных турмалиноносных миароловых гранитных пегматитов жилы Шахдаринской, ЮЗ Памир. Расшифровка закономерностей образования и распределения литиевой, рубидиевой и цезиевой минерализации в жиле Шахдаринской имеет большое значение для понимания поведения редких металлов при кристаллизации наиболее низкотемпературных пегматитовых и редкометалльно-гранитных расплавов. Целью данной работы является минералого-геохимическая характеристика пегматитов жилы Шахдаринская, химический анализ и классификация слюд, сопоставление их состава с особенностями минералообразующей среды.*

*В работе впервые опубликованы результаты минералого-геохимического изучения турмалиноносных миароловых пегматитов жилы Шахдаринская, сделана попытка сопоставления особенностей состава слюд и среды их кристаллизации.*

*Для получения результатов использованы методы оптической микроскопии, рамановской спектроскопии, рентгеноспектрального микроанализа (волно-дисперсионной спектрометрии и энерго-дисперсионной спектрометрии), вторично-ионной масс-спектрометрии.*

*Исследованы минералы из трех выделенных структурно-вещественных комплексов жилы: кварц-двуполевошпатового, который слагает основной объем жилы; из околомаролового кварц-альбит-слюдистого комплекса; а также из миароловой полости, стенки которой сложены кристаллами кварца, слюдой и альбитом. Установлено, что темные слюды кварц-полевошпатового комплекса представлены аннит-сидерофиллитом, обогащенным Li, Ta, Nb и Rb. В околомароловом и миароловом комплексах они сменяются на триоктаэдрические фтористые литиевые слюды, наиболее близкие по составу к полилитиониту. Наиболее ранние литиевые слюды имели повышенное содержание Mn и Fe, которые в краевых частях и слюдах миаролы практически отсутствуют. Важной особенностью данных полилитионитов является повышенные концентрации Rb<sub>2</sub>O – до 1,2 мас. %, и Cs<sub>2</sub>O – до 0,6 мас. %. Показано, что от околомаролового к миароловому комплексу увеличивается доля цезия по отношению к рубидию. На основании исследований расплавных и флюидных включений в кварце установлено, что кристаллизация литиевых слюд, обогащенных рубидием и цезием, происходила из сред с аномально высокими концентрациями редких щелочей и других редких и летучих элементов.*

### **Ключевые слова:**

Цезий, миароловый пегматит, Памир, жила Шахдаринская, слюда, полилитионит.

### **Введение**

Пегматитовые поля ЮЗ Памира входят в состав Памиро-Гималайского гранит-лейкогранитового пояса, протягивающегося с северо-запада на юго-восток вдоль горных сооружений Памира, Гиндукуша, Каракорума и Гималаев. Особенностью пояса является широкое развитие проявлений редкометалльного магматизма как в виде массивов редкометалльных Li-F гранитов, так и в виде пегматитовых полей с Li и комплексной Li-Cs-Ta специализацией [1, 2]. С давних времен по сегодняшний

день пегматиты ЮЗ Памира и прилегающих областей афганского Бадахшана и пакистанского Гиндукуша являются примером богатых редкими минералами парагенезисов, источником ювелирного сырья (аквамарин, воробьевит, цветной турмалин) и коллекционных образцов [3, 4]. Сподуменовые пегматиты рассматриваются как источник руд редких металлов (Li, Ta, Sn).

Данная работа посвящена минералогии миароловых гранитных пегматитов жилы Шахдаринской, Юго-Западный Памир. Наряду с жилами

Вездаринской и Лесхозовской, она относится к субредкометалльным пегматитам кристаллоносной формации, турмалинового минерагенетического ряда [2]. По классификации, широко используемой в иностранных публикациях, эти пегматиты относятся к классу редкоэлементных, типу LCT (Li-Cs-Ta) [5].

Жила Вездаринская представляет собой мелкое промышленное месторождение пьезотурмалина [2]. Жилы Лесхозовская и Шахдаринская промышленной значимости не имеют. Несмотря на небольшие размеры, все эти жилы обладают минеральными комплексами с богатой и разнообразной редкометалльной минерализацией. При исследовании околомиароловых и миароловых минеральных ассоциаций жилы Шахдаринской были обнаружены литиевые слюды с высоким содержанием рубидия и цезия, ранее не описанные для пегматитов данного региона.

Расшифровка закономерностей образования и распределения литиевой, цезиевой и рубидиевой минерализации в жиле Шахдаринской имеет большое значение для понимания поведения редких металлов при кристаллизации наиболее низкотемпературных пегматитовых и редкометалльно-гранитных расплавов.

Целью работы является минералого-геохимическая характеристика пегматитов жилы Шахдаринская, химический анализ и классификация слюд, сопоставление их состава с особенностями минералообразующей среды.

#### Геологическое положение, строение и состав пегматитов

Для миароловых пегматитов ЮЗ Памира характерны малые размеры (мощность не более 6 м и протяженность не более 100 м) и рассеянная форма проявлений [3]. Некоторые представлены только одной жилой (например, ж. Вездаринская). Регион уникален по минеральному разнообразию. Здесь известно более 100 минералов, в пегматитах открыто три новых минерала [3].

Пегматитовая жила Шахдаринская находится на правом берегу реки Шахдара, левого притока реки Гунт в пределах южных отрогов Шугнанского хребта (ЮЗ Памир, Таджикистан). Она пересекает турмалин-содержащие гранат-биотитовые гнейсы Шахдаринской серии, которые датируются археем–протерозоем. Происхождение таких пегматитов связывают с высокоглиноземистыми двуслюдяными гранит-лейкогранитами и гнейсогранитами с гранатом и кордиеритом памиро-шугнанского комплекса [6]. Связь эта устанавливается косвенно по геологическим признакам (пегматиты являются наиболее поздними магматическими образованиями региона) и по трековым датировкам апатита, которые дают возраст  $3,2-7,5 \pm 0,2$  млн лет [3]. Несмотря на кажущуюся генетическую связь между альпийскими гранитами и миароловыми пегматитами, последние не проявляют какой-либо пространственной связи с ними.

Под жилой Шахдаринской подразумевают серию небольших жил, которую можно представить как разветвленное пегматитовое тело с множеством апофиз. В большинстве случаев контакты с гнейсами секущие, хотя в некоторых местах наблюдаются постепенные переходы из гнейса в пегматит. Крупные апофизы жилы имеют собственные названия: Лепдолитовая и Седло, которые можно рассматривать как самостоятельные жилы. Собственно жилой Шахдаринской называют наиболее крупное тело протяженностью около 10 м. Основной объем жилы сложен кварц-двуполевошпатовыми комплексами с аплитовой, гранитной, графической, и пегматоидной структурами (около 60 % объема). В меньшей степени развит микроклиновидный блоковый комплекс (около 40 % объема). Ясная зональность в этих пегматитах отсутствует. К раздувам и осевой части апофиз приурочены миароловые полости размером от нескольких сантиметров до 0,5 м. Они окружены блоковым калишпатом либо кварц-альбитовыми и альбит-слюдистыми околомиароловыми комплексами с редкометалльной минерализацией (рис. 1).

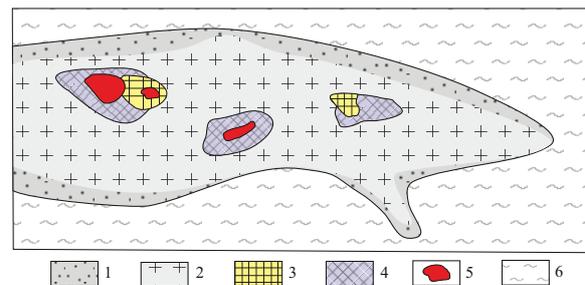


Рис. 1. Схема строения пегматитовой жилы Шахдаринская: 1–5 – структурно-вещественные комплексы пегматитовой жилы: 1–3 – кварц-двуполевошпатовый комплекс (1 – краевая зона, 2 – полевошпатовая зона, 3 – блоковая зона); 4 – околомиароловый комплекс; 5 – миароловый комплекс; 6 – гнейсы шахдаринской серии

Fig. 1. Schematic geologic sketch of the Shakhdarinskaya vein: 1–5 are different mineral assemblages: 1–3 are the quartz-two-feldspar (1 is the border zone, 2 is the feldspar zone, 3 is the blocky zone); 4 is the nearmiarolitic assemblage; 5 is the miarolitic assemblage; 6 is the Shakhdara gneiss

#### Материалы и методы

В работе использованы образцы кварц-полевошпатового комплекса (89–159 и 89–156), околомиаролового комплекса (ПШ-6 и ПШ-АХ-1) и миаролового комплекса (Ш-мк-1) жилы Шахдаринской (сборы С.И. Коноваленко). Описание образцов проведено макроскопически, а также в плоскопараллельных пластинках с помощью оптического поляризационного микроскопа Olympus BX-51.

Первичная идентификация минеральных видов слюд проводилась методом рамановской спектроскопии (или КР-спектроскопии) на спектрометре Horiba Lab Ram HR 800 с полупроводниковым детектором Horiba Scientific Symphony II, охлаж-

даемым жидким азотом (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск). Возбуждение проводилось твердотельным лазером с длиной волны 532 нм и мощностью 50 мВт.

Состав минералов определялся методами рентгеноспектрального микроанализа. Методом волнодисперсионной спектроскопии (ВДС) минералы исследовались на электронно-зондовых микроанализаторах Cameca Camebax Micro и JEOL JXA-8100 (ЦКП МИИ ИГМ СО РАН). Некоторые анализы выполнены методом энерго-дисперсионной спектроскопии (ЭДС) на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Tescan Mira 3 LMU (ЦКП МИИ ИГМ СО РАН, г. Новосибирск).

ВДС анализы проводились при ускоряющем напряжении 20 кВ. Ток зонда выбирался 30–50 нА и диаметр электронного пучка 2–4 мкм. Калибровка приборов осуществлялась по лабораторным стандартам: природным альбиту (Na), ортоклазу (K, Al), диопсиду (Ca), синтетическому фтор-флюопиту (K, Al, Si, F), Cl-апатиту (Cl), гранату (Mn), ильмениту (Ti), синтетическим молибдату Nd и Cs (Cs) и вольфрамату Nd и Rb (Rb). Пределы обнаружения для элементов-примесей составили (1 $\sigma$ , мас. %): TiO<sub>2</sub> 0,013; FeO 0,029; MnO 0,021; MgO 0,018; BaO 0,113; CaO 0,011; Na<sub>2</sub>O 0,024; K<sub>2</sub>O 0,010; Rb<sub>2</sub>O 0,015; Cs<sub>2</sub>O 0,03; F 0,16; Cl 0,01.

Для ЭДС анализов ток зонда составлял 1 нА, диаметр зонда 10 нм, анализ проводился сканированием площадки 5×5 мкм. Стабильность параметров съемки контролировалась периодическим измерением интенсивности линии K $\alpha$  чистого кобальта. Правильности полученных результатов контролировалась периодической съемкой стандартов, использованных при калибровке.

Прямое измерение лития, а также содержания других редких и рассеянных элементов (Cs, Rb, Li, Ba, Sr, Be, V, P3Э, Y, Zr, Hf, Nb, Ta, Th, U, Cl) в минералах проводилось методом вторично-ионной масс-спектрометрии (SIMS) на ионно-зондовом микроанализаторе Cameca IMS-4f (Ярославский филиал ФТИАН РАН, г. Ярославль). Калибровка масс определяемых элементов проводилась по стандарту NIST 610. Для оценки фоновых концентраций воды измерялся состав оливина (как безводного эталона) из ксенолита шпинелевого лерцолита р. Шаварын-Царам, Монголия. В качестве внутреннего стандарта использовалась концентрация кремния в анализируемой фазе, определенная методом рентгеноспектрального микроанализа. Каждый анализ представлял среднее из пяти аналитических циклов, с общим временем набора сигнала 40–60 мин. Диаметр пучка составлял 20 мкм.

В образцах каждого из комплексов изучены включения минералообразующих сред в кварце. Определение состава дочерних минералов во флюидных включениях проводилось методом КР-спектроскопии. Состав предварительно прогретых и гомогенизированных стекол расплавных включений

определен методами рентгено-спектрального анализа и вторично-ионной масс-спектрометрии.

Содержание главных породообразующих окислов, F и Cl в закаленных стеклах расплавных включений определялось методом ВДС рентгено-спектрального анализа при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе зонда 10 нА и диаметре зонда 5 мкм. При расчете концентраций учитывались, что в ходе анализа водосодержащих силикатных стекол происходит потеря Na.

#### Минералогия жилы Шахдаринской

По особенностям соотношения и составов минеральных комплексов жилы Шахдаринская, наряду с Лесхозовской и Вездаринской, относится к вездаринскому типу [3]. Они схожи по набору главных и второстепенных минералов, а также по своему строению.

#### Минеральный состав комплексов

Двуполевошпатовые комплексы краевых и центральных частей жилы состоят из альбита, калиевого полевого шпата и кварца. В соответствии с данными рентгеноструктурного анализа калиевые полевые шпаты представлены ортоклазом ( $t_1=0,9-1,1$ ). В их составе отмечается примесь BaO, которая в некоторых случаях может достигать 0,24–0,88 мас. %. Содержание Rb<sub>2</sub>O редко достигает предела обнаружения 0,08 мас. %. Микроскопическое исследование показывает, что калиевые полевые шпаты этих комплексов содержат пертиты альбита.

Второстепенными минералами двуполевошпатовых комплексов являются гранат альмандин-спессартинового ряда, турмалин шерл-дравитового ряда и слюда, характеристика которой будет дана ниже. В качестве редких мелких зерен и включений в породообразующих минералах установлены ильменит, уранинит, циркон с повышенными содержаниями U и Hf, иксиолит с высоким содержанием W, танталит-колумбит, ксенотим и апатит.

Околомиароловый кварц-альбит-слюдистый комплекс Шахдаринской жилы представляет собой мелкозернистый агрегат белого альбита с зернами кварца и крупными кристаллами бесцветной, кремовой или коричневатой слюды. В качестве второстепенных минералов присутствуют топаз и гранат альмандин-спессартинового ряда и турмалин (эльбаит или оленит-эльбаит). Для этого комплекса характерна разнообразная редкометаллическая минерализация. В качестве отдельных зерен и включений в породообразующих минералах обнаружены силикаты бериллия (фенакит или берtrandит), вольфрамит, касситерит, танталит-колумбит, минералы рода пироклора, апатит, триплит и рутил.

Стенки миароловых полостей жилы Шахдаринской выстланы кристаллами кварца, реже калиевого полевого шпата и слюды. Из акцессорных минералов в качестве кристаллических включений в кварце наиболее часто встречается топаз, а также отмечены единичные иголки брукита.

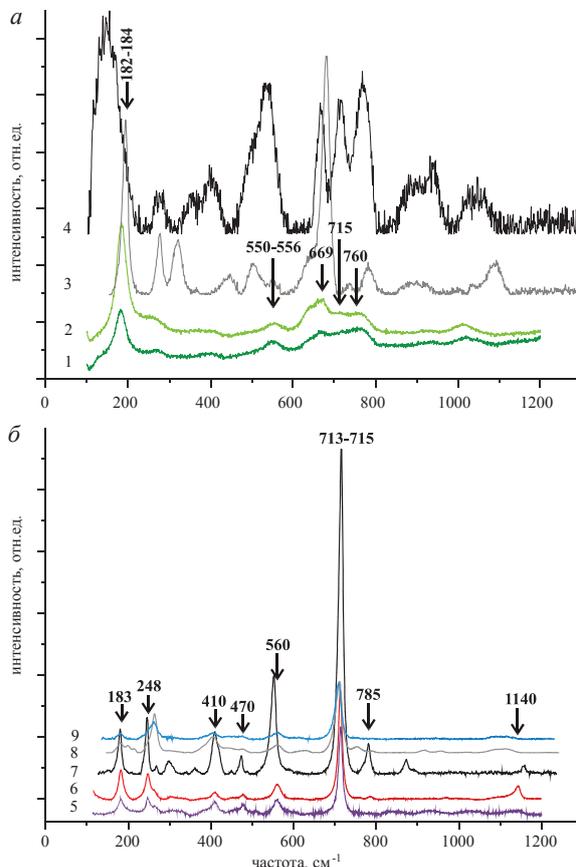
Слюды

Слюда кварц-полевошпатовых комплексов (ап-литового и двуполевошпатового пегматоидного) образует равномерную вкрапленность мелких кристалликов в кварц-полевошпатовой массе. В шлифах и пластинках они имеют темную окраску и характерный для минералов ряда флогопит-аннит плеохроизм. Напротив, в околомароловых комплексах слюда имеет светлую окраску и дает крупные листоватые или таблитчатые выделения, иногда достигающие 2–3 см. В апофизе Седло встречаются сиреневые слюды. В миаролах обнаружена бесцветная или жемчужно-белая слюда, образующая гребенчатые агрегаты на кристаллах кварца или полевого шпата.

Спектры комбинационного рассеяния (рамановские спектры) слюд двуполевошпатового и околомаролового комплексов представлены на рис. 2. Наиболее сильная линия в спектрах темных слюд (рис. 2, а) из двуполевошпатового комплекса имеет волновое число в диапазоне 182–184  $\text{см}^{-1}$ . В диапазоне 500–800  $\text{см}^{-1}$  наблюдается серия линий умеренной интенсивности, пики которых располагаются в диапазонах 550–556 и 670–765  $\text{см}^{-1}$ . Последний диапазон включает три линии с волновыми числами 669, 715 и 760  $\text{см}^{-1}$ . Соотношение интенсивностей линий в нем варьирует в различных кристаллах, что заставляет предположить, что их величина может зависеть от ориентировки кристалла по отношению к лазерному лучу. Такое поведение линий характерно для высокожелезистых триоктаэдрических слюд. В частности, полученные нами спектры удовлетворительно совпадают со спектрами железистых биотитов. Характерно, что увеличение железистости триоктаэдрических слюд ряда флогопит-аннит (биотитов) отражается в увеличении интенсивности линий 550 и 700–770  $\text{см}^{-1}$ . Максимальных значений они достигают в аннитах (рис. 2, а). Таким образом, полученные нами спектры темных слюд двуполевошпатового комплекса позволяют интерпретировать их как триоктаэдрические железистые слюды – анниты или сидерофиллиты.

В спектрах светлых слюд из околомаролового комплекса и миарол в низкочастотном диапазоне присутствуют узкие умеренно интенсивные линии с волновыми числами 183 и 248  $\text{см}^{-1}$ , более сильные у миароловых слюд и менее интенсивные у слюд околомаролового комплекса. Последняя линия имеет сложное строение и включает пик при 248  $\text{см}^{-1}$  и плечо на 260  $\text{см}^{-1}$ , которое у околомароловых слюд обособляется в самостоятельную линию 263  $\text{см}^{-1}$ . В диапазоне 300–500  $\text{см}^{-1}$  в спектрах присутствуют линии с числами 410 и 470  $\text{см}^{-1}$ , которые в спектрах миароловой слюды слабые, а у слюд околомаролового комплекса обладают умеренной интенсивностью. В отличие от темных слюд наиболее интенсивная линия наблюдается в диапазоне волновых чисел от 713 до 715  $\text{см}^{-1}$ . Этой линии сопутствуют слабые линии 660, 760 и 785  $\text{см}^{-1}$ , которые хорошо проявлены в спектрах слюд из ми-

ролы (рис. 2, б). Кроме этого, линии умеренной интенсивности наблюдаются на 560 и 1140  $\text{см}^{-1}$ . Причем последняя отмечается только в спектрах миароловых слюд и имеет ассиметричную форму и возможно является результатом суперпозиции нескольких линий в диапазоне от 1080 до 1140  $\text{см}^{-1}$ .



**Рис. 2.** Рамановские спектры биотита из кварц-полевошпатового комплекса (а) и литиевых слюд из околомаролового и миаролового комплексов (б) пегматитовой жилы Шахдаринской в сравнении с эталонными спектрами. Условные обозначения: 1, 2, 5, 6 – слюды жилы Шахдаринской (1, 2 – биотиты, 5 – литиевые слюды из околомаролового комплекса, 6 – литиевые слюды из миаролового комплекса); 3, 4, 7–9 – эталонные спектры слюд (из базы данных ruff.info): 3 – флогопит, 4 – аннит, 7, 8 – полилитионит, 9 – трилитионит

**Fig. 2.** Raman spectra of biotite from the quartz-feldspar assemblage (a) and lithium-rich micas from nearmiarolitic and miarolitic assemblages (b) of the Shakhdarinskaya vein in comparison with standard spectra. 1, 2, 5, 6 are the micas from the Shakhdarinskaya vein (1, 2 are the biotites; 5 is the Li-micas from nearmiarolitic assemblage, 6 is the Li-micas from miarole); 3, 4, 7–9 are the standard spectra from the ruff.info database (3 is the phlogopite, 4 is the annite, 7 and 8 are the polyolithionite, 9 is the trilithionite)

Структура спектра светлых слюд миарол и околомаролового комплекса не соответствует ни триоктаэдрическим Mg-Fe слюдам, ни диоктаэдрическим слюдам ряда мусковит-парагонит. Изученные слюды миаролы и околомаролового

комплекса вероятно являются полилитионитами или наиболее литиевыми членами ряда трилитионит–полилитионит. Сильная линия в области 700–715 см<sup>-1</sup> является результатом колебаний связей вблизи мостикового кислорода анионного радикала и очень сильно зависит от содержания лития [7]. У литиевых слюд линия, отвечающая этим колебаниям, расположена при 710–715 см<sup>-1</sup>. Причем волновое число увеличивается от трилитионитов и лепидолитов (708–711 см<sup>-1</sup>) к полилитионитам (711–715 см<sup>-1</sup>) [8].

**Таблица 1.** Состав биотита из кварц-двуполевошпатового комплекса пегматитовой жилы Шахдаринская

**Table 1.** Composition of biotites from the quartz-two-feldspar assemblage of the Shakhdarinskaya vein

Образец Sample	89-159 (49-1)	89-159 (49-2)	89-159 (51-1)	89-159 (51-2)
SiO <sub>2</sub>	33,76	34,05	34,41	34,20
TiO <sub>2</sub>	3,44	3,56	3,54	3,51
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,36	18,41	18,32	18,13
CaO	0,014	0,022	н.п.о./bdl	0,026
MnO	0,61	0,62	0,66	0,66
MgO	2,30	2,29	2,27	2,29
FeO	27,53	27,65	28,17	27,99
ZnO	0,15	0,14	0,13	0,12
Na <sub>2</sub> O	0,18	0,17	0,11	0,14
K <sub>2</sub> O	9,00	9,02	9,03	8,64
Rb <sub>2</sub> O	0,09	0,10	0,08	0,15
Cs <sub>2</sub> O	0,03	н.п.о./bdl	0,01	н.п.о./bdl
F	0,87	0,85	0,84	0,86
Cl	0,034	0,005	0,021	0,018
(OH)*	2,35	2,35	2,54	2,54
Li <sub>2</sub> O*	0,21	0,21	0,19	0,19
Сумма-F Total-F	98,55	99,08	99,96	99,11
Формульные коэффициенты (на 11 атомов O) Formula units per 11 O atoms				
Si	2,68	2,68	2,7	2,7
Ti	0,21	0,21	0,21	0,21
Al	1,72	1,71	1,69	1,69
Ca	0,001	0,002	–	0,002
Mn	0,04	0,04	0,04	0,04
Mg	0,27	0,27	0,27	0,27
Fe	1,83	1,82	1,85	1,85
Zn	0,01	0,01	0,01	0,01
Na	0,03	0,03	0,02	0,02
K	0,91	0,91	0,9	0,87
Rb	0,005	0,005	0,004	0,008
Cs	0,0008	–	0,0004	–
F	0,22	0,21	0,21	0,21
Cl	0,005	0,0007	0,003	0,002
Li	0,07	0,07	0,06	0,06
Al (VI)	0,4	0,39	0,39	0,39
Al (IV)	1,32	1,32	1,3	1,3
□	0,06	0,06	0,08	0,1

Примечание: образец 89–159. Содержания приведены в мас. %. \* – данные вторично-ионной масс-спектрологии. н.п.о. – ниже предела обнаружения.

Note: sample 89–159. Concentrations are given in wt. %; \* are the SIMS data; bdl – below the detection limits.

По данным рентгеноспектрального микроанализа составы слюд из кварц-полевошпатового, околониаролового и миаролового комплексов также делятся на две контрастные группы (табл. 1, 2). К первой группе относятся слюды из кварц-полевошпатового комплекса (табл. 1). По соотношению Al-Fe-Mg в октаэдрическом слое они относятся к биотитам ряда аннит-сидерофиллит. Для них характерно повышенное содержание фтора около 0,9 мас. % при малых количествах хлора (0,02–0,03 мас. %). Содержание воды составляет около 2,4 мас. % (табл. 3). Из примесных элементов обращают на себя внимание повышенные концентрации Li (около 0,2 мас. % Li<sub>2</sub>O), Zn (0,12–0,15 мас. % ZnO) и Mn (около 0,7 мас. % MnO). Концентрации Ta и Nb составили около 54 и 1200 г/т соответственно. Для биотитов характерно пониженное содержание В, Ва, Sr и РЗЭ. Содержания Rb и Cs, определенные методом SIMS, составили около 1800 и 134–173 г/т соответственно. Таким образом, по данным микроаналитических исследований, темные слюды кварц-полевошпатового комплекса можно охарактеризовать как обогащенные Li, Ta, Nb и Rb аннит-сидерофиллиты.

Слюды второй группы встречаются в парагенезисах околониаролового и миаролового комплексов. Это высокофтористые литиевые слюды (табл. 2). Для них характерно высокое отношение Si/Al=10–20 в кремнекислородном радикале, что приближает их составы к тетракремниевым слюдам. Высокое содержание лития было подтверждено методом SIMS. Однако величины этих содержания (8–9 мас. % Li<sub>2</sub>O) выходят за рамки использованных калибровок и вероятнее всего завышены. По этой причине содержание лития оценивалось из содержания фтора по формуле для литиевых слюд из аплитов и гранитных пегматитов: Li<sub>2</sub>O=0,697\*F+1,026 [9]. В соответствии с этими оценками содержание лития в слюдах околониаролового и миаролового комплекса составило около 7,0–7,6 мас. % Li<sub>2</sub>O. Точки составов слюд из околониаролового и миаролового комплексов на диаграмме R<sup>3+</sup>-Li-R<sup>2+</sup> ложатся в окрестности состава полилитионита (рис. 3, а), что хорошо согласуется и с содержанием фтора, и с соотношением Si/Al (ф.е.).

Данные рентгеноспектрального микроанализа показывают, что в отличие от кварц-полевошпатовых комплексов, слюды околониароловой и миароловой ассоциаций содержат большое количество фтора. По данным этих анализов его содержание в слюдах из миарол может достигать 9,7 мас. %, а в слюдах околониаролового комплекса – 8,7 мас. %. Что составляет 1,8–2,0 ф.е. Таким образом, слюды описываемых комплексов являются максимально фтористыми. Определенное методом SIMS содержание воды в слюдах околониаролового комплекса составило 0,3–0,35 мас. % (табл. 3).

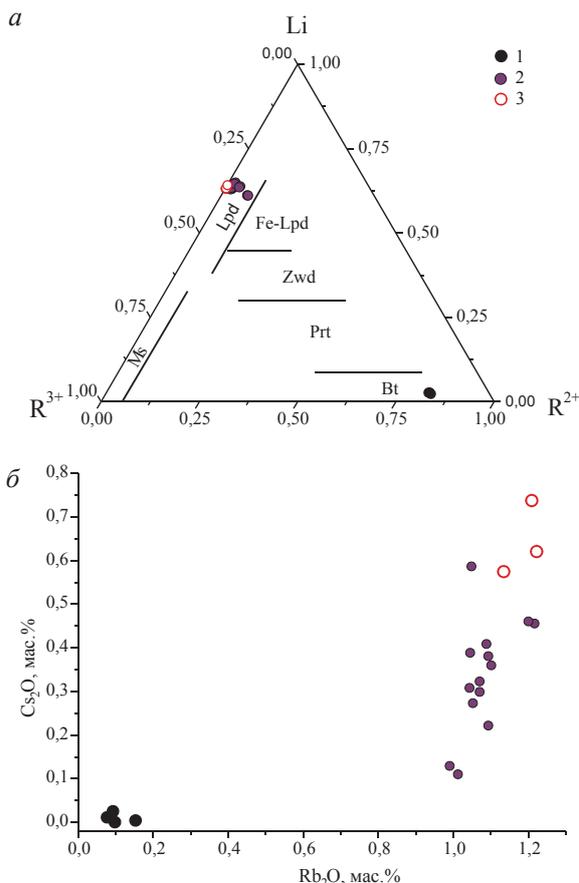
**Таблица 2.** Состав литиевых слюд пегматитовой жилы Шахдаринская

**Table 2.** Compositions of the Li-micas of the Shakhdarinskaya vein

Комплекс Assemblage	Околомиароловый комплекс Nearmiarolitic				Миароловый комплекс Miarolitic		
Образец Sample	пш-ах-1 pshakh-1	пш-ах-1 pshakh-1	пш-6_5_5 psh-6_5_5	пш-6_6_6 psh-6_6_6	ш-мк-1 sh-mk-1	ш-мк-2 sh-mk-2	ш-мк-3 sh-mk-3
SiO <sub>2</sub>	54,14	54,76	51,75	52,49	54,87	54,53	54,43
TiO <sub>2</sub>	0,004	0,015	0,381	0,309	0,04	0,01	0,04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,95	19,93	20,98	20,25	19,78	19,63	19,65
CaO	0,02	0,03	н.п.о./bdl				
MnO	0,88	0,83	2,63	1,26	0,02	0,03	н.п.о bdl
MgO	0,007	0,014	н.п.о./bdl				
FeO	0,06	0,05	1,10	0,67	0,06	0,08	0,03
ZnO	0,01	0,01	0,08	0,06	0,007	н.п.о bdl	0,51
Na <sub>2</sub> O	0,29	0,28	0,42	0,16	0,25	0,27	0,33
K <sub>2</sub> O	10,28	10,31	10,34	10,42	10,26	10,35	10,31
Rb <sub>2</sub> O	1,04	1,05	1,01	1,09	1,21	1,22	1,13
CsO	0,33	0,32	0,11	0,22	0,74	0,62	0,58
F	8,73	8,84	8,60	9,17	9,15	9,14	9,39
Cl	0,006	0,002	0,004	н.п.о bdl	н.п.о bdl	0,006	н.п.о bdl
(OH)*	0,35	0,35	0,3	0,3	–	–	–
Li <sub>2</sub> O (calc)	7,11	7,19	7,02	7,42	7,40	7,40	7,57
Сумма-F Total-F	99,55	100,24	101,11	99,97	99,95	99,44	100,02
Формульные коэффициенты (на 11 атомов O) Formula units per 11 O atoms							
Si	3,51	3,52	3,36	3,44	3,61	3,61	3,59
Ti	–	–	0,02	0,02	–	–	–
Al	1,52	1,51	1,6	1,56	1,53	1,53	1,53
Ca	0,001	0,002	0	0	–	–	–
Mn	0,05	0,05	0,14	0,07	0,001	0,002	–
Mg	0,0008	0,001	–	–	–	–	–
Fe	0,003	0,002	0,06	0,04	0,004	0,004	0,001
Zn	0,0006	0,0004	0,004	0,003	0,0003	0	0,02
Na	0,04	0,03	0,05	0,02	0,03	0,03	0,04
K	0,85	0,85	0,86	0,87	0,86	0,87	0,87
Rb	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05
Cs	0,01	0,01	0,00	0,01	0,02	0,02	0,02
F	1,79	1,8	1,76	1,9	1,91	1,91	1,96
Cl	0,0007	0,0002	0,0004	–	–	0,0006	–
Li	1,85	1,86	1,83	1,95	1,96	1,97	2,01
Al (VI)	1,03	1,03	0,96	1	1,14	1,14	1,12
Al (IV)	0,49	0,48	0,64	0,56	0,39	0,39	0,41
□	0,06	0,07	0,05	0,05	0,04	0,03	0,02

Примечание: \* – данные вторично-ионной масс-спектрологии. Li<sub>2</sub>O (calc) содержание лития, рассчитанное по формуле для литиевых слюд Li<sub>2</sub>O=0,697\*F+1,026 [9]. н.п.о. – ниже предела обнаружения, прочерк – нет данных.

Notes: \* – SIMS data. Li<sub>2</sub>O (calc) concentrations of Li are calculated as Li<sub>2</sub>O=0,697\*F+1,026 [9] for Li mica from pegmatites; bdl – below the detection limits; dash – no data.



**Рис. 3.** Состав слюд жилы Шахдаринской. Поля нанесены по данным [10]. Условные обозначения: R<sup>2+</sup>=Fe+Mg+Mn, R<sup>3+</sup>=Al<sup>IV</sup>, Ms – мусковит, Lpd – лепидолит, Fe-Lpd – железистый лепидолит, Znw – циннвальдит, Prt – протолитионит, Bt – биотит; 1 – слюда кварц-двушпатового комплекса, 2 – слюда околомиаролового комплекса, 3 – слюда миаролового комплекса

**Fig. 3.** Compositions of micas of the Shakhdarinskaya vein. Fields are from [10]. R<sup>2+</sup>=Fe+Mg+Mn, R<sup>3+</sup>=Al<sup>IV</sup>, Ms – muscovite, Lpd – lepidolite, Fe-Lpd – Fe-lepidolite, Znw – zinnwaldite, Prt – protholithionite, Bt – biotite, 1 – mica from quartz-two-feldspar assemblage, 2 – nearmiarolitic mica, 3 – miarolitic mica

Опираясь на приведенные данные, мы можем сделать вывод о том, что слюды околомиаролового и миаролового комплексов относятся к ряду трилитоинит–полилитоинит, что подтверждается данными рамановской спектроскопии, приведенными ранее. При этом высокие содержания лития, кремния и фтора дают основание полагать, что описываемые минералы соответствуют по составу и структуре полилитоиниту – наиболее фтористой из литиевых слюд.

По идеализированной формуле полилитоинита KLi<sub>2</sub>Al [Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>]F<sub>2</sub> содержание Li<sub>2</sub>O в этом минерале может составлять до 7,66 мас. %, а фтора – 9,74 мас. %. С учетом того, что в наших минералах присутствует H<sub>2</sub>O и другие примеси, можно считать, что значения, вычисленные из идеальных стехиометрических соотношений, могут служить

ограничением сверху. Из этого следует, что полученные нами оценки и величины содержаний действительно отвечают природному полилито ни ту.

**Таблица 3.** Содержание элементов-примесей и воды в слюдах пегматитовой жилы Шахдаринской

**Table 3.** Rare metals, trace elements and H<sub>2</sub>O in mica from Shakhdarinskaya vein

Комплекс Assemblage	кварц-полевошпатовый quartz-feldspar		околомиароловый nearmiarolitic	
Образец Sample	89-159 (49-1)	89-159 (51-1)	пшак-1 pshakh-1	пш-6 psh-6
Ti	25575	24931	583	622
Li	900	993	41858*	41307*
Be	7,6	11	102	36
B	0,28	0,42	268	336
Rb	1777	1910	12270	13238
Sr	1,05	1,5	0,29	2,11
Cs	134	173	5400	8812
Ba	75	76	1,68	6,32
Zr	1,11	1,30	0,11	0,18
La	0,06	0,06	0,03	0,04
Ce	0,19	0,18	0,37	0,64
Pr	0,07	0,06	н.п.о./bdl	
Nd	0,24	0,23	0,02	0,02
Sm	0,39	0,32	0,01	0,01
Eu	0,02	0,01	н.п.о./bdl	0,01
Gd	н.п.о./bdl			
Dy	0,01	0,02	н.п.о./bdl	0,02
Er	0,02	0,01	н.п.о./bdl	
Yb	0,08	0,07	0,01	0,05
Lu	0,01	0,01	н.п.о./bdl	
Th	0,01	0,01	н.п.о./bdl	
U	0,06	0,06	0,01	0,05
Ta	55	53	52	27
Hf	0,16	0,20	0,10	0,07
Nb	1221	1162	80	33
H <sub>2</sub> O	2,54	2,35	0,36	0,30

Примечание: Содержание элементов-примесей – в ppm, H<sub>2</sub>O – в мас. %. \* – сильно завышенные значения; н.п.о. – ниже предела обнаружения.

Notes: Element concentrations are in ppm, H<sub>2</sub>O contents are in wt. %; \* – the exaggerated values; bdl – below the detection limits.

Исходя из данных и рассуждений, которые приведены выше, мы можем сделать вывод, что изученные слюды околомиароловых и миароловых комплексов жилы Шахдаринской являются триоктаэдрическими (степень заполнения октаэдрической позиции 2,7–2,9) фтористыми литиевыми слюдами. Ядра крупных кристаллов полилито ни та околомиароловых комплексов бывают окрашены в бежевые или желтые цвета. Анализ подобных участков показывает, что в них повышено содержание Fe и Mn. Здесь содержание MnO может достигать 2,6 мас. %, FeO – 1,1 мас. %, в то время как в бесцветных частях они составляют 0,7–0,9 и 0,05 мас. % соответственно. Это позволяет предположить, что наиболее ранние литиевые слюды жилы имели состав, отвечающий многокомпонентному твердому раствору полилито ни т-трилито ни т-циннвальдит-масутомит.

Для полилито ни тов околомиаролового комплекса методом SIMS были определены концентрации бора, которые составили около 0,1 мас. % B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Наиболее значимой особенностью полилито ни тов жилы Шахдаринской являются очень высокие содержания Rb и Cs (рис. 3, б). Содержания Rb<sub>2</sub>O в слюдах околомиаролового комплекса составляют 0,99–1,22 мас. %, а в слюдах из миаролы – 1,04–1,10 мас. %. Для Cs<sub>2</sub>O характерны большие вариации в концентрациях 0,11–0,63 мас. % в слюдах околомиаролового комплекса и 0,27–0,59 мас. % – в слюде из миаролы. Исследования методом вторичных электронов на сканирующем электронном микроскопе показало, что вариации цезия отвечают неоднородностям составов кристаллов слюды. Два кристалла из околомиаролового комплекса были исследованы методом SIMS и измеренные концентрации в них составили 13000 ppm Rb (1,34–1,47 мас. % Rb<sub>2</sub>O) и 5400–8800 ppm Cs (0,57–0,95 мас. % Cs<sub>2</sub>O), что в целом подтверждает результаты рентгеноспектрального микроанализа. Можно заметить, что в слюдах от околомиаролового к миароловому комплексу увеличивается доля цезия по отношению к рубидию Cs<sub>2</sub>O: Rb<sub>2</sub>O с 1:10 до 6:10.

### Обсуждение

Рубидий и цезий являются наиболее крупными щелочными металлами, участвующими в процессах природного минералообразования. Благодаря ионным характеристикам оба проявляют максимальную несовместимость в процессах минералообразования и редко образуют самостоятельные минералы. Главным минералом-концентратором цезия является поллуцит (Cs,Na)[AlSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>]<sub>n</sub>H<sub>2</sub>O, содержащий 22–36 мас. % Cs<sub>2</sub>O. Это наиболее распространенная минеральная форма цезия, которая используется как руда на этот металл. Всего насчитывается 17 минералов, где цезий является главным или одним из главных катионов. Большая часть из них являются редкими и крайне редкими. В подавляющем большинстве минералы цезия – кислородные соединения. Большая часть относится к оксидам и силикатам. Значительная часть соединений цезия представлена боратами и фторборатами. Значительно меньше минеральных видов относится к халькогенным соединениям, фосфатам и ванадатам.

До недавнего времени считалось, что рубидий может только рассеиваться в природе и не дает собственных минералов. Однако к настоящему времени открыто несколько минералов, для которых рубидий является главным элементом. Это рубидиевая слюда – волошинит [11], представляющая собой минерал, близкий к полилито ни ту; рубидиевый аналог калиевого полевого шпата – рубиклин Rb[AlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>] и рубидиевый борат, обнаруженный только во флюидных включениях в пегматитовых минералах – раманит-Rb RbB<sub>5</sub>O<sub>8</sub>·4H<sub>2</sub>O [12]. Высокие примеси 0, n–1, n мас. % Rb характерны для поллуцита, лондонита и пецоттаита, являющихся минералами цезия.

Среди породообразующих минералов главными концентраторами рубидия и цезия являются щелочные полевые шпаты и слюды. Рубидий и цезий являются кристаллохимическими аналогами калия, который они и замещают в этих минералах. При этом цезий и рубидий концентрируются преимущественно в слюдах. Содержания этих элементов в полевых шпатах значительно ниже [13]. В связи с этим важно отметить, что существуют цезиевые аналоги мусковита – нанпингит  $Cs(Al, Mg, Fe^{2+}, Li)_2[(Si_3Al)O_{10}](OH, F)_2$  [14], трилитионита и полилтитионита – соколоваит  $CsLi_2Al[Si_4O_{10}]F_2$  [7, 11, 13, 15, 16].

Высокие концентрации рубидия и цезия не являются редкостью в минералах богатых литием гранитных пегматитов, обогащенных бором и фтором [2, 17, 18]. Порядок концентраций ( $Rb_2O$  до 1,29 мас. %,  $Cs_2O$  до 0,81 мас. %) совпадает с тем, который был установлен в литиевых слюдах жилы Шахдаринской. В расплавных включениях в миароловом кварце турмалиноносных пегматитов Малханского месторождения (Ц. Забайкалье) была обнаружена слюда, состав которой отвечает нанпингиту с аномально высокими содержаниями Li и B [19]. Кроме этого, высокие содержания Cs (до 4 мас. %  $Cs_2O$ ) характерны для бериллов [2, 20, 21]. Все эти примеры относятся к гранитным пегматитам, которые являются результатом кристаллизации остаточных дифференциатов гранитных расплавов.

Бросается в глаза то, что цезиевые и рубидиевые слюды всегда являются литиевыми. Их образование связано с эволюцией гранитных пегматитов или имеет отношение к эволюции редкометалльных щелочных гранитов [2, 13, 22, 23]. Характерно, что слюды с высоким содержанием цезия и рубидия, а особенно цезия, в пегматитах образуют наиболее поздние зоны роста кристаллов [13, 22]. Эти факты говорят в пользу того, что редкие щелочные металлы, особенно Rb и Cs, в процессе эволюции пегматитовой магмы или магмы редкометалльных гранитов ведут себя как несовместимые элементы, накапливаясь в остаточных расплавах и растворах. В некоторых случаях образование слюд с высокими содержаниями Li, Rb и Cs очевидно связано с проникновением более поздних растворов в ранее образованные минеральные комплексы пегматитов по трещинам [22]. Из этого делается вывод, что формирование цезиевых минералов связано с автометасоматозом или автометаморфизмом, который происходит уже после кристаллизации пегматитовых расплавов. Поведение рубидия в процессах эволюции магматических и пегматитовых тел исследовано не очень подробно. Напротив, цезию уделялось существенно больше внимания. Если принимать, что флюид имеет чисто водный состав, то все редкие щелочные металлы проявляют тенденцию к накоплению в остаточном силикатном расплаве. С ростом давления эта тенденция только усиливается [24]. Однако по данным этих авторов в хлоридных растворах при увеличении содержания хлора коэффициент распределе-

ния между флюидом и расплавом увеличивается. Это может привести к перераспределению редких щелочей преимущественно в водный флюид при высоких концентрациях хлора [24]. На примере эволюции нерудоносных, но содержащих пегматиты, гранитных массивов было проведено моделирование накопления цезия в силикатном расплаве при условии, что оно происходит в соответствии с коэффициентами распределения между полевым шпатом, мусковитом, водным флюидом и силикатным расплавом [25]. В этой ситуации концентрация цезия в силикатном расплаве при степени закристаллизованности более 99 % составила бы около 0,5 мас. %  $Cs_2O$ . По-видимому, если принимать, что исходный состав гранитной магмы соответствует обычному граниту, эти концентрации можно считать предельными. При этом авторы считают, что основная масса этого элемента сконцентрировалась бы в силикатных фазах: расплаве и минералах, а не в водном флюиде.

Исследования последних лет показывают, что содержания цезия в силикатных жидкостях пегматитов и Li-F гранитов могут достигать концентраций в 5–6 мас. %  $Cs_2O$  [19, 26–30], что на порядок превышает значения, предсказанные в [25]. В кварце онгонитов массива Ары-Булак в Восточном Забайкалье наряду с включениями силикатных расплавов были обнаружены включения силикатных жидкостей, экстремально обогащенных цезием [31]. Таким образом, пегматитовые и редкометалльно-гранитные расплавы способны концентрировать цезий и, вероятно, рубидий до весьма значительных концентраций, иногда превышающих содержания главных породообразующих щелочей [12, 27].

В модели [25] принималось, что флюид имеет хлоридный состав и коэффициент распределения принимался для случая равновесия расплава с хлоридным водным раствором. Однако водный флюид турмалиноносных гранитных пегматитов часто резко обеднен хлором. В большинстве случаев он является боратно-борнокислым [32]. Данных о характере распределения редких щелочных металлов между боратно-борнокислыми флюидами и пегматитовыми силикатными жидкостями в доступной литературе нет. Поэтому сложно сделать вывод о том, являются ли слюды с высоким содержанием Li, Rb и Cs продуктом кристаллизации из силикатных жидкостей или они являются результатом процессов кристаллизации, связанных с водной флюидной фазой.

Наши данные показывают, что высокие содержания цезия характерны только для тех минеральных комплексов, которые обычно интерпретируются как результат поздних стадий пегматитового процесса. Ранние слюды кварц-полевошпатовых комплексов вне всякого сомнения обогащены литием, рубидием и цезием, но их концентрации значительно меньше, чем в слюдах околомияролового и миаролового комплексов. Повышенные концентрации редких щелочных металлов в био-

тиях ранних кварц-полевошпатовых комплексов жилы Шахдаринской свидетельствуют в пользу того, что исходные пегматитовые расплавы были обогащены редкими щелочами по сравнению с редкометалльными гранитоидами. Обращает на себя внимание резкое обогащение биотитов ниобием по сравнению с танталом. В полилитиионитах околомароловых и мароловых ассоциаций тантал по содержанию сопоставим с биотитами, а концентрации Ва, Zr, РЗЭ превышают таковые для литиевых слюд и характерны для биотитов обычных гранитов. Из этого можно заключить, что биотит кристаллизовался из силикатного расплава, обогащенного редкими металлами. Такой расплав можно рассматривать как продукт глубокой дифференциации гранитной магмы.

Кроме уже обозначенных резких отличий составов полилитиионитов и биотитов жилы Шахдаринской следует обратить внимание на соотношение содержания воды и фтора. Если для биотитов характерно обычное для слюд соотношение фтора и воды, то полилитииониты являются максимально фтористыми, а содержание воды в них ничтожно. Это может служить показателем того, что биотит и полилитиионит образуются из сред, в которых резко различаются соотношения активностей воды и фтора. Кроме этого, в составе полилитиионита возрастают концентрации бора. Итак, если образование биотита ранних кварц-полевошпатовых комплексов можно связать с кристаллизацией глубоко дифференцированного гранитного расплава, то полилитиионит кристаллизовался из среды, которая резко отличается от этого расплава крайне высоким содержанием бора, фтора и редких металлов. В то же время среда, из которой кристаллизовался полилитиионит, была резко обеднена Nb, который характерен для дифференцированных гранитных расплавов.

Исследования включений минералообразующих сред в минералах соответствующих комплексов жилы позволил нам установить, из сред какого состава и фазового состояния происходила кристаллизация описанных литий-, рубидий- и цезий-содержащих слюд. Кварц миарол и околомаролового комплекса содержит как включения водных боратно-борнокислых флюидов, так и сред, которые имели существенно силикатный состав. Включения последних при комнатной температуре представляют агрегат дочерних слюдястых минералов, аналогичный описанному в [19]. Это включения силикатных жидкостей, имеющих необычный состав. По нашим предварительным данным, полученным методом вторично-ионной масс-спектрометрии, в стеклах этих включений содержание цезия составляет 20000–60000 ppm (2–5 мас. % Cs<sub>2</sub>O). В расплавных включениях из кварца околомаролового комплекса содержится 2000–6000 ppm Rb (0,2–0,7 мас. % Rb<sub>2</sub>O).

Флюид при кристаллизации околомаролового и миаролового комплексов также был богат цези-

ем. Об этом свидетельствуют находки цезиевого раманита CsB<sub>5</sub>O<sub>8</sub>·4H<sub>2</sub>O среди дочерних минералов флюидных включений. Из этого следует, что соединения цезия присутствовали в растворенном виде при параметрах кристаллизации околомаролового и миаролового комплексов. По данным анализа LA ICP-MS, содержание Cs во флюидных включениях составляет не менее 1500 ppm [26].

Описанные включения представляют собой водно-силикатные жидкости с очень высоким содержанием воды до 10–15 мас. %, которые способны концентрировать в себе в большом количестве редкие рудные элементы и летучие компоненты (F, B, As, Ta) [19, 27, 33]. Их природа до сих пор остается дискуссионной. Аналогичные среды могут быть результатом расслоения силикатных расплавов с высокими содержаниями бора, фтора и редких щелочей [31, 34]. На основании экспериментальных исследований [35] удалось установить, что водно-силикатные жидкости могут быть результатом осаждения коллоидного вещества из водного флюида, резко обогащенного кремнеземом при высоких температурах и давлениях. Обе среды – водный флюид и водно-силикатные жидкости, могли являться материнскими средами кристаллизации литиевых слюд с высокими содержаниями рубидия и цезия, а также и других минералов Rb и Cs в наиболее поздних ассоциациях миароловых пегматитов с цветным турмалином, обогащенных B, F и редкими щелочными металлами в других регионах мира, что и было продемонстрировано на примере слюд жилы Шахдаринской на ЮЗ Памире.

#### Заключение

В данной работе впервые опубликованы результаты минералого-геохимического изучения турмалиноносных миароловых пегматитов жилы Шахдаринской (ЮЗ Памир), сделана попытка сопоставления особенностей состава слюд и среды их кристаллизации.

Темные слюды кварц-полевошпатового комплекса представлены аннит-сидерофилитом, обогащенным Li, Ta, Nb и Rb. В околомароловом и миароловом комплексах они сменяются на триоктаэдрические фтористые литиевые слюды, по составу соответствующие полилитииониту. Наиболее ранние литиевые слюды имели повышенное содержание Mn и Fe, которые в краевых частях и слюдах миаролы практически отсутствуют. Важной особенностью данных полилитиионитов является повышенные концентрации Rb<sub>2</sub>O до 1,2 мас. % и Cs<sub>2</sub>O до 0,6 мас. %. Показано, что от околомаролового к миароловому комплексу увеличивается доля цезия по отношению к рубидию.

На основании исследований включений минералообразующих сред в кварце установлено, что кристаллизация литиевых слюд, обогащенных рубидием и цезием, происходила из сред с аномально высокими концентрациями редких щелочей и других редких и летучих элементов.

*Большая часть аналитических исследований была выполнена в ЦКП мультиэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН. Авторы благодарны Н.С. Карманову, Е.В. Нигматулиной и М.В. Хлестову за помощь в исследовании составов слюд методами рентгеноспектрального*

*анализа. Авторы приносят благодарности также С.Г. Симакину и Е.В. Потапову за помощь в выполнении исследований методом вторично-ионной масс-спектрометрии. Работы выполнены при поддержке гранта Президента РФ № МК-5367.2016.5.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Россковский Л.Н., Коноваленко С.И. О Южно-Азиатском пегматитовом поясе // Доклады АН СССР. – 1976. – Т. 229. – № 3. – С. 695–698.
2. Загорский В.Е., Перетяжко И.С., Шмакин Б.М. Гранитные пегматиты. Т. 3. Миароловые пегматиты. – Новосибирск: Изд-во Наука, 1999. – 487 с.
3. Коноваленко С.И. Типы миароловых пегматитов кристаллической толщи Юго-Западного Памира // Геммология. Сборник статей. – Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2006. – С. 69–75.
4. Коноваленко С.И. Коллекционное сырье миароловых пегматитов Юго-Западного Памира // Геммология. Сборник статей. – Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2009. – С. 62–73.
5. Cerny P., Ercit T.S. The classification of granitic pegmatites revisited // Canadian Mineralogist. – 2005. – V. 43. – P. 2005–2026.
6. Коноваленко С.И., Сазонтова Н.А., Смирнов С.З. Состав, строение и режим формирования миароловых пегматитов Лесхозовской жилы (Юго-Западный Памир) // Петрология магматических и метаморфических комплексов: Материалы научной конференции. – Томск, 2001. – Вып. 2. – С. 226–228.
7. Cs-dominant polyolithionite in the Koktokay#3 pegmatite, Altai, NW China: in situ micro-characterization and implication for the storage of radioactive cesium / R.C. Wang, H. Hu, A.C. Zhang, F. Fontan, P. de Parseval, S.Y. Jiang // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 2007. – V. 153. – Iss. 3. – P. 355–367.
8. Wang A., Freeman J.J., Jolliff B.L. Understanding the Raman spectral features of phyllosilicates // Journal of Raman Spectroscopy. – 2015. – V. 46. – P. 829–845.
9. On Li-bearing micas: estimating Li from electron microprobe analyses and an improved diagram for graphical representation / G. Tischendorf, B., Gottesmann H.J. Forster, R.B. Trumbull // Mineralogical Magazine. – 1997. – V. 61. – № 6. – P. 809–834.
10. Foster M.D. Interpretation of the composition of trioctahedral micas // U.S. Geological Survey, Professional Paper. – 1960. – V. 354-B. – P. 11–49.
11. Voloshinite, a new rubidium mica from granitic pegmatite of Voron'i Tundras, Kola Peninsula, Russia / I.V. Pekov, N.N. Kononkova, A.A. Agakhanov, D.I. Belakovskiy, S.S. Kazantsev, N.V. Zubkova // Geology of Ore Deposits. – 2010. – Iss. 52. – P. 591–598.
12. Thomas R., Davidson P., Hahn A. Ramanite-(Cs) and ramanite-(Rb): New cesium and rubidium pentaborate tetrahydrate minerals identified with Raman spectroscopy // American Mineralogist. – 2008. – V. 93. – Iss. 7. – P. 1034–1042.
13. Geochemistry, mineralogy, and evolution of Li-Al micas and feldspars from the Mount Mica pegmatite, Maine, USA / K.L. Marchal, W.B. Simmons, A.U. Falster, K.L. Webber, E. Roda-Robles // Canadian Mineralogist. – 2014. – P. 221–233.
14. Jambor J.L., Vanko D.A. New mineral names // American Mineralogist. – 1990. – V. 75. – P. 706–713.
15. Rubidium- and cesium-dominant micas in granitic pegmatites / P. Cerný, R. Chapman, D.K. Teertstra, M. Novák // American Mineralogist. – 2003. – P. 1832–1835.
16. Sokolovaite CsLi<sub>2</sub>AlSi<sub>4</sub>O<sub>10</sub>F<sub>2</sub> – a new mineral species of the mica group / L.A. Pautov, A.A. Agakhanov, G.K. Bekenova // New data on minerals. – 2006. – Iss. 41. – P. 5–13.
17. Deveaud S., Millot R., Villaros A. The genesis of LCT-type granitic pegmatites, as illustrated by lithium isotopes in micas // Chemical Geology. – 2015. – V. 411. – P. 97–111.
18. Dill H.G. Pegmatites and aplites: their genetic and applied ore geology // Ore Geology Reviews. – 2015. – V. 69. – P. 417–456.
19. Conditions of pocket formation in the Oktyabrskaya tourmaline-rich gem pegmatite (the Malkhan field, Central Transbaikalia, Russia) / I.S. Peretyazhko, V.Y. Zagorsky, S.Z. Smirnov, M.Y. Mikhailov // Chemical Geology. – 2004. – V. 210. – Iss. 1–4. – P. 91–111.
20. Cs-rich lithium micas and Mn-rich lithian siderophyllite in miarolitic NYF pegmatites of the Konigshain granite, Lausitz, Germany / H.J. Forster, G. Tischendorf, D. Rhede, R. Naumann, B. Gottesmann, W. Lange // Neues Jahrbuch Fur Mineralogie-Abhandlungen. – 2005. – P. 81–93.
21. Gem-quality morganite from Monte Capanne pluton (Elba Island, Italy) / F. Caucia, L. Marinoni, A.M. Callegari, A. Leone, M. Scacchetti // Neues Jahrbuch Fur Mineralogie-Abhandlungen. – 2016. – V. 193. – Iss. 1. – P. 69–78.
22. Sokolovaite and evolved lithian micas from the Eastern Moblan granitic pegmatite, Opatica subprovince, Quebec, Canada / E.G. Potter, R.P. Taylor, P.C. Jones, A.E. Lalonde, G.H.K. Pearce, R. Rowe // Canadian Mineralogist. – 2009. – V. 47. – Iss. 2. – P. 337–349.
23. Андреева И.А. Генезис и механизмы образования редкоземельных щелочных гранитов массива Халдзан-Буретгей, Монголия: данные изучения расплавных включений // Петрология. – 2016. – Т. 24. – № 5. – С. 499–514.
24. Webster J.D., Holloway J.R., Hervig R.L. Partitioning of lithophile trace elements between H<sub>2</sub>O and H<sub>2</sub>O+CO<sub>2</sub> fluids and topaz rhyolite melt // Economic Geology. – 1989. – V. 84. – № 1. – P. 116–134.
25. Audetat A., Pettko T. The magmatic-hydrothermal evolution of two barren granites: a melt and fluid inclusion study of the Rito del Medio and Canada Pinabete plutons in northern New Mexico (USA) // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2003. – V. 67 (1). – P. 97–121.
26. Late magmatic crystallization in the tourmaline-bearing miarolitic granitic pegmatites (by example of Shakhdarinskaya and Leskhovskaya veins, SW Pamir, Tajikistan) / E. Astrelina, S. Smirnov, A. Ragozin, N. Karmanov, S. Konovalenko // European Current Research on Fluid Inclusions (ECROFI-XXI) Montanuniversität Leoben. – Austria, 9–11 August, 2011. – P. 24–25.
27. Смирнов С.З. Флюидный режим кристаллизации водонасыщенных гранитных и пегматитовых магм: физико-химический анализ // Геология и геофизика. – 2015. – Т. 56. – № 9. – С. 1643–1663.
28. The transition from peraluminous to peralkaline granitic melts: Evidence from melt inclusions and accessory minerals / R. Thomas, J.D. Webster, D. Rhede, W. Seifert, K. Rickers, H.J. Forster, W. Heinrich, P. Davidson // Lithos. – 2006. – V. 91. – № 1–4. – P. 137–149.
29. Rickers K., Thomas R., Heinrich W. The behavior of trace elements during the chemical evolution of the H<sub>2</sub>O-, B-, and F-rich granite-pegmatite-hydrothermal system at Ehrenfriedersdorf, Germany: a SXRF study of melt and fluid inclusions // Miner. Deposita. – 2006. – V. 41. – № 3. – P. 229–245.
30. Thomas R., Davidson P. Revisiting complete miscibility between silicate melts and hydrous fluids, and the extreme enrichment of some elements in the supercritical state – Consequences for the formation of pegmatites and ore deposits // Ore Geology Reviews. – 2016. – V. 72. – P. 1088–1101.
31. Перетяжко И.С., Царева Г.М., Загорский В.Е. Первая находка аномально цезиевых алюмосиликатных расплавов в онгонитах

- (по данным изучения расплавных включений) // Доклады РАН. – 2007. – Т. 413. – № 6. – С. 791–797.
32. Борные кислоты в процессах пегматитового и гидротермального минералообразования: петрологические следствия открытия сассолина ( $H_2BO_3$ ) во флюидных включениях / И.С. Перетяжко, В.Ю. Прокофьев, В.Е. Загорский, С.З. Смирнов // Петрология. – 2000. – Т. 8. – № 3. – С. 241–266.
33. Thomas R., Davidson P. Evidence of a water-rich silica gel state during the formation of a simple pegmatite // Mineralogical Magazine. – 2012. – V. 76. – Iss. 7. – P. 2785–2801.
34. Veksler I.V., Thomas R., Schmidt C. Experimental evidence of three coexisting immiscible fluids in synthetic granite pegmatite // American Mineralogist. – 2002. – V. 87. – P. 775–779.
35. Образование и свойства водно-силикатных жидкостей в системах  $Na_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$  и гранит- $Na_2O-SiO_2-H_2O$  при 600 °C и 1,5 Кбар / В.Г. Томас, С.З. Смирнов, О.А. Козьменко, В.А. Дребущак, В.С. Каменецкий // Петрология. – 2014. – Т. 22. – № 3. – С. 327–344.

Поступила 06.04.2017 г.

#### Информация об авторах

**Соколова Е.Н.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший преподаватель кафедры геологии рудных месторождений Новосибирского национального исследовательского государственного университета; научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

**Смирнов С.З.**, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

**Кунгулова Э.Н.**, студент Геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета.

**Королюк В.Н.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

**Коноваленко С.И.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры минералогии и геохимии Геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета.

UDC 553.063+553.08

## RARE ALKALI METALS IN MICAS FROM SHAKHDARINSKAYA MIAROLITIC PEGMATITE (SOUTH-WESTERN PAMIR)

**Ekaterina N. Sokolova**<sup>1,2</sup>,  
ekaterina@igm.nsc.ru

**Sergey Z. Smirnov**<sup>1,3</sup>,  
ssmr@igm.nsc.ru

**Elvira N. Kungulova**<sup>3</sup>,  
kun2609@mail.ru

**Vladimir N. Korolyuk**<sup>2</sup>,  
kun2609@mail.ru

**Sergey I. Konovalenko**<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Novosibirsk National State Research University,  
2, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russia.

<sup>2</sup> V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS,  
3, Koptyug Avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

<sup>3</sup> Tomsk State National Research University,  
36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

*The study is focused on the mineralogy of rare-element rich tourmaline-bearing miarolitic pegmatites of the Shakhdarinskaya vein (SW Pamirs, Tajikistan). The results of the study are crucially important for understanding the regularities of distribution and behavior of Li, Rb and Cs in the course of crystallization of the most low-temperature pegmatitic and rare-element rich granitic magmas. The major objective of the study was the understanding of mineralogy and geochemistry of the pegmatite with special emphasis on chemistry, classification and nature of Li, Cs and Rb-rich micas.*

*The paper represents the first information on mineralogy of the Shakhdarinskaya vein along with the attempt of comparison with the features of the mineral-forming media. Optical microscopy, Raman spectroscopy, WDS and EDS X-ray spectral microanalysis and SIMS were applied in order to obtain the data on mineral compositions and structure of micas and inclusions of mineral forming media.*

*Micas from three major assemblages: quartz-two-feldspar one, which builds the most part of the Shakhdarinskaya pegmatite; near-miarolitic quartz-albite-mica assemblage; and miarolitic assemblage, which is composed of quartz, albite and mica from miarolitic pockets, were studied. Dark mica from the quartz-feldspar assemblage is represented by intermediate composition of the annite-siderophyllite series, enriched in Li, Cs, Rb, Nb. Micas of nearmiarolitic and miarolitic assemblages belong to trioctahedral lithium-fluorine mica – polyolithionite. The early Li-micas were enriched in Fe and Mn, which are almost absent in the rims of the nearmiarolitic mica and they are totally absent in miarolitic mica. Polyolithionites of the Shakhdarinskaya pegmatite are strongly enriched in Rb<sub>2</sub>O up to 1,2 wt. % and Cs<sub>2</sub>O up to 0,6 wt. %. It is demonstrated that Cs enrichment of the polyolithionite increases more than Rb one from nearmiarolitic to miarolitic assemblage. Based on fluid and melt inclusion analysis it was established that Li, Rb and Cs-enriched mica were formed from mineral-forming media that were anomalously enriched in rare alkali metals, boron and fluorine.*

### Key words:

Cesium, miarolitic (cavity) pegmatite, Pamir, Shakhdarinskaya vein, mica, polyolithionite.

*The major part of the analytical studies was carried out in TsKP of multi-element and isotopic investigations of IGM SB RAS. The authors appreciate the assistance of N.S. Karmanov, E.V. Nigmatulina and M.V. Khlestov in investigation of mica compositions by the X-ray spectral analysis methods. The authors thank as well S.G. Simakina and E.V. Potapov for assistance in investigation by the secondary ion mass-spectrometry-based method. The paper was financially supported by the Grant of the President of the RF no. MK-5367.2016.5*

### REFERENCES

- Rossovsky L.N., Konovalenko S.I. O Yuzhno-Aziatskom pegmativom poyase [About the South Asian pegmatite belt]. *Reports of the USSR Academy of Sciences*, 1976, vol. 229, no. 3, pp. 695–698.
- Zagorsky V.E., Peretyazhko I.S., Shmakin B.M. *Granitnye pegmatity. T. 3. Miarolovye pegmatity* [Granite pegmatites. Vol. 3. Miarolitic pegmatites]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1999. 487 p.
- Konovalenko S.I. Tipy miarolovyykh pegmatitov kristallicheskoy tolshchi Yugo-Zapadnogo Pamira [Types of miarolitic pegmatite of crystal thickness of the Southwestern Pamir]. *Gemmologiya*. Collected papers. Tomsk, Tomsk TsNTI Publ., 2006. pp. 69–75.
- Konovalenko S.I. Kollektzionnoe syre miarolovyykh pegmatitov Yugo-Zapadnogo Pamira [Collector raw materials of miarolitic pegmatite in South-Western Pamirs]. *Gemmologiya*. Collected papers. Tomsk, Tomsk TsNTI Publ., 2009, pp. 62–73.
- Cerny P., Ercit T.S. The classification of granitic pegmatites revisited. *Canadian Mineralogist*, 2005, vol. 43, pp. 2005–2026.
- Konovalenko S.I., Sazontova N.A., Smirnov S.Z. Sostav, stroenie i rezhim formirovaniya miarolovyykh pegmatitov Leskhovzovskoy

- zhily (Yugo-Zapadny Pamir) [Composition, structure and mode of formation of pegmatites miarolitic Leskhovskaya veins (South-Western Pamir)]. *Petrologiya magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov. Materialy nauchnoy konferentsii* [Petrology of magmatic and metamorphic complexes. Proc. of scientific conference]. Tomsk, 2001. Iss. 2, pp. 226–228.
7. Wang R.C., Hu H., Zhang A.C., Fontan F., de Parseval P., Jiang S.Y. Cs-dominant polyolithionite in the Koktokay № 3 pegmatite, Altai, NW China: in situ micro-characterization and implications for the storage of radioactive cesium. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2007, vol. 153, Iss. 3, pp. 355–367.
  8. Wang A., Freeman J.J., Jolliff B.L. Understanding the Raman spectral features of phyllosilicates. *Journal of Raman Spectroscopy*, 2015, vol. 46, pp. 829–845.
  9. Tischendorf G., Gottesmann B., Forster H.J., Trumbull R.B. On Li-bearing micas: estimating Li from electron microprobe analyses and an improved diagram for graphical representation. *Mineralogical Magazine*, 1997, vol. 61, no. 6, pp. 809–834.
  10. Foster M.D. Interpretation of the composition of trioctahedral micas. *U.S. Geological Survey, Professional Paper*, 1960, vol. 354-B, pp. 11–49.
  11. Pekov I.V., Kononkova N.N., Agakhanov A.A., Belakovskiy D.I., Kazantsev S.S., Zubkova N.V. Voloshinite, a new rubidium mica from granitic pegmatite of Voronri Tundras, Kola Peninsula, Russia. *Geology of Ore Deposits*, 2010, Iss. 52, pp. 591–598.
  12. Thomas R., Davidson P., Hahn A. Ramanite-(Cs) and ramanite-(Rb): New cesium and rubidium pentaborate tetrahydrate minerals identified with Raman spectroscopy. *American Mineralogist*, 2008, vol. 93, Iss. 7, pp. 1034–1042.
  13. Marchal K.L., Simmons W.B., Falster A.U., Webber K.L., Roda-Robles E. Geochemistry, mineralogy, and evolution of Li-Al micas and feldspars from the Mount Mica pegmatite, Maine, USA. *Canadian Mineralogist*, 2014, pp. 221–233.
  14. Jambor J.L., Vanko D.A. New mineral names. *American Mineralogist*, 1990, vol. 75, pp. 706–713.
  15. Černý P., Chapman R., Teertstra D.K., Novák M. Rubidium- and cesium-dominant micas in granitic pegmatites. *American Mineralogist*, 2003, pp. 1832–1835.
  16. Pautov L.A., Agakhanov A.A., Bekenova G.K. Sokolovaite  $\text{CsLi}_2\text{AlSi}_4\text{O}_{10}\text{F}_2$  – a new mineral species of the mica group. *New data on minerals*, 2006, Iss. 41, pp. 5–13.
  17. Deveaud S., Millot R., Villaras A. The genesis of LCT-type granitic pegmatites, as illustrated by lithium isotopes in micas. *Chemical Geology*, 2015, vol. 411, pp. 97–111.
  18. Dill H.G. Pegmatites and apatites: their genetic and applied ore geology. *Ore Geology Reviews*, 2015, vol. 69, pp. 417–456.
  19. Peretyazhko I.S., Zagorsky V.Y., Smirnov S.Z., Mikhailov M.Y. Conditions of pocket formation in the Oktyabrskaya tourmaline-rich gem pegmatite (the Malkhan field, Central Transbaikalia, Russia). *Chemical Geology*, 2004, vol. 210, Iss. 1–4, pp. 91–111.
  20. Forster H.J., Tischendorf G., Rhede D., Naumann R., Gottesmann B., Lange W. Cs-rich lithium micas and Mn-rich lithian siderophyllite in miarolitic NYF pegmatites of the Konigshain granite, Lausitz, Germany. *Neues Jahrbuch Fur Mineralogie-Abhandlungen*, 2005, pp. 81–93.
  21. Caucia F., Marinoni L., Callegari A.M., Leone A., Scacchetti M. Gem-quality morganite from Monte Capanne pluton (Elba Island, Italy). *Neues Jahrbuch Fur Mineralogie-Abhandlungen*, 2016, vol. 193, Iss. 1, pp. 69–78.
  22. Potter E.G., Taylor R.P., Jones P.C., Lalonde A.E., Pearce G.H.K., Rowe R. Sokolovaite and evolved lithian micas from the Eastern Moblan granitic pegmatite, Opatca subprovince, Quebec, Canada. *Canadian Mineralogist*, 2009, vol. 47, Iss. 2, pp. 337–349.
  23. Andreeva I.A. Genesis and mechanisms of formation of rare-metal peralkaline granites of the Khaldzan Buregtey massif, Mongolia: evidence from melt inclusions. *Petrology*, 2016, vol. 24, no. 5, pp. 462–476.
  24. Webster J.D., Holloway J.R., Hervig R.L. Partitioning of lithophile trace elements between  $\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$  fluids and topaz rhyolite melt. *Economic Geology*, 1989, vol. 84, no. 1, pp. 116–134.
  25. Audetat A., Pettke T. The magmatic-hydrothermal evolution of two barren granites: a melt and fluid inclusion study of the Rito del Medio and Canada Pinabete plutons in northern New Mexico (USA). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, vol. 67 (1), pp. 97–121.
  26. Astrelina E., Smirnov S., Ragozin A., Karmanov N., Konovalenko S. Late magmatic crystallization in the tourmaline-bearing miarolitic granitic pegmatites (by example of Shakhdarinskaya and Leskhovskaya veins, SW Pamir, Tajikistan). *European Current Research on Fluid Inclusions (ECROFI-XXI) Montanuniversitet Leoben*. Austria, 9–11 August, 2011. pp. 24–25.
  27. Smirnov S.Z. The fluid regime of crystallization of water-saturated granitic and pegmatite magmas: physico-chemical analysis. *Russian Geology and geophysics*, 2015, vol. 56, pp. 1292–1307.
  28. Thomas R., Webster J.D., Rhede D., Seifert W., Rickers K., Forster H.J., Heinrich W., Davidson P. The transition from peraluminous to peralkaline granitic melts: Evidence from melt inclusions and accessory minerals. *Lithos*, 2006, vol. 91, no. 1–4, pp. 137–149.
  29. Rickers K., Thomas R., Heinrich W. The behavior of trace elements during the chemical evolution of the  $\text{H}_2\text{O}$ -, B-, and F-rich granite-pegmatite-hydrothermal system at Ehrenfriedersdorf, Germany: a SXRF study of melt and fluid inclusions. *Miner. Deposita*, 2006, vol. 41, no. 3, pp. 229–245.
  30. Thomas R., Davidson P. Revisiting complete miscibility between silicate melts and hydrous fluids, and the extreme enrichment of some elements in the supercritical state – Consequences for the formation of pegmatites and ore deposits. *Ore Geology Reviews*, 2016, vol. 72, pp. 1088–1101.
  31. Peretyazhko I.S., Tsareva E.A., Zagorsky V.Y. A first finding of anomalously Cs-rich aluminosilicate melts in ongonite: Evidence from melt inclusion study. *Doklady Earth Science*, 2007, vol. 413, no. 3, pp. 462–468.
  32. Peretyazhko I.S., Prokofev V.Yu., Zagorsky V.E., Smirnov S.Z. Role of boric acids in the formation of pegmatite and hydrothermal minerals: petrologic consequences of sassolite ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) discovery in fluid inclusions. *Petrology*, 2000, vol. 8, no. 3, pp. 214–237.
  33. Thomas R., Davidson P. Evidence of a water-rich silica gel state during the formation of a simple pegmatite. *Mineralogical Magazine*, 2012, vol. 76, Iss.7, pp. 2785–2801.
  34. Veksler I.V., Thomas R., Schmidt C. Experimental evidence of three coexisting immiscible fluids in synthetic granite pegmatite. *American Mineralogist*, 2002, vol. 87, pp. 775–779.
  35. Thomas V.G., Smirnov S.Z., Kozmenko O.A., Drebuschak V.A., Kamenetsky V.S. Formation and properties of hydrosilicate liquids in the systems  $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  and granite- $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  at 600 °C and 1.5 kbar. *Petrology*, 2014, vol. 22, no. 3, pp. 293–309.

Received: 6 April 2017.

**Information about the authors**

*Ekaterina N. Sokolova*, Cand. Sc., senior teacher, Novosibirsk National State Research University; researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.

*Sergey Z. Smirnov*, Dr. Sc., leading researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.

*Elvira N. Kungulova*, student, Tomsk State National Research University.

*Vladimir N. Korolyuk*, Cand. Sc., senior researcher, V.S. Sobolev Institute of geology and mineralogy SB RAS.

*Sergey I. Konovalenko*, Cand. Sc., associate professor, Tomsk State National Research University.

УДК 550.83 + 550.36:551.2 + 553.9 (571.16)

## ГЛУБИННЫЕ ИСТОЧНИКИ ТЕПЛОГЕНЕРАЦИИ И РЕГИОНАЛЬНЫЙ ПРОГНОЗ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ

Петрищевский Александр Митрофанович<sup>1,2</sup>,  
petris2010@mail.ru

Исаев Валерий Иванович<sup>1</sup>,  
petris2010@mail.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

<sup>2</sup> Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН,  
Россия, 679016, г. Биробиджан, ул. Шолом Алейхема, 4.

Актуальность работы обусловлена необходимостью установления связи нефтяных и газовых месторождений Томской области с глубинным строением и реологией земной коры и подкорковой мантии. Установленные связи используются для оценки перспектив нефтегазоносности в районах с невыясненным углеводородным потенциалом.

**Цель работы:** исследовать плотностную контрастность земной коры и подкорковой мантии – индикатора реологического состояния геологических сред – в 3D-пространстве; выявить связь плотностной контрастности с тепловым потоком и размещением месторождений нефти и газа Томской области; определить и параметризовать вероятные глубинные источники тепла и флюидов, способствующие образованию углеводородных залежей в осадочной толще.

**Методика исследований:** построение 3D реологических гравитационных моделей земной коры и подкорковой мантии до глубины 50 км; корреляционный анализ.

**Результаты.** Установлена корреляционная связь плотностной контрастности – индикатора реологических состояний геологических сред – с тепловым потоком из доюрского основания осадочной толщи, что предполагает существование источников тепла в зонах реологических разуплотнений нижнего слоя земной коры и подкорковой мантии, а также непосредственное влияние глубинных зон пониженной вязкости на образование углеводородных залежей в осадочной толще. В западных районах Томской области установлена пространственная связь нефтегазоносных районов с зонами пониженной вязкости в нижнем слое доюрской осадочной толщи, фундаменте, нижнем слое земной коры и подкорковой мантии. Установлено резкое различие реологических состояний земной коры в западных и восточных районах области. В западных районах кристаллическая кора менее вязкая, возможно раздроблена и, как следствие, более проницаема для потоков теплофлюидов, а в восточных – более жесткая и характеризуется увеличенной мощностью, что определяет резкое различие продуктивности осадочной толщи на западе и востоке территории. В центральных районах области в подкорковой мантии на глубинах 35–60 км выявлена зона пониженной вязкости – вероятный источник тепла и флюидов, перекрытая с востока жесткими пластинами в средней и нижней коре. По наличию зон пониженной вязкости в фундаменте и нижнем слое земной коры на севере и юге области рекомендованы для изучения два района, перспективные на обнаружение новых месторождений нефти и газа.

### Ключевые слова:

Гравитационная модель, реология, тепловой поток, глубинное строение земной коры, прогноз нефтегазоносности, Томская область.

### Постановка задачи

Одним из основных факторов генерации и накопления углеводородов (УВ) в осадочных толщах, как известно, является тепловой поток, поступающий из глубоких слоев земной коры либо подкоркового слоя верхней мантии. Для территории Томской области установлена тесная связь плотности теплового потока из доюрского основания осадочной толщи с размещением и продуктивностью залежей углеводородов [1–3]. Однако непосредственная связь источников глубинного тепла с размещением месторождений нефти и газа остается неизученной. Такую связь можно было бы выявить по температурным аномалиям в глубоких слоях земной коры, однако этому препятствует редкая сеть измерений теплового потока, особенно в восточной половине области.

В глубоких слоях земной коры и в верхней мантии температура является характеристикой реологического состояния вещества, т. е. характери-

стой тесноты связи между частицами геологической среды, которая во многих случаях определяется ее флюидонасыщенностью. Температура 1200–1300 °С считается достаточной для плавления (солидуса) пород на нижней границе литосферы. Средняя температура на поверхности континентальной мантии составляет 400 °С [4]. Интервал геотемператур в осадочной толще 85–125 °С является оптимальным для интенсивной генерации УВ из рассеянного органического вещества баженовской свиты и образования нефтяных залежей в Западной Сибири [5–7].

Другими геофизическими характеристиками реологического состояния геологических сред являются аномалии скорости сейсмических волн, электрической проводимости и плотностная контрастность.

В Томской области 3D-модели распределений скорости сейсмических волн и электрической проводимости в полном и непрерывном объеме земной

коры отсутствуют. Некоторая информация о глубинном строении нижних слоев земной коры содержится в разрезах ГСЗ («Кварц» и «Батолит»), в которых определена глубина и формы залегания трех главных преломляющих сейсмических границ, в том числе – кровли гранитно-метаморфического фундамента [8, 9] и подошвы земной коры. Гораздо более детально сейсмическими методами (МОВ-ОГТ, ДСЗ и др.) и бурением изучен разрез верхнего структурного этажа (J<sub>1</sub>-N) стратиграфической мощностью 3100 м [10]. В результате обобщения всех сейсморазведочных данных была построена схема рельефа кровли фундамента осадочной толщи Западной Сибири [9]. На этой схеме наиболее продуктивные Средне-Васюганский и Нюрольско-Колтогорский нефтегазоносные районы Томской области оказались приуроченными к меридиональному поднятию фундамента (Обь-Васюганской гряде) до глубины 5–6 км от земной поверхности, а максимальная глубина погружений последнего (до 10–12 км) установлена под Усть-Тымским и Преденисейским районами. Другие районы (Вартовский, Каймысовский, Пудинский) расположились в прогибах на обрамлении меридионального поднятия.

Связь между скоростью сейсмических волн и нефтегазоносностью осадочной толщи, которая могла бы пролить свет на реологические свойства разреза, в Томской области детально не исследована, хотя западнее от нее, в разрезе «Сым-Байкит» в фундаменте выявлены субвертикальные зоны пониженных скоростей протяженностью до 10 км [8]. Зоны меньшей протяженности выявлены в разрезах ГСЗ «Кварц», «Батолит» и «Битум» [8]. Имеются также данные [11], что нефтеносность связана с локальными зонами затухания сейсмических волн, которые обычно являются индикаторами пониженной вязкости геологических сред [12–14].

Электроразведочные исследования методами становления поля, магнито-теллурического зондирования и вызванной поляризации в Томской области выполнены на локальных участках площадью до 100 км<sup>2</sup> [15, 16]. Этими методами получены блестящие результаты по картированию кровли баженовской свиты и подошвы мезозойского (доюрского) комплекса и убедительно доказана корреляция аномалий поляризуемости с содержанием ароматических углеводородов, однако полная картина распределений удельных электрических сопротивлений в земной коре для всей области отсутствует.

В связи с неоднородностью и неравномерностью пространственного размещения сейсмических и электроразведочных данных более представительной (в пространственном смысле) для оценки реологических свойств земной коры Томской области может быть плотностная контрастность. Показателем плотностной контрастности является  $\mu_z$ -параметр [14], характеризующий степень плотностной дифференциации геологического пространства на отрезках между центрами плотност-

ных неоднородностей и поверхностями слоев, заключающих эти неоднородности:

$$\mu_z = \frac{V_{zm} Z_0}{4\pi K (Z_0 - H_c)^2}, \quad (1)$$

где  $V_{zm}$  – амплитуда локального симметричного гравитационного возмущения, измеряемая по кривой  $V_z$ ;  $Z_0$  – глубина залегания центра масс, однозначно вычисляемая интегральным или любым другим способом по кривой  $V_z$ ;  $K$  – гравитационная постоянная;  $H_c$  – глубина поверхности «конденсации», на которую выметаются, по Пуанкаре, массы объемных источников. Для того чтобы знаменатель в формуле (1) не обращался в ноль, поверхность  $H_c$  всегда располагается немного выше поверхности слоя, заключающего в себе плотностные неоднородности [14].

Поскольку все параметры в формуле (1) определяются однозначно без априорной информации об источниках гравитационных аномалий, модели пространственных распределений  $\mu_z$ -параметра также являются внутренне однозначными. Внутренняя однозначность означает то, что при повторениях расчетной процедуры можно получить только один и тот же единственный результат. Проблема внешней (абсолютной) однозначности состоит в том, что гравитационные аномалии зависят не только от глубины залегания, но и от формы возбуждающих их источников (по причине эквивалентности объемного и плоского потенциалов). При значительной вытянутости плоского источника по горизонтали ( $Z_0 \ll D$ , где  $D$  – горизонтальные размеры источника) вычисленные значения  $Z_0$  будут занижены относительно истинных. Количественная оценка таких отклонений выполнена в работе [14], в которой определены граничные условия применимости метода гравитационной оценки реологических свойств геологического пространства с точностью  $\pm 30\%$ . Согласно этим оценкам, метод применим для изучения геологических тел и структур широкого пространственного диапазона:  $5 > \Delta H/D > 0,1$ , где  $\Delta H$  – вертикальная мощность источника. В диапазоне  $2 > \Delta H/D > 0,5$  точность построения  $\mu_z$ -моделей не превышает 10 %.

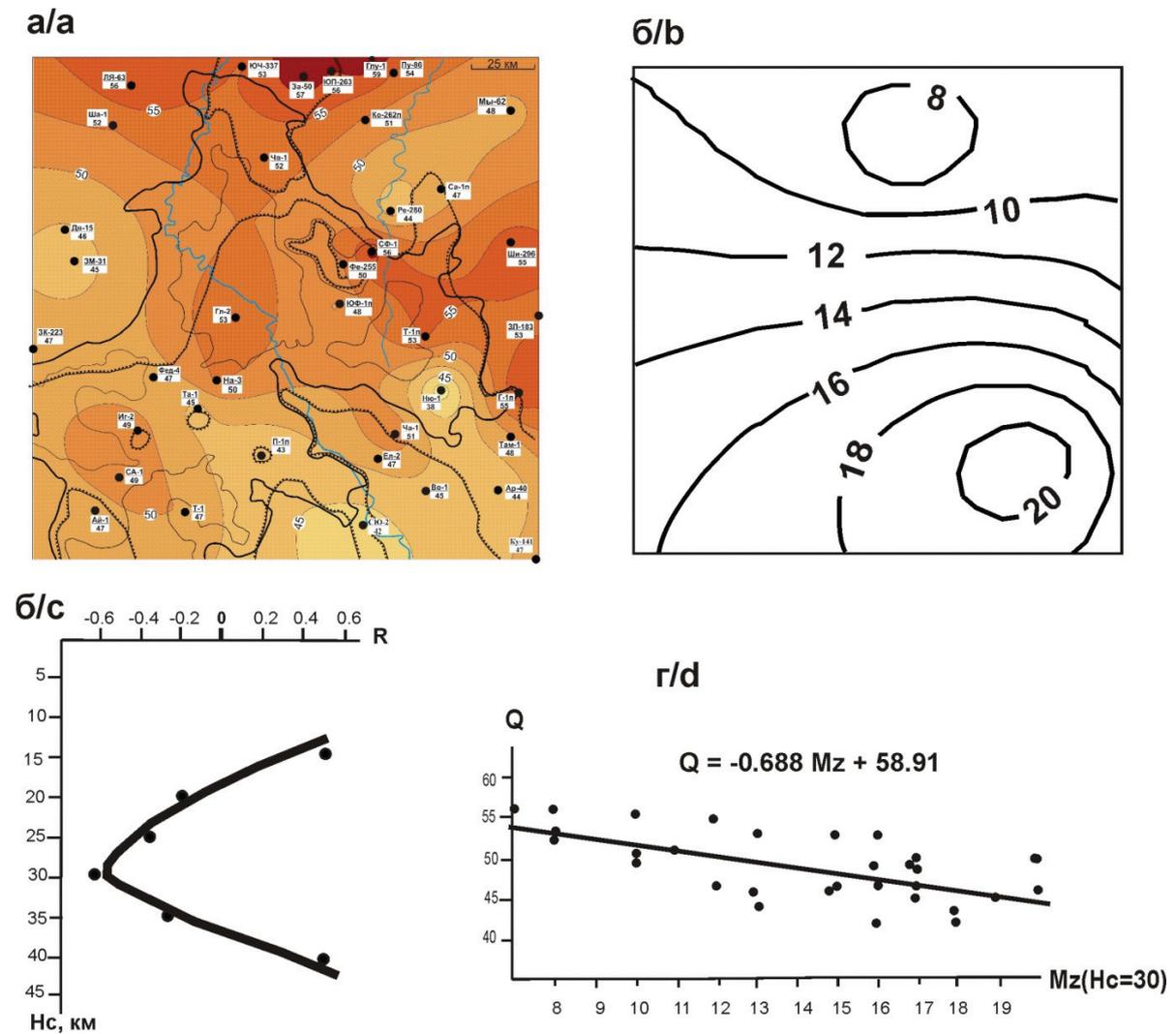
Опыт применения  $\mu_z$ -моделей в разнообразных по геологическому строению районах Северо-Восточной Азии и Австралии для диагностики и описания реологических неоднородностей земной коры и верхней мантии [12–14] доказывает, что в жестких, т. е. более вязких, средах (древние метаморфические комплексы, пластины океанической коры) этот параметр имеет высокие значения, а в зонах реологического разуплотнения (аккреционных призмах, вулканических покровах и молодых впадинах) – низкие. В верхней мантии астеносфера уверенно диагностируется по затуханию и поглощению сейсмических волн [17] и зонам высокой электрической проводимости [18], с которыми совпадают минимумы  $\mu_z$ -параметра [13].

Во многих районах [12, 13, 19] зоны низкой плотностной контрастности в земной коре и верх-

ней мантии совпадают с температурными максимумами, т. е.  $\mu_2$ -параметр и температура (или тепловой поток) связаны между собой обратной корреляционной зависимостью. В Томской области исследована связь теплового потока из доюрского основания осадочной толщи с плотностной контрастностью земной коры и верхней мантии до глубины 50 км в пределах Нюрольской и Усть-Тымской мегавпадин (рис. 1, 2). Были вычислены коэффициенты корреляции теплового потока и плотностной контрастности в разных глубинных срезах  $\mu_2(x, y, H_c)$ -модели, которые дают основание предполагать, что на территории Нюрольской мегавпадины источники тепловых аномалий залегают на средней глубине порядка 30 км, а на терри-

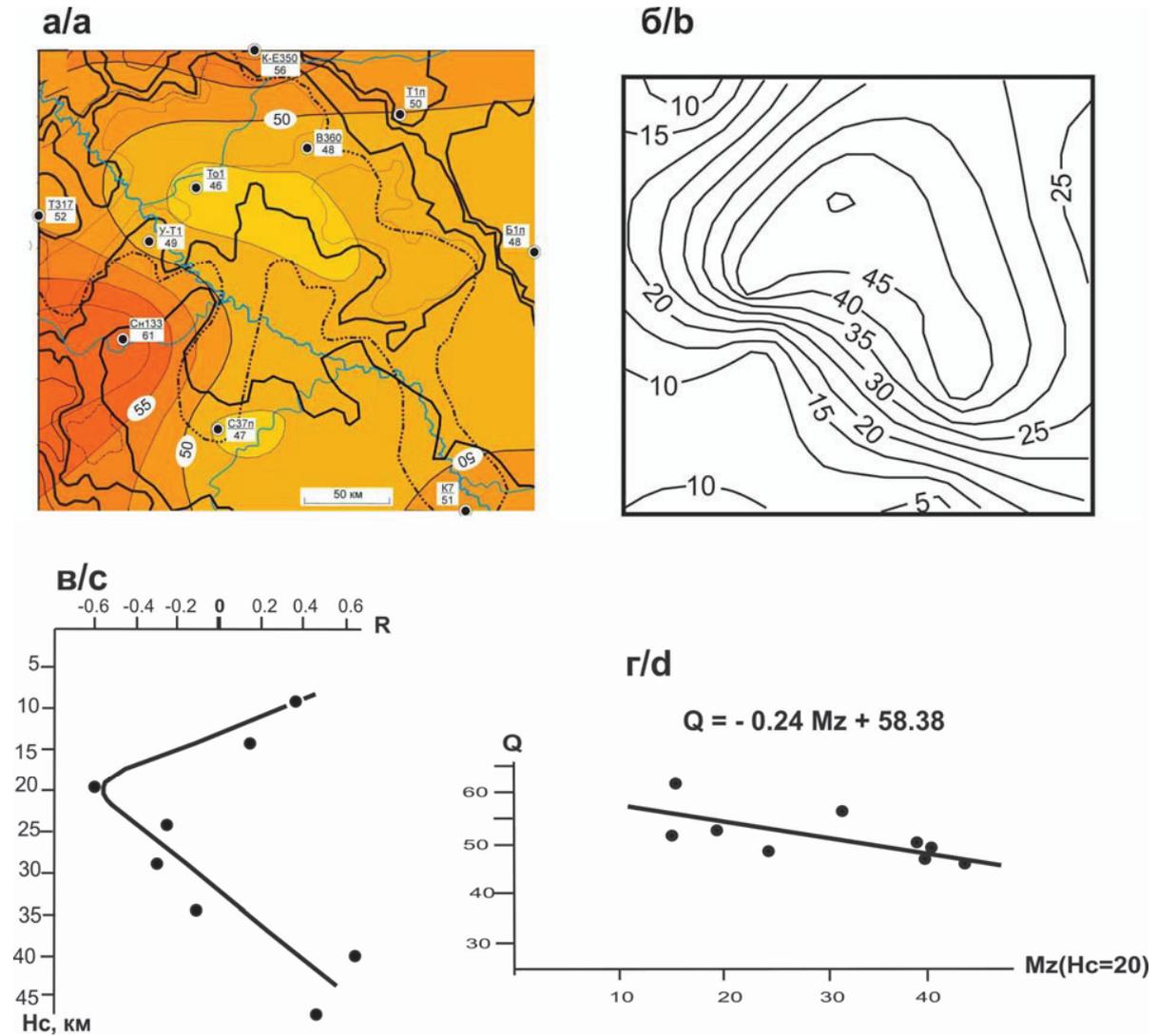
тории Усть-Тымской – 20 км (пиковые значения коэффициентов корреляции на рис. 1, в и 2, в). Для этих глубин построены корреляционные диаграммы связи плотности теплового потока из основания плитного чехла с плотностной контрастностью и вычислены коэффициенты уравнений регрессии (рис. 1, г и 2, г). По статистическим оценкам, на обеих территориях получены близкие коэффициенты корреляции и уравнения связи теплового потока с плотностной контрастностью нижнего слоя земной коры и переходного слоя «кора–мантия».

Интерпретация значений плотности теплового потока (таблица) показывает, что температура в основании земной коры центральных и юго-запад-



**Рис. 1.** Территория Нюрольской мегавпадины. Связь плотностной контрастности с тепловым потоком: а, б) карты плотности теплового потока ( $mW/m^2$ ) из доюрского основания (а) [21] и плотностной контрастности нижнекорового слоя (б); в) коэффициент корреляции (R) теплового потока с плотностной контрастностью в разных глубинных срезах; г) корреляционная связь теплового потока с плотностной контрастностью на глубине 30 км. Расположение территории – на рис. 4

**Fig. 1.** The Nyurov basin territory. Relation of density contrast with the heat flow: а, б) heat flow maps ( $mW/m^2$ ) from PreJrassic basement (а) [21] and density contrast of the lower crust layer (б); в) diagram of correlation coefficient of heat flow with density contrast for different deep slices; д) correlation connection of heat flow with density contrast at the depth of 30 km. Location of the territory is shown on Fig. 4



**Рис. 2.** Территория Усть-Тымской мегавпадины. Связь плотностной контрастности с тепловым потоком: а, б) карты плотности теплового потока ( $\text{мВт}/\text{м}^2$ ) из доюрского основания (а) [22] и плотностной контрастности нижнекорового слоя (б); в) коэффициент корреляции ( $R$ ) теплового потока с плотностной контрастностью в разных глубинных срезах; г) корреляционная связь теплового потока с плотностной контрастностью на глубине 20 км. Расположение территории на – рис. 4

**Fig. 2.** The Ust-Tim basin territory. Relation of density contrast with the heat flow: а, б) heat flow maps ( $\text{mW}/\text{m}^2$ ) from PreJurassic basement (а) [22] and density contrast of the lower crust layer (б); в) diagram of the correlation coefficient of heat flow with density contrast for different deep slices; д) correlation connection of heat flow with density contrast at the depth of 30 km. Location of the territory is shown on Fig. 4

ных районов Томской области ( $718\text{--}827^\circ\text{C}$ ) в два раза превышает среднюю температуру поверхности мантии под континентами ( $400^\circ\text{C}$ ) [4] и на прилегающих территориях Сибирского кратона [20]. Это предполагает существование мощного источника тепла в подкоровой мантии – вероятной зоны частичного плавления.

Полученные оценки (рис. 1, 2) и предшествующий опыт [12–14] дают основание предположить, что аномалии пониженной плотностной контрастности в земной коре являются индикаторами зон и областей, хорошо проницаемых для потоков тепла из подкорового вязкого слоя, и они генетически связаны с нефтеносностью осадочно-

го чехла так же, как повышенные значения плотности теплового потока в основании плитных отложений. Как будет показано ниже, участки, зоны и области минимальных значений  $\mu_2$ -параметра в западных районах Томской области совпадают с нефтепромысловыми площадями и районами, а это позволяет предположить, что в зонах реологического разуплотнения глубоких слоев земной коры (минимумах  $\mu_2$ -параметра) обеспечиваются условия, благоприятные для образования месторождений нефти и газа в мезозойской осадочной толще.

Задачей нашего исследования является моделирование распределений плотностной контраст-

**Таблица.** Расчет температур в земной коре Усть-Тымской и Нюрольской мегавпадин

**Table.** Calculation of the temperature in the earth's crust of the Ust-Tym and Nural megatroughs

Слой земной коры Strata of earth's crust	Интервал глубин, км Depth interval, km	Мощность слоя $h$ , км Thickness $h$ , km	Теплопроводность $\lambda$ , Вт/м·град Thermal conductivity, W/m deg	Скважина Толпаровская 1 (Усть-Тымская мегавпадина) The well Tolparovskaya 1 (Ust-Tym megatrough)			Скважина Глухариная 2 (Нюрольская мегавпадина) The well Glucharinaya 2 (Nural megatrough)		
				Тепловой поток $q$ , мВт/м <sup>2</sup> Heat flow $q$ , mW/m <sup>2</sup>	$gradT$ , °C/км	Температура в основании слоя $T$ , °C Temperature at the base of the layer $T$ , °C	Тепловой поток $q$ , мВт/м <sup>2</sup> Heat flow $q$ , mW/m <sup>2</sup>	$gradT$ , °C/км	Температура в основании слоя $T$ , °C Temperature at the base of the layer $T$ , °C
Плитный мезозойский осадочный чехол Mesozoic plate sedimentary cover	0–3	3	1,65	46*	28*	102*	53*	32*	116*
Мезозойско-палеозойский осадочный Mesozoic and Paleozoic sedimentary	4–12	9	1,9	46	24	318	53	28	368
Гранитно-мета-морфический Granite and metamorphic	13–25	13	2,3	46	20	578	53	23	667
Базальтовый Basaltic	26–35	10	3,4	46	14	718	53	16	827

Примечание. \* значения получены в результате применения метода палеотемпературного моделирования отложений плитного осадочного чехла [23]. Остальные значения геотемператур получены последовательным пересчетом от основания плитного осадочного чехла – «метод реперных точек» [24].

Note. \* the values were obtained as a result of application of the method of paleotemperature modeling of sediments of a plate sedimentary cover [23]. The rest values of geotemperatures were obtained by sequential recalculation from the base of the plate sedimentary cover – the « datum points method » [24].

ности ( $\mu_2$ -параметра) в непрерывном 3D-пространстве до глубины 50 км с целью сравнительной (относительной) оценки реологических состояний геологических сред и их связи с размещением нефтяных и газоконденсатных месторождений Томской области.

#### Методика эксперимента

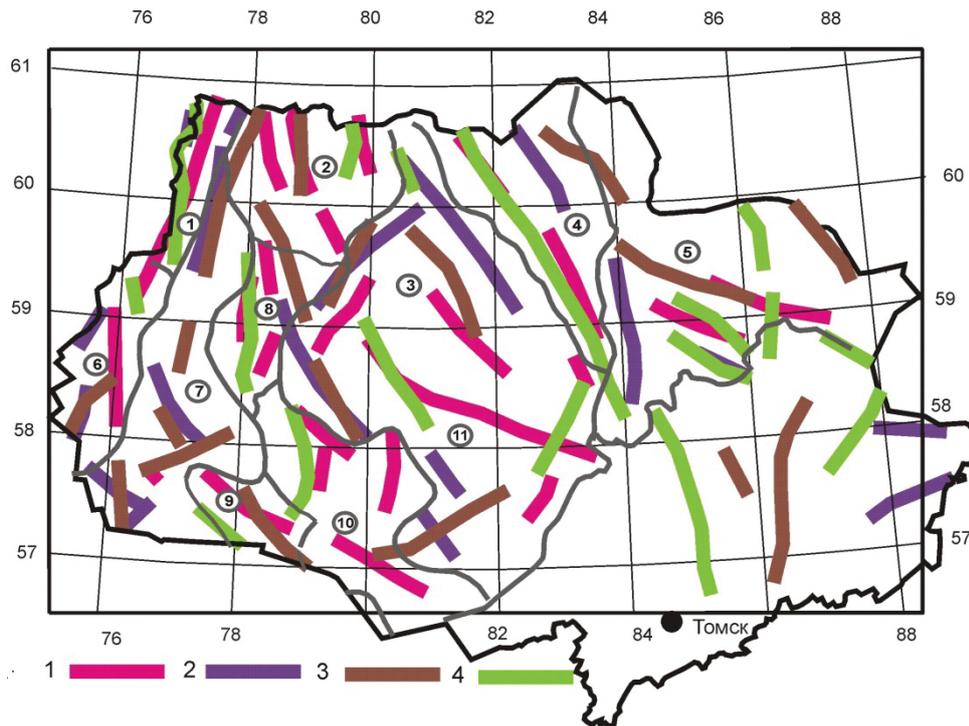
Для построения 3D-модели плотностной контрастности земной коры Томской области были определены глубины залегания центров масс плотностных неоднородностей на широтных профилях, отстоящих друг от друга на 25 км. Каждое элементарное вычисление являлось случайным, и геологическая природа его не рассматривалась. Построенные по этим профилям кривые аномалий Буге трансформировались осреднением с тем, чтобы охватить весь видимый пространственный спектр симметричных гравитационных возмущений обоого знака. Вычисления накапливались в массиве  $Z_0(x, y)$ . Всего были определены кажущиеся центры масс 195 коровых и 179 мантийных плотностных неоднородностей с квазиизометричным поперечным сечением.

На втором этапе исследуемое геологическое пространство было разбито на слои в интервалах глубин: 6–15, 11–20, 16–25, 21–30, 27–40, 32–45, 37–50, 42–60 и 52–70 км и для каждого слоя были вычислены значения  $\mu_2$ -параметра на глубинах, соответственно:  $H_c=5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40$  и

50 км. В верхнем слое земной коры (0–5 км) число плотностных неоднородностей компактного класса при данном масштабе исследований было недостаточным для построения схемы плотностной контрастности продуктивной мезозойской осадочной толщи.

Вычисления были объединены в цифровом массиве  $\mu_2(x, y, H_c)$ , который использовался в дальнейшем для построения карт-срезов и разрезов  $\mu_2$ -модели. Более подробно с теоретическими основами и методикой построения моделей  $\mu_2(x, y, H_c)$  можно познакомиться в работе [14].

Гравитационные аномалии Томской области не коррелируются однозначно с тектоническими структурами и нефтегазоносностью. Случаи полного совпадения осей структур осадочной толщи и осей гравитационных аномалий редки, а там, где эти совпадения достаточно близки, локальные гравитационные максимумы чаще всего совпадают с прогибами в осадочной толще, а минимумы – с поднятиями первого порядка (рис. 3). Первый тип инверсных взаимоотношений имеет место в Нюрольско-Колтогорском, Каймысовском и Усть-Тымском районах, а второй – в Вартовском, Преденейском и Средне-Васюганском. Только иногда (в Межовском и Александровском районах) гравитационные максимумы совмещаются с антиклинальными структурами, что обычно бывает в районах с унаследованным залеганием структур и направленным увеличением плотности с глубиной.



**Рис. 3.** Оси линейных структур и гравитационных аномалий: 1 – антиклинали; 2 – синклинали; 3, 4 – гравитационные линейные максимумы (3) и минимумы (4). Обозначения нефтегазоносных районов – на рис. 4

**Fig. 3.** Axes of linear structures and gravity anomalies: 1 are anticlines; 2 are synclines; 3, 4 are linear gravity maximums (3) and minimums (4). Designations of oil-gas regions are shown in Fig. 4

Многочисленные нарушения этой закономерности в Томской области свидетельствует о значительной вертикальной неоднородности земной коры, обусловленной тектонической проработкой, дифференцированным метаморфизмом, горизонтальными перемещениями и неравномерным флюионасыщением стратиграфического разреза и нижележащего фундамента.

Сложный характер связи гравитационных аномалий с тектоническими структурами затрудняет применение плотностного моделирования глубинных структур земной коры, а сейсморазведочные данные в Томской области предоставляют информацию в основном до глубины 6–8 км. В этих условиях вынужденным является применение статистического подхода к интерпретации гравитационных аномалий.

Исходя из охарактеризованных условий, построение  $\mu_z(x, y, H_c)$ -моделей было выполнено раздельно для гравитационных максимумов и минимумов. В большинстве коровых срезов распределения  $\mu_z$ -параметра, построенные по аномалиям разного относительного знака, оказались в общих чертах близкими, т. е. земная кора Томской области до глубины 30 км достаточно определенно подразделилась на восточную – более вязкую (жесткую), и западную – менее вязкую в обеих моделях ( $H_c=15, 20, 25$  и 30 км). Ниже глубины 50 км плотностная контрастность верхней мантии увеличивается в западном направлении – в сторону Сибирской платформы.

В результате анализа распределений плотностной контрастности источников гравитационных аномалий разного относительного знака и в разных срезах земной коры было установлено, что размещение нефтяных и газовых месторождений наиболее тесно коррелируется с плотностной контрастностью коровых плотностных неоднородностей положительного относительного знака. Эта модель принята в качестве базовой при моделировании реологических свойств земной коры и поисках связи аномалий  $\mu_z$ -параметра с тепловым потоком и нефтегазоносностью.

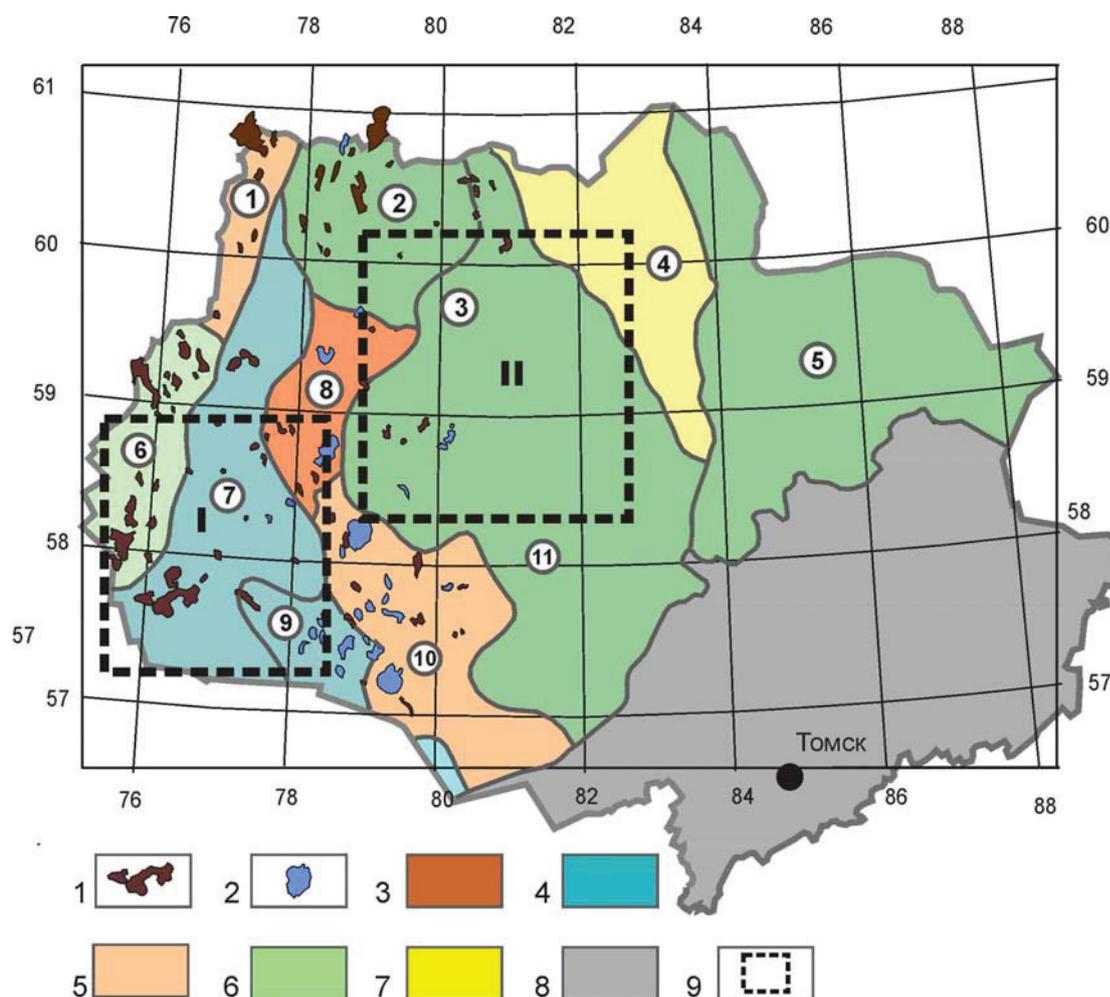
#### Краткая характеристика углеводородного потенциала Томской области

В Томской области основные ресурсы углеводородов расположены в ее западной половине. Наиболее продуктивными являются Вартовский, Нью-рольско-Колтогорский, Средне-Васюганский, Пудинский и Межовский районы с преимущественно нефтяными и нефте-газоконденсатными месторождениями (рис. 3). Центральная и северо-восточная части области характеризуются средней продуктивностью осадочной толщи с ресурсами углеводородов 10–15 т/км<sup>2</sup>. Однако они, так же как и юго-восток области, могут быть отнесены к территориям с не полностью выясненными перспективами. В одной из недавних работ [11], однако, высказано предположение о высоких перспективах северо-восточных районов области (Восточно-Пандугинская впадина).

подавляющая часть месторождений углеводородов приурочена к антиклинальным структурам в осадочной толще III–IV порядков. Результаты палеотемпературного моделирования [25] показывают, что по всему разрезу осадочной толщи в течение последних 70 млн лет происходило увеличение температуры, что свидетельствует о существовании мощного и постоянного источника тепла в глубоких слоях земной коры и в подкоровой мантии. Высокой температуры в палеозойском структурном этаже (S-D) было достаточно для метасоматической доломитизации известняков, и это привело к улучшению его коллекторских свойств [26].

#### Плотностная контрастность земной коры и подкоровой мантии

Плотностная контрастность земной коры и подкорового слоя верхней мантии до глубины 50 км описывается послойными срезами (рис. 5–7) и разрезами (рис. 8)  $\mu_2$ -модели. Ближайший к поверхности срез (рис. 5, а) характеризует реологию нижней части осадочной толщи, залегающей на кристаллическом фундаменте. На схеме (рис. 5, а) выделяются две области, различающиеся уровнем  $\mu_2$ -параметра, который может быть обусловлен разной глубиной залегания фундамента. Зоне интенсивного нефтегазоаккумуляции на юго-западе



**Рис. 4.** Нефтегазоносность Томской области (по материалам Томского филиала ФБУ «Территориальный фонд геологической информации по СФО», 2016): 1–2 – месторождения: нефтяные (1), нефтегазоконденсатные и газоконденсатные (2); 3–7 – нефтегазоносные районы с плотностью ресурсов углеводородов, т/км<sup>2</sup>: 3 – >20, 4 – 15–20, 5 – 10–15, 6 – 5–10, 7 – <5; 8 – бесперспективные территории; 9 – территории детальных исследований теплового потока: I – Нюрольская, II – Усть-Тымская. Обозначения нефтегазоносных районов (цифры в кружках): 1 – Вартовский, 2 – Александровский, 3 – Усть-Тымский, 4 – Пыль-Караминский, 5 – Преденисейский, 6 – Каймысовский, 7 – Нюрольско-Колтогорский, 8 – Средне-Васюганский, 9 – Межовский, 10 – Пудинский, 11 – Парабельский

**Fig. 4.** Oil-gas bearing of the Tomsk region (on the data of the Tomsk branch of «Territorial fund of geological information, Siberian federal district», 2016): 1 are oil deposits; 2 are gas deposits; 3–7 are oil-gas regions with hydrocarbon density, t/km<sup>2</sup>: 3 – >20, 4 – 15–20, 5 – 10–15, 6 – 5–10, 7 – <5; 8 is non-perspective territories; 9 are territories of detailed researches of the heat flow: I – Nyurol, II – Ust-Tim. Oil-gas regions (figures in circles): 1 – Vartovskiy, 2 – Alexandrovskiy, 3 – Ust-Timskiy, 4 – Pil-Karaminskii, 5 – Predeniseyskiy, 6 – Kaimisovskiy, 7 – Nuyrol-Koltogorskiy, 8 – Sredne-Vasyuganskiy, 9 – Mezhovskiy, 10 – Pudinskiy, 11 – Parabelskiy

области соответствуют минимальные значения плотностной контрастности.

В среднем слое земной коры, в интервале глубин 16–25 км (рис. 5, б), регистрируются три локальных максимума плотностной контрастности на севере, в центре и на юго-востоке области, которые могут соответствовать выступам допалеозойского фундамента. Северный и юго-восточный максимумы соответствует поднятиям фундамента, картируемым по сейсмическим данным [9]. В западных районах Томской области локальные минимумы  $\mu_z$ -параметра совпадают с участками концентрации нефтяных (на севере и юго-западе) и нефтегазоконденсатных (на юге) месторождений.

Таким образом, между значениями  $\mu_z$ -параметра в верхней и средней коре и нефтегазоносностью мезозойских отложений обнаруживается обратная корреляционная связь, которая может быть обусловлена реологией осадочной толщи и реологическими свойствами фундамента, неодинаково проявленными в разных районах Томской области. Последние могли изменяться под влиянием тектонической нарушенности (раздроблении) и флюидонасыщенности.

В нижнем слое земной коры (рис. 6, а) распределение плотностной контрастности коррелируется с ее мощностью (рис. 6, б): зоне наибольшего градиента  $\mu_z$ -параметра соответствует резкое сокращение мощности земной коры. Району утолщенной коры на северо-востоке Томской области соответствует региональный максимум плотностной контрастности. В западных районах области регистрируется линейный минимум плотностной контрастности, совпадающий с зоной высокой концентрации месторождений углеводородов (рис. 7). Этот минимум на большей его части совпадает также с зоной наибольшей продуктивности нефтегазоконденсатных месторождений. Мы предполагаем, что реологическое разуплотнение нижнего слоя земной коры, связанное с его температурной характеристикой, обеспечивает благоприятные условия для образования и накопления углеводородных залежей в осадочной толще, в первую очередь – газоконденсатных месторождений.

Реологическое состояние подкорового слоя верхней мантии (рис. 7), где температура достигает 830 °С, также влияет на размещение нефтяных и газовых месторождений. На глубине 30 км (рис. 8, а) обширный минимум плотностной контрастности на западе области совмещается с большей частью месторождений нефти и газа, а на глубине 40 км эта связь теряется, хотя отдельные нефтеносные (Вартовский, Александровский,

Каймысовский) и газоносные (Межовский, Пудинский) районы коррелируются с локальными минимумами  $\mu_z$ -параметра на этой глубине.

Ниже глубины 40 км области и локальные зоны нефтегазонакопления пространственно не коррелируют с реологическими разуплотнениями верхней мантии. Это указывает на то, что источники тепла, способствующие нефтегазонакоплению,

залегают в нижнем слое земной коры и подкоровой верхней мантии в интервале глубин 15–45 км (рис. 5, б, 6, а, 7, а).

Это хорошо иллюстрируют разрезы  $\mu_z$ -модели (рис. 8), в которых широкая зона концентрации месторождений нефти и газа в западных районах Томской области приурочена к зоне разрыва жесткого гранитно-метаморфического слоя земной коры (интервал глубин 12–25 км), подстилаемого слоем пониженной вязкости. Характерно, что нефтяные месторождения располагаются преимущественно в прибортовых частях жестких блоков II порядка (Каймысовский и Вартовский районы), а газоконденсатные – в зоне наименьшей контрастности, или разрыва, гранитно-метаморфического слоя (Средне-Васюганский и Межовский районы). Такая особенность может быть использована при выборе направления дальнейших поисковых работ. Второй закономерностью является приуроченность углеводородных залежей, особенно газовых месторождений, к региональным гравитационным минимумам с амплитудой до 30 мГл (рис. 8), которые маркируют мощные зоны сквозькоровых реологических разуплотнений.

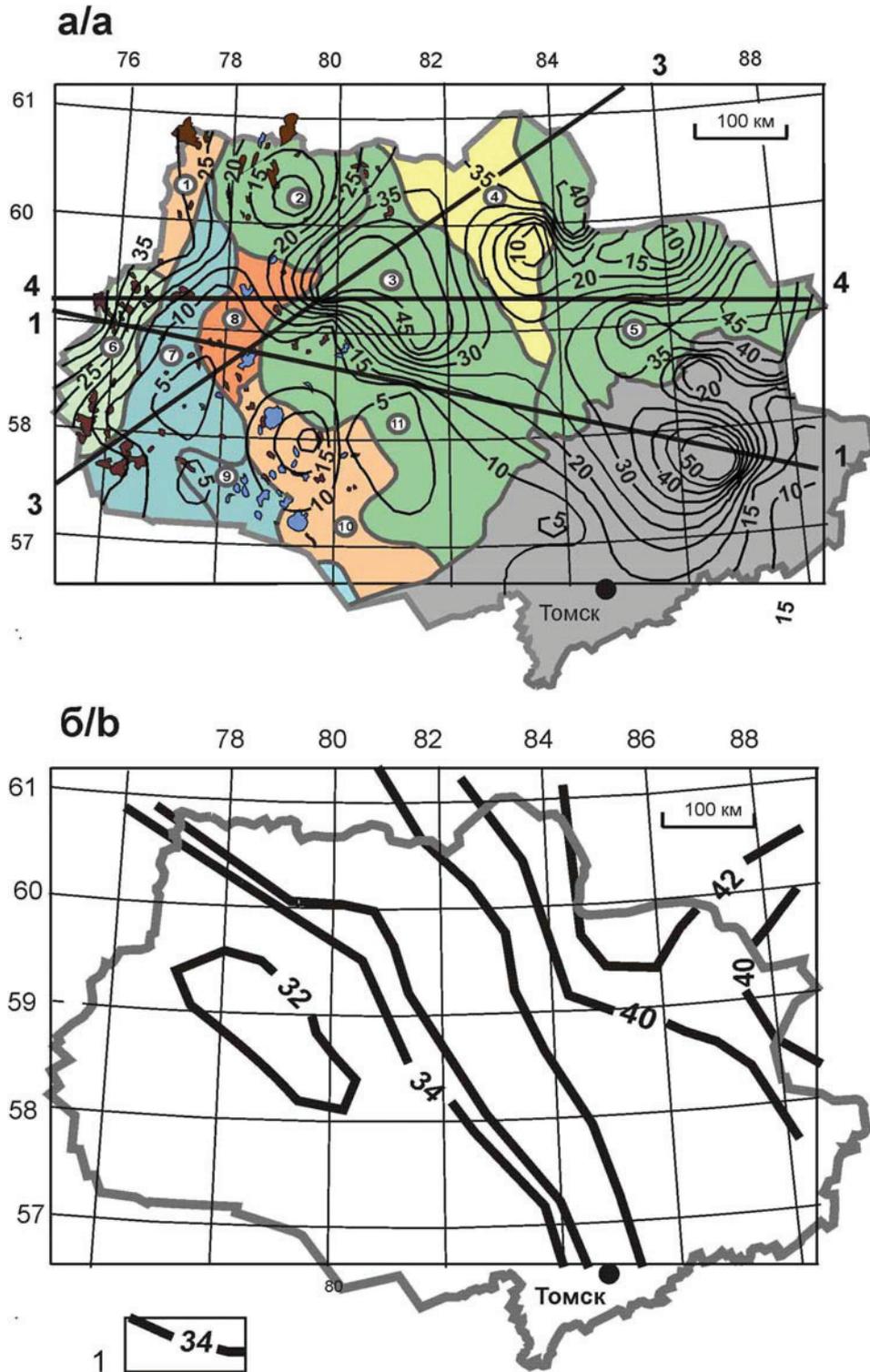
Таким образом, полученные данные (рис. 6–8) свидетельствуют о том, что нижний слой земной коры в интервале глубин 15–40 км на западе области находится в вязком состоянии. Физически это выражается в том, что в нем отсутствуют контрастные плотностные неоднородности.

Продолжение зоны низкой плотностной контрастности на север (севернее широты 60 °S) интерпретируется [28] как глубинная граница Сибирского кратона с Западно-Сибирской плитой. Эта граница представляет собой сквозькоровую зону коллизионных (тектонически нарушенных и измененных) пород, а на поверхности она выражена зоной сближенных надвигов со стороны Енисейского кряжа. Статистическая гравитационная модель плотностной контрастности земной коры (рис. 6, 8) вполне соответствует таким представлениям.

На севере и юго-востоке области высокая плотностная контрастность нижнекорового слоя типична для мафического («базальтового») слоя [13, 14]. Граница областей разной вязкости в нижнекоровом слое (рис. 6, а) проходит по региональному разлому, совпадающему со спрямленным участком реки Обь. На этой же границе происходит резкий скачок мощности земной коры от 32 км в левобережье Оби до 36 км в правобережье (рис. 6, б).

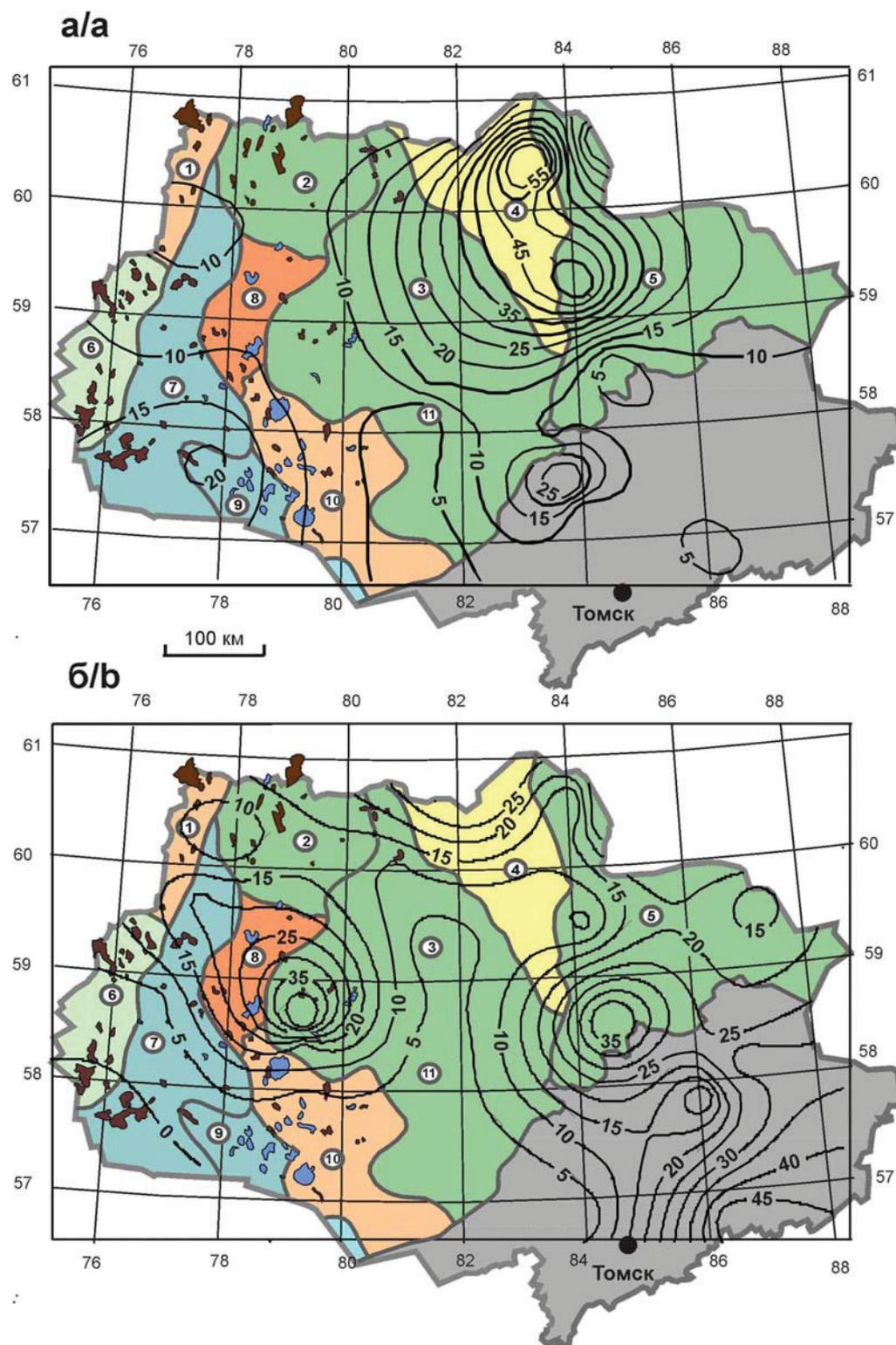
В разрезах 3–3 и 4–4 (рис. 9) ясно проявлено структурное несогласие на границе гранитно-метаморфического и мафического жестких слоев, при этом гранитно-метаморфический слой смещен на запад от нижнекорового. Следует предположить, что жесткие пластины в средней части коры были надвинуты на вязкий слой в центральных районах области со стороны Енисейского кряжа, что согласуется с некоторыми данными [28], и они экранировали источники тепла и флюидов из нижнекорового и подкорового вязких слоев. И это может быть





**Рис. 6.** Плотностная контрастность на глубине 20 км (а) и схема мощности земной коры (б) [27]: 1 – изопахиты мощности земной коры, км. Другие обозначения – на рис. 4, 5

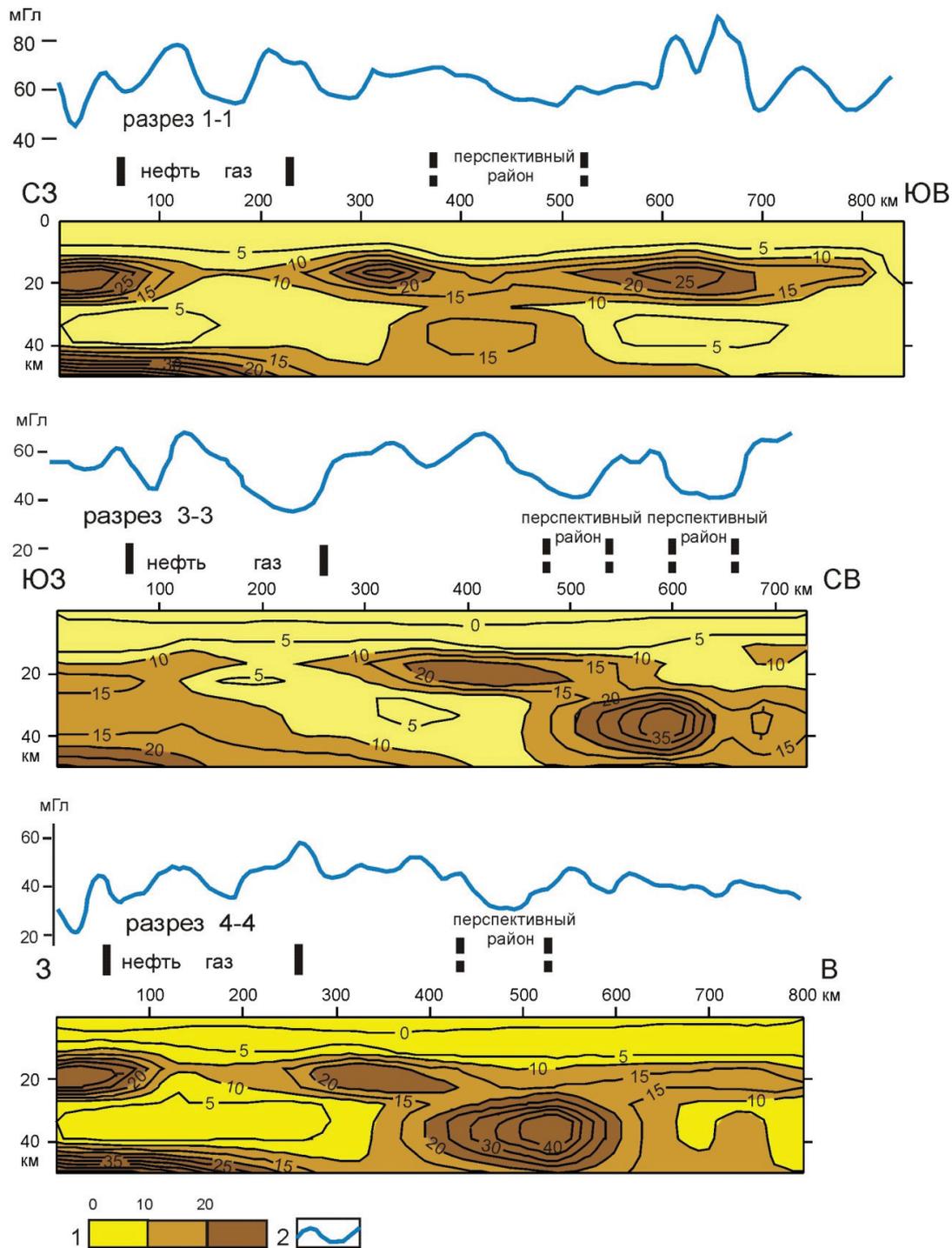
**Fig. 6.** Density contrast at the depth of 20 km (a) and the scheme of crust thickness (b) [27]: 1 is the crust thickness isolines, km. Other designations are in Fig. 4, 5



**Рис. 7.** Плотностная контрастность земной коры в срезах на глубине 30 (а) и 40 (б) км. Условные обозначения на – рис. 4, б  
**Fig. 7.** Density contrast of the crust at the depth of 30 (a) and 40 (b) km. Designations are in Fig. 4, б

причиной низкой продуктивности осадочной толщи в центральных и восточных районах Томской области (рис. 3).

Поэтому в противоположность широкой западной зоне нефтегазонакопления перспективы центральных и восточных районов связываются нами с ло-

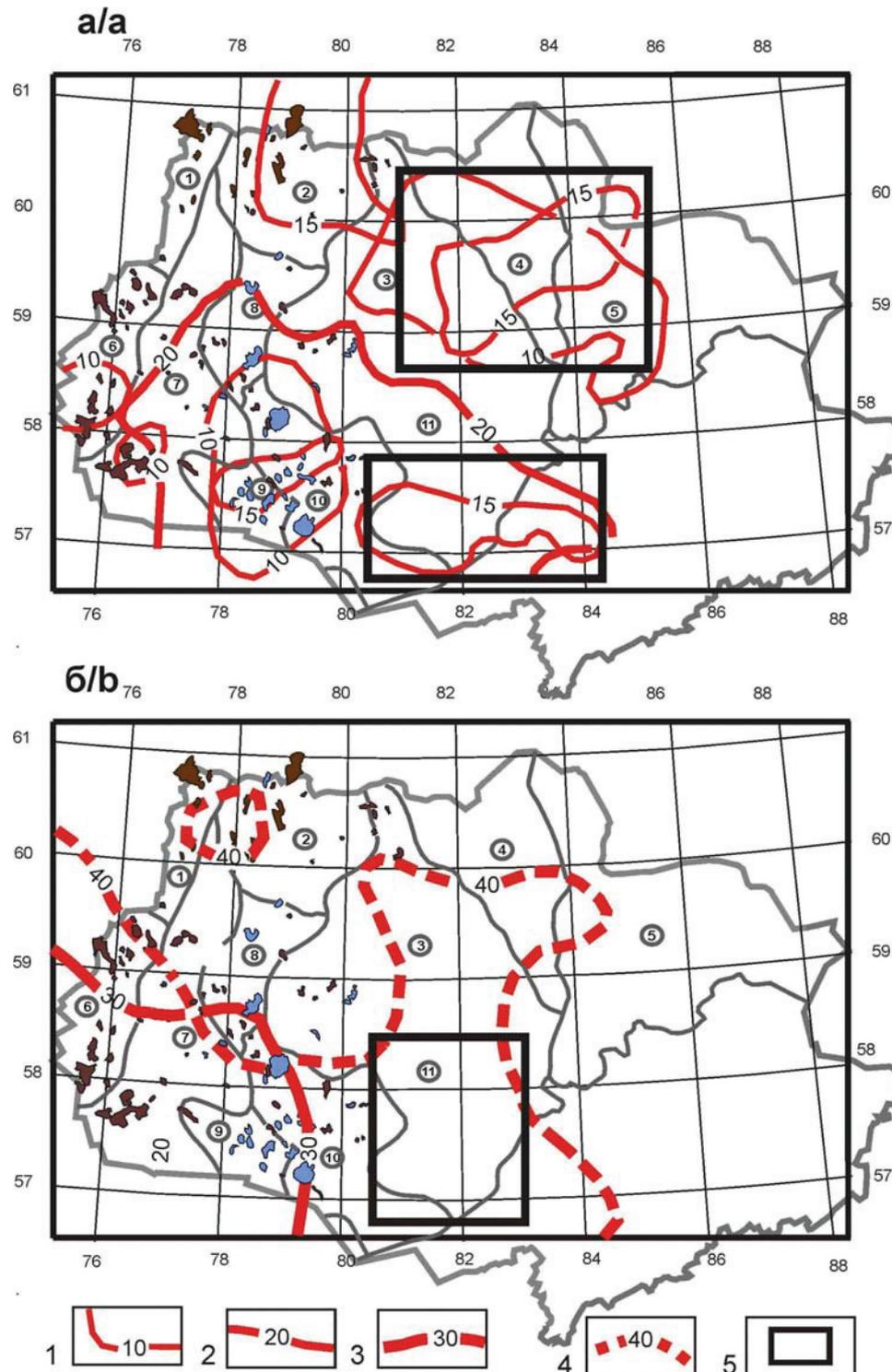


**Рис. 8.** Распределения плотностной контрастности в разрезах земной коры: 1 – шкала раскраски разрезов (1 ед. =  $10^{-2}$  кг/м<sup>3</sup>/км); 2 – аномалии силы тяжести

**Fig. 8.** Distributions of density contrast in sections of the crust: 1 is the coloring scale of sections of the  $\mu_z$ -parameter; 2 are gravity anomalies

кальными зонами тепло-флюидомиграции, обеспечивающими условия для образования месторождений нефти и газа на проницаемых участках в зонах разрыва или размягчения фундамента осадочных толщ.

**Реологические предпосылки и новые перспективы нефтегазоносности Томской области**  
 Региональные перспективы нефтегазоносности, обусловленные реологическим состоянием земной



**Рис. 9.** Зоны пониженной вязкости в земной коре (а) и верхней мантии (б), способствующие образованию углеводородных залежей: 1–4 – границы зон пониженной вязкости на глубинах, соответствующих цифрам в изолиниях; 5 – контуры перспективных площадей

**Fig. 9.** Lower viscous zones in the crust (a) and uppermost mantle (b), which promote formation of hydrocarbon deposits: 1–4 are the boundaries of zones with lower viscosity at depth corresponding to figures under isolines; 5 are the contours of perspective areas

коры, можно разделить на три характеристических признака: 1) реология осадочной толщи, определяющая ее коллекторские свойства; 2) реология нижнего

слоя земной коры, обеспечивающая температурные условия нефтегазоаккумуляции в осадочной толще; 3) реология подкорового слоя верхней мантии. Пер-

вые два признака являются ведущими, а совмещение последних двух признаков в проницаемых зонах земной коры может иметь неоднозначное последствие.

В лучшем случае оно может способствовать нефтегазонакоплению за счет дополнительного источника тепла.

По степени проницаемости нижних слоев осадочной толщи и фундамента для потока теплофлюидов из верхней мантии в северных районах Томской области для дальнейшего изучения может быть рекомендован Пыль-Караминский район с прилегающими территориями Усть-Тымского и Преденисейского районов (рис. 9, а), в настоящее время считающихся малоперспективными (рис. 3). Реологические предпосылки для образования нефтяных и газоконденсатных залежей в этом районе идентичны признакам, выявленным в Александровском, Каймысовском, Межовском и Пудинском районах (рис. 9, а).

Сейсмические и геологические предпосылки перспективности северных районов Томской области были выявлены ранее [9], но значительных притоков нефти и газа в скважинах здесь не получено. Наши материалы независимо от сейсмогеологических критериев подтверждают необходимость дальнейшего изучения этой территории. Второй перспективной территорией является юг Томской области, где вероятно восточное продолжение локальных зон нефтегазонакопления со стороны Пудинского района. Судя по распределениям плотностной контрастности (рис. 9, а), здесь можно ожидать более глубокое залегание тепловых источников и, соответственно, более глубокое залегание углеводородных залежей.

На глубинах 40–60 км под рекомендуемым к изучению Пыль-Караминским районом располагается мантийная зона пониженной вязкости (рис. 9, б), которая тоже может быть источником тепла, необходимого для образования углеводородных залежей. Основной проблемой в этом районе является существование жестких пластин в нижней коре (разрез 3–3 на рис. 8), которые могут экранировать поступление теплофлюидов из подкоревой мантии. Возможность образования месторождений в осадочной толще регламентируются здесь тремя условиями: (1) наличием коллекторов, (2) мощностью теплового потока из мантии и (3) степенью ослабления теплового потока нижнекоревыми жесткими пластинами.

По признаку наибольшей проницаемости (меньшей вязкости) нижнего слоя земной коры и верхней мантии для дальнейшего изучения реко-

мендуется Парабельский район на юге области (рис. 9, б). Этот район по глубинным реологическим характеристикам близок к южной части Нюрольско-Колтогорского, восточной части Пудинского, Каймысовскому и Межовскому районам, где наблюдается совмещение зон пониженной вязкости в нижнем слое коры и подкоревой мантии. Пониженная вязкость гранитно-метаморфического слоя – фундамента осадочной толщи – (рис. 9, а) здесь также является благоприятной для образования нефтяных и газоконденсатных залежей.

#### Заключение

В результате моделирования реологических состояний геологических сред в Томской области определены главные элементы глубинного строения ее территории, выявлена связь нефтегазоносных районов с зонами пониженной вязкости в нижнем слое доюрской осадочной толщи, фундаменте, нижнем слое земной коры и подкоревой мантии. Установлено резкое различие реологических состояний земной коры в западных и восточных районах области. В западных районах кристаллическая кора менее вязкая, возможно раздроблена и, как следствие, более проницаема для потоков теплофлюидов, а в восточных – более жесткая и характеризуется увеличенной мощностью, что определяет резкое различие продуктивности осадочной толщи на западе и востоке территории.

Установлена корреляционная связь плотностной контрастности – индикатора реологических состояний геологических сред – с тепловым потоком из доюрского основания осадочной толщи, что предполагает существование источников тепла в зонах реологических разуплотнений нижнего слоя земной коры и подкоревой мантии, а также непосредственное влияние глубинных зон пониженной вязкости на образование углеводородных залежей в осадочной толще.

По наличию зон пониженной вязкости на северо-востоке и юге области выделены два района, перспективных на обнаружение новых месторождений нефти и газа. Формальные поисковые признаки углеводородных залежей на этих площадях идентичны реологическим характеристикам земной коры и подкоревой мантии в известных нефтегазоносных районах на западе области. Следует отметить, что наш независимый прогноз в известной мере согласуется с прогнозом перспектив юго-востока Западной Сибири [29] и, в частности, Правобережья Оби в Томской области [30], а также с сейсмическими признаками перспектив ее северо-восточных районов [11].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kurchikov A. R. The geothermal regime of hydrocarbon pools in West Siberia // Russian Geology and Geophysics. – 2001. – V. 42. – № 11–12. – P. 678–689.
2. Лобова Г.А., Попов С.А., Фомин А.Н. Локализация прогнозных ресурсов нефти юрско-меловых НГК Усть-Тымской мегавадины // Нефтяное хозяйство. – 2013. – № 2. – С. 36–40.
3. Petroleum potential of Lower-Jurassic deposits in Nurolsk megadepression / G. Lobova, E. Osipova, V. Isaev, D. Terre // Scientific and Technical Challenges in the Well Drilling Progress. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – V. 24. URL: [http://iopscience.iop.org/1755-1315/24/1/012001/pdf/1755-1315\\_24\\_1\\_012001.pdf](http://iopscience.iop.org/1755-1315/24/1/012001/pdf/1755-1315_24_1_012001.pdf) (дата обращения: 12.04.2017).
4. Сорохтин О.Г., Ушаков С.А. Развитие Земли. – М.: Изд-во МГУ, 2002. – 506 с.

5. Catagenesis of organic matter at the top and base of the Jurassic complex in the West Siberian megabasin / A.E. Kontorovich, A.N. Fomin, V.O. Krasavchikov, A.V. Istomin // *Russian Geology and Geophysics*. – 2009. – V. 50. – № 11. – P. 917–929.
6. Historical-geological modeling of hydrocarbon generation in the mesozoic–Cenozoic sedimentary basin of the Kara sea (basin modeling) / A.E. Kontorovich, L.M. Burshtein, N.A. Malyshev, P.I. Safronov, S.A. Gusrkov, S.V. Ershov, V.A. Kazanenko, N.S. Kim, V.A. Kontorovich, E.A. Kostyreva, V.N. Melenevsky, V.R. Livshits, A.A. Polyakov, M.B. Skvortsov // *Russian Geology and Geophysics*. – 2013. – V. 54. – № 8. – P. 1179–1226.
7. Stotskiy V., Isaev V., Fomin M. An assessment of the geotemperature conditions of Bazhenov oil generation (Koltogor mezodepression and its framing structures) // *Scientific and Technical Challenges in the Well Drilling Progress. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2016. – V. 43. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/43/1/012017.pdf> (дата обращения: 12.04.2017).
8. Палеозой Западной Сибири в свете глубинных сейсмических исследований / В.Д. Кузнецов, А.С. Сальников, Б.А. Канарейкин, В.В. Титаренко // *Геофизика*. – 2010. – № 1. – С. 16–21.
9. Кузнецов В.Д., Сальников А.С., Титаренко В.В. Палеозойский нефтегазоносный комплекс Западной Сибири по данным глубинных сейсмических зондирований // *Геофизика*. – 2011. – № 4. – С. 18–24.
10. Нефтегазоносность Дальнего Востока и Западной Сибири по данным гравиметрии, геотермии и геохимии / В.И. Исаев, Ю.В. Коржов, Г.А. Лобова, С.А. Попов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 383 с.
11. Применение амплитудно-интерпретационного комплекса для выявления перспективных объектов на нефть и газ (Восток Томской области) / С.В. Зимина, Г.И. Тищенко, К.Ю. Смирнова, О.Д. Елисеева // *Известия Томского политехнического университета*. – 2011. – Т. 318. – № 1. – С. 63–68.
12. Petrishchevsky A.M. A viscous layer at the crust-mantle boundary in the Far East of Russia // *Geotectonics*. – 2008. – V. 42. – № 5. – P. 357–367.
13. Petrishchevsky A.M. Common features of the tectonosphere deep structure in the Western Pacific Margins (Northeast Asia Region and Australia) // *Geotectonics*. – 2016. – V. 50. – № 6. – P. 608–623.
14. Петрищевский А.М. Гравитационный метод оценки геологических свойств земной коры и верхней мантии (в конвергентных и плюмовых структурах Северо-Восточной Азии). – М.: Наука, 2013. – 192 с.
15. Integrated electromagnetic and geochemical surveys for petroleum exploration in the West Siberia / M.I. Eпов, E.Yu. Antonov, N.N. Nevedrova, V.V. Olenchenko, E.V. Pospeeva, D.V. Napreev, A.M. Sanchaa, V.V. Potarov, A.E. Plotnikov // *Russian Geology and Geophysics*. – 2014. – V. 55. – № 5–6. – P. 763–774.
16. Напреев Д.В., Оленченко Д.В. Комплексирование геофизических и геохимических методов при поиске залежей углеводородов в Усть-Тымском нефтегазоносном районе // *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. – 2010. – Т. 5. – С. 1–8. URL: [http://www.ngtp.ru/rub/4/6/\\_2010.pdf](http://www.ngtp.ru/rub/4/6/_2010.pdf)/yandex.ru (дата обращения 14.03.2017).
17. Kennet B.L.N., Abdulla A. Seismic wave attenuation beneath the Australasian region // *Australian Journal of Earth Sciences*. – 2011. – V. 58. – P. 285–295.
18. Wang L., Hitchman A. Australian continent uncovered by new 3D model // 24<sup>th</sup> International Geophysical Conference. – Perth, Australia, 13–18 February 2015. Post presentation. URL: <https://www.aig.org.au/events/24th-international-geophysical-conference-and-exhibition> (дата обращения: 20.11.2016).
19. Петрищевский А.М. Реологическая и геотермическая характеристики Охотоморского плюма // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2016. – Т. 327. – № 2. – С. 65–76.
20. Прокофьев А.А., Кронрод В.А., Кусков О.Л. Распределения температуры и плотности в литосферной мантии Сибирского кратона по данным региональных сейсмических моделей // *Вестник Отделения наук о Земле РАН*. – 2009. – № 1 (27). – С. 1–4. URL: [http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h\\_dggms/1-2009/informbul\\_1\\_2009/planet-20.pdf](http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dggms/1-2009/informbul_1_2009/planet-20.pdf)/yandex.ru (дата обращения 14.03.2017).
21. Осипова Е.Н. Нефтегазоносность (палеотемпературное моделирование) нижнемеловых отложений Нурольской мегападины // *Геофизика*. – 2014. – № 2. – С. 70–74.
22. Лобова Г.А. Нефтегазоносность Усть-Тымской мегападины // *Геофизический журнал*. – 2013. – Т. 35. – № 4. – С. 28–39.
23. Estimation of the Oil-and-Gas Potential of Sedimentary Depression in the Far East and West Siberia Based on Gravimetry and Geothermy Data / R.Yu. Gulenok, V.I. Isaev, V.Yu. Kosygin, G.A. Lobova, V.I. Starostenko // *Russian Journal of Pacific Geology*. – 2011. – V. 5. – № 4. – P. 273–287.
24. Номоконова Г.Г. *Физика Земли*. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 109 с.
25. Terrestrial heat flow and its role in petroleum geology / E. Osipova, V. Ivanov, V. Smirnov, R. Abramova // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. – 2015. – V. 24. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/27/1/012015/pdf> (дата обращения 14.04.2017).
26. Ковешников А.Е., Недоливко Н.М. Вторично-катагенетические преобразования доюрских пород Западно-Сибирской синеклизы // *Известия Томского политехнического университета*. – 2012. – Т. 320. – № 1. – С. 82–86.
27. Мощность земной коры // Национальный атлас России. Т. 2 / гл. ред. тома В.М. Котляков. URL: [www.geographyofrussia.com](http://www.geographyofrussia.com) (дата обращения: 2.02.2017).
28. Мельхов В.Р., Лыгин И.В., Пийп В.Б. Строение земной коры в зоне сочленения Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты по комплексу геофизических данных // *Геофизика*. – 2011. – № 2. – С. 70–79.
29. Ростовцев В.В. Перспективы нефтегазоносности юго-востока Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – 240 с.
30. Ростовцев В.Н., Резник С.Н. Юрский комплекс Чулым-Тымского междуречья – перспективный объект для поисков нефти и газа в правобережье Оби Томской области. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 164 с.

Поступила 10.04.2017 г.

#### Информация об авторах

**Петрищевский А.М.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геофизики Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета; заведующий лабораторией моделирования геологических структур Института комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН.

**Исаев В.И.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геофизики Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 550.83 + 550.36:551.2 + 553.9 (571.16)

## DEEP SOURCES OF HEAT GENERATION AND REGIONAL FORECAST ON OIL-GAS PROSPECTS IN TOMSK REGION

Aleksandr M. Petrishchevsky<sup>1,2</sup>,

petris2010@mail.ru

Valeriy I. Isaev<sup>1</sup>,

isaewi@tpu.ru

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

<sup>2</sup> Institute of Complex analysis of regional problems,  
4, Sholom-Aleikhema street, Birobidzhan, 679016, Russia.

*The relevance of the research is caused by the need to reveal the connection of oil and gas deposits in Tomsk region with a deep structure and rheology of the crust and uppermost mantle. The relations determined are used for oil-gas forecast in areas with obscure prospects.*

**The aim** of the work is to research the density contrast of the crust and uppermost mantle – manifestation of rheological properties of geological media – in the 3D-space to reveal the connection of the former with the heat flow and displacement of oil-gas deposits in Tomsk Region; to define and delineate in space probable sources of heat and fluids promoting the formation of hydrocarbon deposits into sedimentary layers.

**The method used in the study:** construction of 3D-rheological gravity models of the crust and uppermost mantle up to depth of 50 km and the correlation analysis.

**The results.** The correlative relation of density contrast – indicator of rheological station of geological media – with a heat flow from PreJurassic basement of the sedimentary layer was determined. This assumes heat and fluid sources in low crust and uppermost mantle lower viscosity zones, and also direct influence of the latter on hydrocarbon formation in sedimentary stratum. In western areas of Tomsk region the space relation of oil-gas districts with zones of lowered viscosity in the PreJurassic sedimentary layer, basement, lower crust, and uppermost mantle is defined. The authors have revealed great difference of rheological state of the crust in western and eastern areas of Tomsk region. In western areas the crust is less viscous, perhaps – the shattered and, as a consequence, more permeable for deep heat-fluid flows. In eastern areas the crust is more viscous (rigid) and it is characterized by thickening, that define sharp difference of oil-gas efficiency of the sedimentary stratum in the West and East of Tomsk region. In central areas of the researched region lower viscous zone at the depth interval of 35–60 km – the probable source of heat and fluids – is found. From the East it is overlapped by rigid sheets into the middle and lower crust. Two areas, perspective for searching for new oil and gas deposits, were recommend according to the presence of lowered viscosity zones in the basement and lower crust in the North and South of Tomsk region

### Key words:

Gravity model, rheology, heat flow, deep structure of the crust, oil and gas forecast, Tomsk region.

### REFERENCES

1. Kurchikov A.R. The geothermal regime of hydrocarbon pools in West Siberia. *Russian Geology and Geophysics*, 2001, vol. 42, no. 11–12, pp. 678–689.
2. Lobova G.A., Popov S.A., Fomin A.N. Lokalizatsiya prognoznykh resursov nefti yursko-melovykh NGK Ust-Tymskoy mega vpadi-ny [Location of oil forecast resources of the Jurassic-Cretaceous oil-gas complexes in the Ust-Tim basin]. *Neftyanoe khozyaistvo*, 2013, no. 2, pp. 36–40.
3. Lobova G., Osipova E., Isaev V., Terre D. Petroleum potential of Lower-Jurassic deposits in Nurolsk megadepression. *Scientific and Technical Challenges in the Well Drilling Progress. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 24. Available at: [http://iopscience.iop.org/1755-1315/24/1/012001/pdf/1755-1315\\_24\\_1\\_012001.pdf](http://iopscience.iop.org/1755-1315/24/1/012001/pdf/1755-1315_24_1_012001.pdf) (accessed 5 March 2017).
4. Sorokhtin O.G. *Razvitie Zemli* [The Earth evolution]. Moscow, MGU Publ., 2002. 506 p.
5. Kontorovich A.E., Fomin A.N., Krasavchikov V.O., Istomin A.V. Catagenesis of organic matter at the top and base of the Jurassic complex in the West Siberian megabasin. *Russian Geology and Geophysics*, 2009, vol. 50, no. 11, pp. 917–929.
6. Kontorovich A.E., Burshtein L.M., Malyshev N.A., Safronov P.I., Gusrkov S.A., Ershov S.V., Kazanenkov V.A., Kim N.S., Kontorovich V.A., Kostyreva E.A., Melenevsky V.N., Livshits V.R., Polyakov A.A., Skvortsov M.B. Historical-geological modeling of hydrocarbon generation in the mesozoic–cenozoic sedimentary basin of the Kara sea (basin modeling). *Russian Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, no. 8, pp. 1179–1226.
7. Stotskiy V., Isaev V., Fomin M. An assessment of the geotemperature conditions of Bazhenov oil generation (Koltogor mezodepression and its framing structures). *Scientific and Technical Challenges in the Well Drilling Progress. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2016, vol. 43, 012017. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/43/1/012017.pdf> (accessed 12 April 2017).
8. Kuznetsov V.D., Salnikov A.S., Kanareykin B.A., Titarenko V.V. Paleozoic of the West Siberia in light of the deep seismic research. *Geofizika*, 2010, no. 1, pp. 16–21. In Rus.
9. Kuznetsov V.D., Salnikov A.S., Titarenko V.V. The Paleozoic oil-gas complex of the West Siberia by the data of the deep seismic soundings. *Geofizika*, 2011, no. 4, pp. 18–24. In Rus.
10. Isaev V.I., Korzhov Yu.V., Lobova G.A., Popov S.A. *Neftgazonosnost Dalnego Vostoka i Zapadnoy Sibiri po dannym gravimetrii, geotermii i geokhimii* [The oil-gas bearing of the Far East and West Siberia by the data of gravity and thermal measurements, and geochemistry]. Tomsk, Polytechnic University Publ. house, 2011. 383 p.
11. Zimina S.V., Tishchenko G.I., Smirnova K.Yu., Eliseeva O.D. Application of the amplitude-interpreting procedure for detection of perspective objects on oil and gas. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 318, no. 1, pp. 63–68. In Rus.

12. Petrishchevsky A.M. A viscous layer at the crust-mantle boundary in the Far East of Russia. *Geotectonics*, 2008, vol. 42, no. 5, pp. 357–367.
13. Petrishchevsky A.M. Common features of the tectonosphere deep structure in the Western Pacific Margins (Northeast Asia Region and Australia). *Geotectonics*, 2016, vol. 50, no. 6, pp. 608–623.
14. Petrishchevsky A.M. *Gravitatsionny metod otsenki reologicheskikh svoystv zemnoy kory i verkhnei mantii (v konvergentsnykh i plumovyykh strukturakh Severo-Vostochnoy Azii)* [Gravity method for evaluating rheological properties of the crust and uppermost mantle (in the convergent and plum structures of the North-Eastern Asia)]. Moscow, Nauka Publ., 2013. 192 p.
15. Epov M.I., Antonov E.Yu., Nevedrova N.N., Olenchenko V.V., Pospeeva E.V., Napreev D.V., Sanchaa A.M., Potapov V.V., Plotnikov A.E. Integrated electromagnetic and geochemical surveys for petroleum exploration in the West Siberia. *Russian Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, no. 5–6, pp. 763–774.
16. Napreev D.V., Olenchenko D.V. Kompleksirovanie geofizicheskikh i geokhimicheskikh metodov pri poiske zalezhey uglevodородov v Ust-Timskom raione [Complex of geophysical and geochemical methods when founding hydrocarbon deposits in the Ust-Tim oil-gas region]. *Oil-gas geology. Theory and practices*, 2010, no. 5, pp. 1–8. Available at: [www.ngtp.ru/rub/4/6/\\_2010.pdf](http://www.ngtp.ru/rub/4/6/_2010.pdf) (accessed 14 March 2017).
17. Kennet B.L.N., Abdulla A. Seismic wave attenuation beneath the Australasian region. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2011, vol. 58, pp. 285–295.
18. Wang L., Hitchman A. Australian continent uncovered by new 3D model. *24<sup>th</sup> International Geophysical Conference*. Perth, Australia, 13–18 February 2015. Post presentation. Available at: <https://www.aig.org.au/events/24th-international-geophysical-conference-and-exhibition> (дата обращения 20 November 2016).
19. Petrishchevsky A.M. Rheological and geothermal features of the Okhotsk Sea Plume. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 2, pp. 65–76. In Rus.
20. Prokofyev A.A., Kronrod V.A., Kuskov O.L. Raspredeleniya temperatury i plotnosti v litosfernoy mantii Sibirskogo kratona po dannym regionalnykh seismicheskikh modeley [Temperature and density distribution in lithospheric mantle of Siberian craton by the data of the regional seismic models]. *Vestnik otdeleniya nauk o Zemle*, 2009, no. 1 (27), pp. 1–4. Available at: [http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h\\_dgggms/1-2009/informbul-1\\_2009/planet-20.pdf](http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2009/informbul-1_2009/planet-20.pdf) (accessed 14 March 2017).
21. Osipova E.N. Oil-gas bearing potential (paleo-temperature modeling) of the Low Cretaceous sediments of the Nyurool Basin. *Geofizika*, 2014, no. 2, pp. 70–74. In Rus.
22. Lobova G.A. Oil-gas bearing potential of the Ust-Tim basin. *Geophysical journal*, 2013, vol. 35, no. 4, pp. 28–39. In Rus.
23. Gulenok R.Yu., Isaev V.L., Kosygin V.Yu., Lobova G.A., Starostenko V.I. Estimation of the Oil-and-Gas Potential of Sedimentary Depression in the Far East and West Siberia Based on Gravimetry and Geothermy Data. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2011, vol. 5, no. 4, pp. 273–287.
24. Nomokonova G.G. *Fizika Zemli* [Physics of the Earth]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2007. 109 p.
25. Osipova E., Ivanov V., Smirnov V. and Abramova R. Terrestrial heat flow and its role in petroleum geology. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 27. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/27/1/012015/pdf> (accessed 14 April 2017).
26. Koveshnikov A.E., Nedolivko N.M. Post-catagenic transformation of PreJurassic rocks of the West Siberian Basin. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 1, pp. 82–86. In Rus.
27. Moshchnost zemnoy kory [The crust thickness]. *National Atlas of the Russia*. Vol. 2. Available at: [geographyofrussia.com](http://geographyofrussia.com) (accessed 2 February 2017).
28. Melikhov V.P., Ligin I.V., Piyp V.B. Structure of the crust in the junction zone of the Siberian Craton with West Siberian Plate by the complex of geophysical data. *Geofizika*, 2011, no. 2, pp. 70–79. In Rus.
29. Rostovtsev V.V. *Perspektivy neftegazonosnosti yugo-vostoka Zapadno-Sibirskoy neftegazonosnoy provintsii* [Prospects of oil-gas bearing potential of the South East of West Siberian Province]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2012. 240 p.
30. Rostovtsev V.V., Reznik S.N. *Yurskiy kompleks Chulyim-Timskogo mezhdurechya – perspektivnyy objekt dlya poiskov nefiti i gaza v pravoberezhie Obi Tomskoy oblasti* [The Jurassic complex in-between Chulim and Tom rivers – the perspective object for searching oil and gas on the right bank of the Ob River in Tomsk region]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2004. 164 p.

Received: 10 April 2017.

#### Information about the authors

**Aleksandr M. Petrishchevsky**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University; head of the laboratory, Institute or Complex analysis of regional problems.

**Valeriy I. Isaev**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 504.064.2:504.53.054

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛИСТЬЕВ РАСТЕНИЙ КАК БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ ИНДИКАТОРОВ СОСТОЯНИЯ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

Ташекова Ажар Жумановна<sup>1</sup>,  
esenzholova@nnc.kz

Торопов Андрей Сергеевич<sup>2</sup>,  
torop990@gmail.com

<sup>1</sup> Национальный ядерный центр РК,  
Казахстан, 071100, г. Курчатов, ул. Красноармейская, 2.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью внедрения биогеохимически значимых методов контроля загрязнения городской среды. Высокий уровень антропогенной нагрузки в городах определяет потребность в применении объективных методов оценки современного состояния окружающей среды и тенденций развития экологической ситуации в будущем.

**Цель работы:** оценка степени загрязнения окружающей среды урбоэкосистем Казахстана тяжелыми металлами по данным опробования листьев древесных и кустарниковых растений.

**Методы исследования.** В крупных городах Казахстана обследованы городские зоны с различной функциональной нагрузкой. Отбор проб листьев проводился методом средней пробы в нижней части кроны с внешней ее стороны по окружности в конце основного периода вегетации (август–сентябрь). Промытые пробы листьев доводились до воздушно-сухого состояния и разлагались в автоклаве. Зольность определяли методом сухого сжигания. Определение содержания химических элементов в листьях проводилось атомно-абсорбционным, атомно-эмиссионным и масс-спектрометрическими методами.

**Результаты.** Изучена возможность использования листьев древесной и кустарниковой растительности как биогеохимических индикаторов по отношению к тяжелым металлам. Проанализированы следующие виды древесной и кустарниковой растительности: *Acer negundo L.*, *Betula pendula Roth.*, *Populus alba L.*, *Populus nigra L.*, *Populus tremula L.*, *Populus pyramidalis Rozier.*, *Salix alba L.*, *Malus silvestris Mill.*, *Sorbus aucuparia L.*, *Fraxinus excelsior L.*, *Ulmus minor L.*, *Ulmus glabra L.*, *Ulmus laevis Pall.*, *Eleagnus argentea Porsch.*, *Crataegus oxyacantha L.*, *Rosa canina L.*, *Syringa vulgaris L.* В листьях растений содержание таких элементов, как цинк, свинец, кадмий, медь, хром, барий и уран превышает их фоновые значения и кларк растительности мировой суши. Листья исследованных растений, произрастающие на городских площадках с высокой промышленной и транспортной нагрузкой, накапливают больше химических элементов, чем на площадках с селитебной и рекреационной нагрузкой, что коррелирует и с показателем зольности. Для листьев различных видов растений характерна специфичность в накоплении тяжелых металлов. На основе полученных данных определены виды древесных и кустарниковых растений, листья которых можно применять для диагностики загрязнения урбоэкосистем тяжелыми металлами. Существенным результатом работы является определение условно фоновых содержаний элементов для исследованного региона.

### Ключевые слова:

Биогеохимическая индикация, городская среда, листья древесных растений, листья кустарниковых растений, тяжелые металлы, зольность, функциональные зоны города.

### Введение

Современный процесс урбанизации и связанный с ним целый ряд экологических проблем вызывает необходимость индикации и объективной оценки состояния городской среды [1]. Среди методов мониторинга важное место принадлежит учету содержания загрязнителей в живых организмах, т. е. ответной реакции, имеющей биологический смысл [2–4]. В качестве биогеохимических индикаторов загрязнения, в частности, тяжелыми металлами, используются различные виды растений и их части. Так, по многочисленным литературным данным [1, 3, 5–7] известно, что листья растений являются одним из информативных показателей состояния окружающей среды городов. Листовая пластина является мощным воздушным насосом растений и способствует поглощению и накоплению поллютантов, поступающих с промышленными выбросами. Так, поглощение токсичных металлов листьями из воздуха зависит как от свойств самих растений: размера и формы листо-

вых пластинок, густоты волосяного покрова листовой поверхности, степени покрытия листьев воском, характера архитектоники кроны и положения в ней листьев, так и от условий и характера загрязнений: размеров частиц пыли и водорастворимых металлов, их концентрации, температуры среды, степени освещенности. Механизм поглощения ионов листом – многоступенчатый процесс, включающий пассивную диффузию и активный транспорт [8]. Г.М. Илькун [9] описывает три основные фазы механизма поступления и накопления поллютантов: сорбция кутикулярным слоем и клетками эпидермиса, далее диффузия через устьичные щели внутрь листа и растворение в воде, насыщающей оболочку листа, и в конце передвижение от места поглощения к соединительным тканям и накопление внутри клеток.

Целью работы является оценка загрязнения окружающей среды городов Казахстана с использованием биогеохимического ответа листьев древесных и кустарниковых растений.

### Объекты и методы исследования

Исучено шесть городов Казахстана: Астана, Караганда, Темиртау, Павлодар, Семей и Усть-Каменогорск, различающиеся по экономическим (число жителей, количество автомобилей и крупных предприятий) и географическим (рельеф, климат и др.) условиям (рис. 1).



Рис. 1. Обзорная схема расположения исследованных городов Казахстана

Fig. 1. Overview scheme of location of the studied cities of Kazakhstan

Отметим, что Семей, Астана и Павлодар на момент исследования относились к городам с индексом загрязнения воздуха ниже среднего по Казахстану ( $ИЗА_3 \geq 5$ ). А города Усть-Каменогорск, Караганда и Темиртау – с высоким уровнем загрязнения воздуха ( $ИЗА_3 \geq 7$ ). Данные города являются крупными промышленными центрами черной и цветной металлургии Казахстана и мира [10].

Объектами исследования были листья доминантных видов древесных и кустарниковых растений – всего 14 видов древесной и 3 вида кустарниковой растительности. Нами были исследованы следующие виды растений: *Acer negundo* L., *Betula pendula* Roth., *Populus alba* L., *Populus nigra* L., *Populus tremula* L., *Populus pyramidalis* Rozier., *Salix alba* L., *Malus silvestris* Mill., *Sorbus aucuparia* L., *Fraxinus excelsior* L., *Ulmus minor* L., *Ulmus glabra* L., *Ulmus laevis* Pall., *Eleagnus argentea* Pursch., *Crataegus oxyacantha* L., *Rosa canina* L., *Syringa vulgaris* L.

В каждом городе в ходе исследования заложено более 10 площадок (рис. 2), которые были зонированы в зависимости от антропогенной нагрузки и функциональности: рекреационная (скверы, парки), селитебная (спальные районы), транспортная (вдоль крупных автодорог) и промышленная зоны (вблизи действующих промышленных предприятий и ТЭЦ). На каждой площадке проводили сбор доминантных видов древесных и кустарниковых растений. Виды, представленные единичными образцами, не учитывались. При отборе, транспортировке, хранении и подготовке растительных образцов использована стандартная методика [11].

Отбор проб листьев проводился методом средней пробы на высоте 1,5–2,0 м от поверхности грунта для деревьев, 0,5–1,0 м – для кустарников с внешней стороны кроны по окружности. Для выяв-

ления аккумулирующей способности листьев растений в условиях городской среды их отбирали за основной период вегетации (август–сентябрь). Растения для отбора проб выбирались по возможности одновозрастные. Листья взяты для анализа без черешков. В лаборатории пробы листьев растений тщательно промывались дистиллированной водой с целью удаления пыли и частичек почвы, после чего доводились до воздушно-сухого состояния.

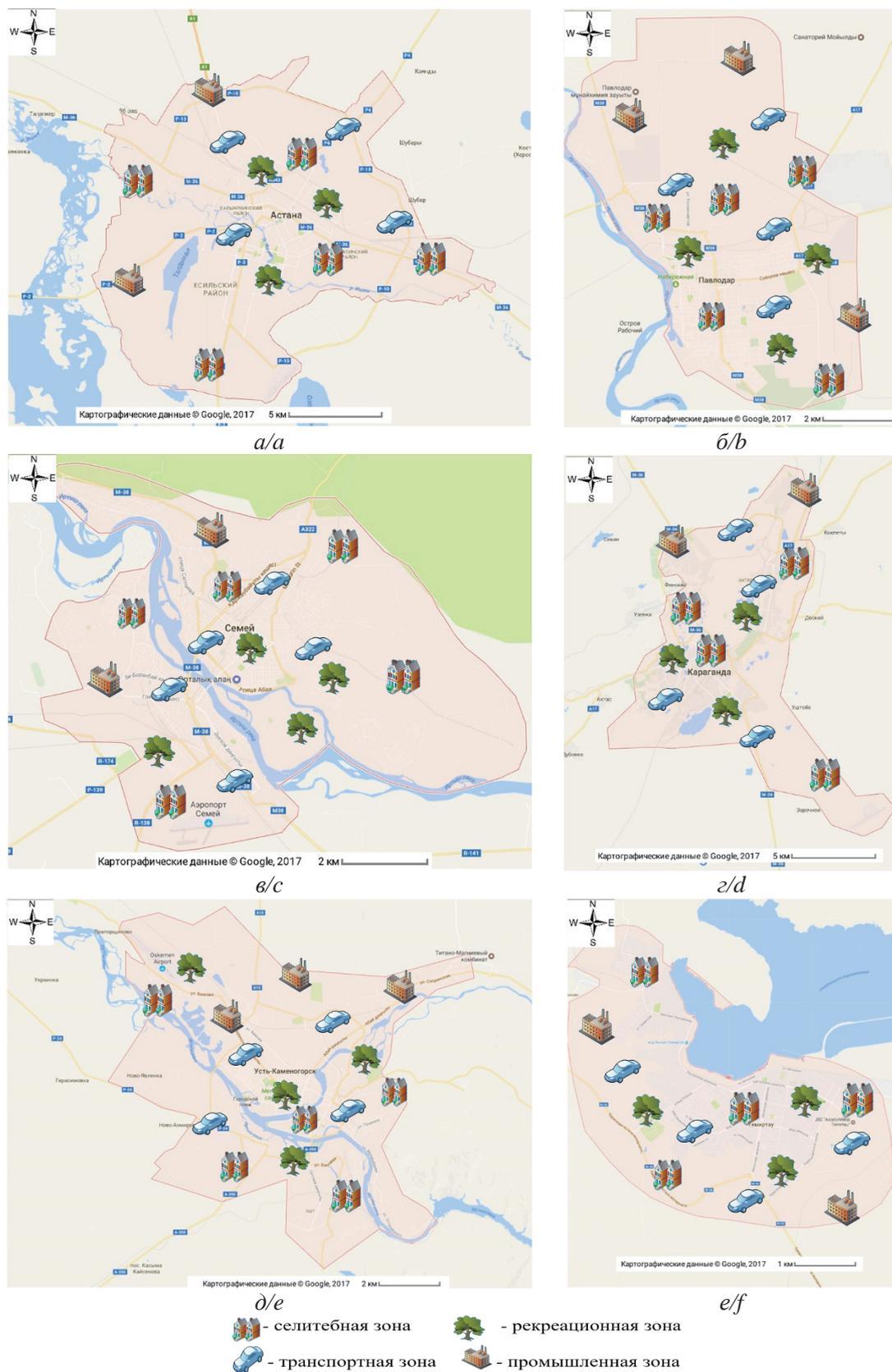
Фоновые площадки для каждого города располагались в 50–80 км от города, в противоположной стороне от розы ветров, что минимизировало влияние аэропромышленных выбросов.

Для определения концентрации химических элементов в листьях растений проводили мокрое разложение проб. Навеску сухой пробы растений массой  $0,5000 \pm 0,0001$  г разлагали методом автоклавирования с добавлением концентрированных  $HNO_3$  и  $H_2O_2$  в течение 4 часов при  $160 \pm 5$  °С.

Определение концентраций элементов проводили на атомно-абсорбционном приборе SOLAAR серии М6, атомно-эмиссионном спектрометре iCap-6300 и масс-спектрометре Elan 9000. Аналитические работы проводились в Институте радиационной безопасности и экологии НЯЦ РК (Казахстан, г. Курчатов) и аналитическом центре Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (Россия, г. Новосибирск). Все аналитические исследования проведены в аттестованных и аккредитованных лабораториях с использованием стандартных образцов сравнения. Для контроля результатов измерений использованы стандартные образцы листа березы марки ЛБ-1 (ГСО 8923–2007) и травосмеси марки ТР-1 (ГСО 8922–2007), разработанные в Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Россия, г. Иркутск. Для построения калибровочных графиков использовались мультиэлементные стандартные растворы, зарегистрированные в реестре ГСИ РК и РФ. Контроль качества аналитических работ осуществлялся путём измерения калибровочного раствора через каждые 10 проб. При неудовлетворительных результатах калибровки (отклонение калибровочного графика на 8–10 %) проводилась перекалибровка прибора, при которой учитывались новые параметры фона. Элементы с концентрацией ниже предела обнаружения, а также содержание которых не удовлетворяло контролю относительно внутренних и внешних стандартов и межлабораторного сравнения, не рассматривали.

Зольность листьев растений была определена по общепринятой методике [12]. Полученные результаты статистически обрабатывались с применением программ STATISTICA и Microsoft Excel.

Аккумуляцию химических элементов в листьях древесных и кустарниковых растений в городских условиях оценивали с помощью коэффициента концентрации ( $K_k$ ), который представляет собой отношение содержания элемента в листьях растений к его концентрации в листьях, произрастающих на фоновых участках.



**Рис. 2.** Схема пробоотборных площадок в исследованных городах Казахстана: а) Астана; б) Павлодар; в) Семей; г) Караганда; д) Усть-Каменогорск; е) Темиртау

**Fig. 2.** Scheme of sampling ground in the studied cities of Kazakhstan: а) Astana; б) Pavlodar; в) Semey; д) Karaganda; е) Ust-Kamenogorsk; ф) Temirtau

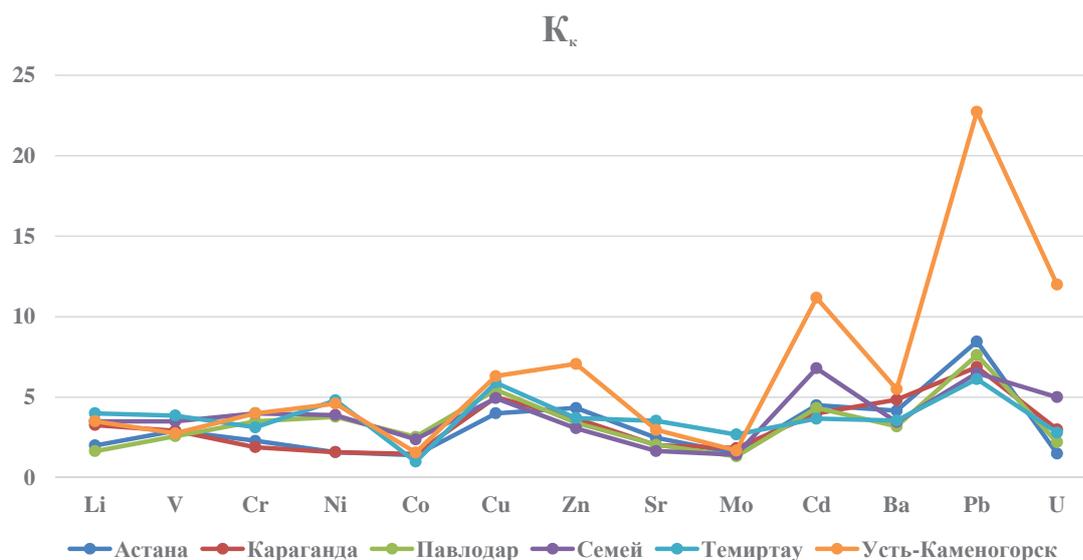


Рис. 3. Коэффициент концентрации ( $K_k$ ) химических элементов в листьях древесных и кустарниковых растений исследованных городов Казахстана

Fig. 3. Concentration coefficient ( $K_k$ ) of chemical elements in the leaves of trees and shrubs in the studied cities of Kazakhstan

### Результаты исследований и их обсуждение

Рассматриваются элементы, содержания которых в листьях древесных и кустарниковых растений имеют превышения над фоновыми значениями.

Согласно рис. 3, среднее содержание элементов в листьях древесных и кустарниковых растений в исследованных городах Казахстана превышает фоновые значения в 2–3 раза, исключение для г. Усть-Каменогорск – в 6–7 раз. Для всех исследованных городов характерно накопление листьями растений кадмия и свинца, также для г. Усть-Каменогорск – лития, никеля и урана, для г. Павлодар – хрома и меди и для г. Темиртау – меди и никеля.

Основное внимание было уделено изучению индикаторных свойств листьев древесных и кустарниковых растений по отношению к таким тяжелым металлам, как цинк, медь, кадмий и свинец. Известно, что данные элементы являются приоритетными поллютантами в почвах и других природных средах всех изученных городов [13, 14]. Отмечается, что кадмий и свинец токсичны и относятся к первому классу опасности. Согласно многочисленным токсикологическим исследованиям, известно, что уже в малых концентрациях они приводят к различным патологиям живых организмов, а избыточное содержание цинка и меди также приводит к дефициту (ингибированию) других важных микро- и макрокомпонентов (ферментов) в организме [15, 16].

В табл. 1 представлены данные по содержанию изученных элементов листьях древесных и кустарниковых растений по городам Казахстана. Для кадмия и цинка выявлено заметное превышение над средним содержанием в растительности Мировой суши в исследованных городах в 10 и 1,5 раза соответственно, а в г. Усть-Каменогорске данный показатель превышен в 54 и 4 раза.

Из табл. 1 следует, что среднее содержание исследованных тяжелых металлов в листьях растений превышает фоновые концентрации для Zn – от 3 до 7 раз, Cu – 4–6, Cd – 3–11, Pb – 6–23 раз.

Среднее содержание изученных элементов в листьях исследованных растений, согласно классификации, приведенной в [18], попадает в диапазон достаточной или нормальной концентрации. Исключение составляет уровень концентрации цинка в листьях древесной и кустарниковой растительности г. Усть-Каменогорск, где данный элемент находился в избыточной (токсической) концентрации.

Установлено, что изменчивость содержания токсичных металлов в листьях древесных и кустарниковых растений изученных городов в сравнении с фоновыми значениями была выше в несколько раз. Так, для таких элементов, как цинк и кадмий, видовое различие в концентрации на фоновых площадках составило 5 и 12 раз, а в городских условиях эта разница достигала 20 и 190 раз. Известно, что в условиях техногенеза индикаторные и аккумулярующие способности исследованных видов к данным элементам существенно повышаются [19].

На рис. 4 представлен коэффициент концентрации ( $K_k$ ) тяжелых металлов в листьях растений изученных городов, произрастающих в различных функциональных зонах. Выявлено, что листья, отобранные в промышленной и транспортной зонах, накапливают больше тяжелых металлов, чем в селитебной и рекреационной. Наибольшая разница в содержании изученных элементов в листьях растений между зонами отмечена для г. Усть-Каменогорск, наименьшая – для г. Павлодар. В среднем наблюдается трехкратный диапазон изменения концентрации в зависимости от

**Таблица 1.** Содержание тяжелых металлов (мг/кг сухой массы) и зольности (%) в листьях древесных и кустарниковых растений в городах Казахстана

**Table 1.** Content of heavy metals (mg/kg) and ash (%) in the leaves of trees and shrubs in the cities of Kazakhstan

Город City	Zn	Cu	Cd	Pb	Зольность Ash content, %
Астана Astana (n=123)	56,7±3,2 5,7–147,7 (13,1)	4,4±0,24 0,56–13,1 (1,1)	0,34±0,02 0,04–1,3 (0,05)	1,1±0,07 0,09–5,5 (0,13)	10,4±0,22 5,9–14,3 (7,9)
Караганда Karaganda (n=131)	44,9±3,0 7,1–141,6 (12,2)	3,9±0,19 0,50–10,5 (0,78)	0,12±0,008 0,01–0,50 (0,03)	1,1±0,10 0,10–6,3 (0,16)	10,5±0,17 6,3–14,7 (7,6)
Павлодар Pavlodar (n=147)	31,0±1,8 6,2–127,2 (9,1)	4,1±0,18 0,65–9,5 (0,75)	0,13±0,01 0,01–0,66 (0,03)	1,6±0,11 0,20–7,3 (0,21)	8,9±0,19 5,0–14,3 (6,6)
Семей Semey (n=148)	35,9±2,3 7,5–160,8 (11,7)	4,5±0,27 0,69–19,6 (0,91)	0,22±0,02 0,01–1,9 (0,04)	0,52±0,04 0,07–2,6 (0,08)	9,6±0,20 5,0–17,0 (7,4)
Темиртау Temirtau (n=116)	45,2±3,1 9,2–190,6 (12,2)	4,6±0,27 0,70–21,8 (0,78)	0,11±0,007 0,01–0,40 (0,03)	0,98±0,08 0,07–4,4 (0,16)	9,5±0,16 6,0–12,4 (7,6)
Усть-Каменогорск Ust-Kamenogorsk (n=158)	120,9±12,4 9,4–923,6 (17,1)	10,1±0,89 0,8–65,1 (1,6)	1,9±0,27 0,11–21,0 (0,17)	15,0±1,3 0,36–90,1 (0,66)	9,9±0,21 5,6–16,5 (8,0)
Среднее содержание в растительности Мировой суши Average concentration in terrestrial plants [17]	30,0	8,0	0,035	1,25	–
Концентрация тяжелых металлов в тканях листьев: достаточное/избыточное Concentration of heavy metals in leaves: adequate/overabundant [18]	27–150 100–400	5–30 20–100	0,05–0,2 5–30	5–10 30–300	–

Примечание: n – число проб; в числителе – среднее арифметическое и его ошибка; в знаменателе – пределы колебаний; в скобках – фоновое значение.

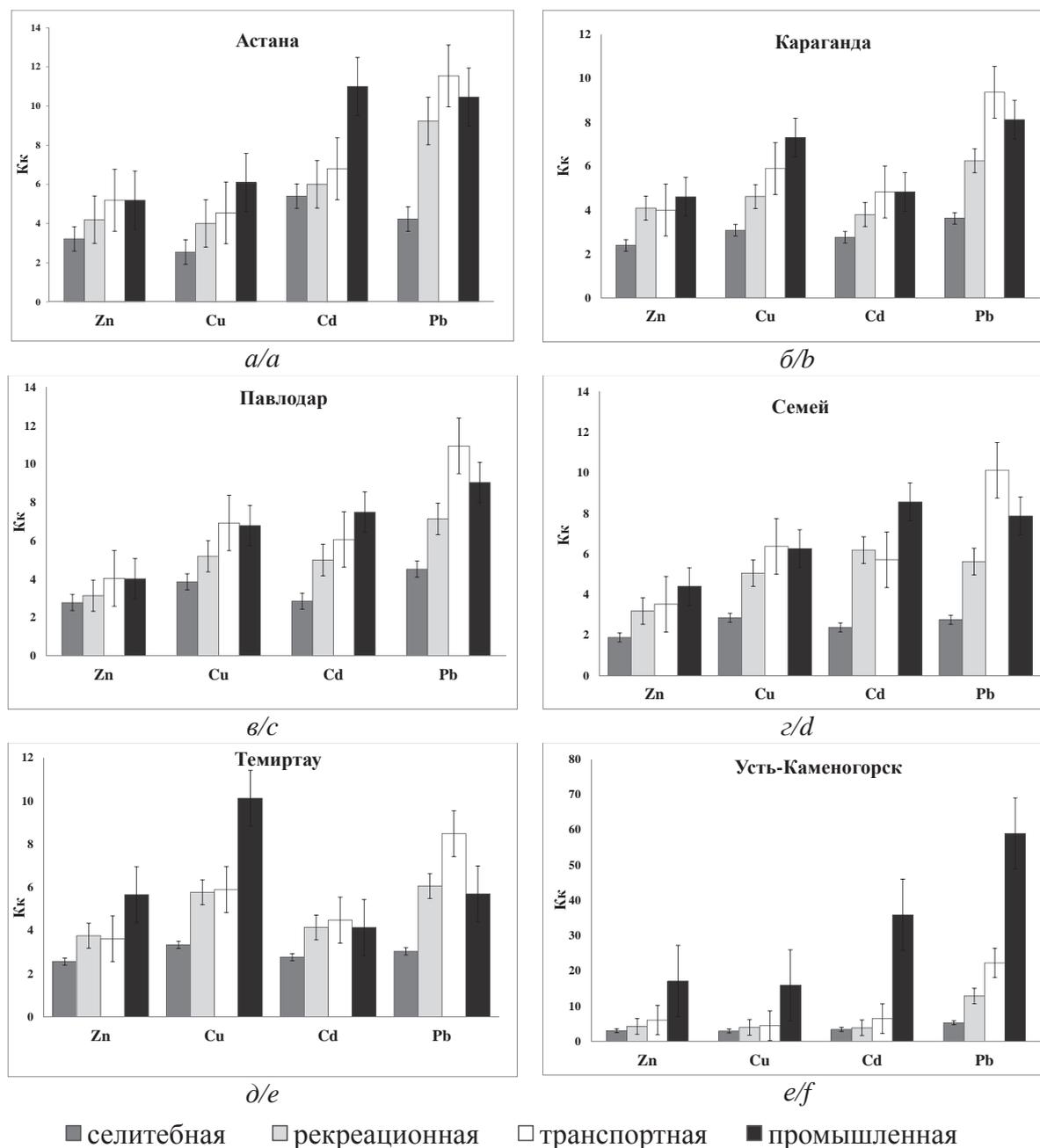
Note: n is the number of samples; in the numerator – the arithmetic mean and its error, in the denominator – the range of data; the background value is in brackets.

функциональной зоны города для таких металлов, как цинк и медь, и четырехкратный – для свинца и кадмия. В частности, для г. Усть-Каменогорск контрастность между содержанием металлов в листьях разных зон города достигает 6-кратного для цинка и меди и 10-кратного – для кадмия и свинца. Такая особенность в накоплении токсичных металлов листьями растений, произрастающих в г. Усть-Каменогорск, по сравнению с другими городами, связана, прежде всего, с уровнем загрязнения города, который является одним из самых высоких в Казахстане. В г. Усть-Каменогорске расположено порядка трех сотен промышленных объектов, среди которых имеются крупные заводы цветной металлургии. Так, по данным [20], с пылевыми выбросами свинцово-цинкового комбината в атмосферу г. Усть-Каменогорска ежегодно поступает более 30 т химических элементов, среди них цинка и кадмия более 10 т/год, а меди и свинца более 3 т/год.

Выявленные зависимости могут объясняться тем, что промышленная зона представляет собой центр скопления предприятий различной специализации, где причиной загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами являются сырье и сам процесс производства [21, 22]. В данной работе была более детально исследована биогеоиндикационная способность листьев доминантных древесных и кустарниковых растений, произрастающих в зо-

не действия крупных промышленных предприятий и ТЭЦ изученных городов Казахстана. Изучен элементный состав листьев деревьев и кустарников, произрастающих в зоне влияния комплекса предприятий цветной металлургии ТОО «Казцинк», АО «Ульбинский металлургический завод», АО «Усть-Каменогорский титано-магнийский комбинат» (г. Усть-Каменогорск), АО «Алюминий Казахстана» (г. Павлодар), предприятий черной металлургии АО «Арселор Миттал Темиртау» (г. Темиртау), строительной промышленности – ТОО «Цементный завод Семей» (г. Семей) и крупных ТЭЦ (г. Семей, г. Астана). В результате длительной производственной деятельности вокруг них возникли техногенные геохимические аномалии с повышенным содержанием элементов-загрязнителей в окружающей среде.

В то же время в городах с каждым годом растет количество автотранспорта, и транспортную зону в городах, где отсутствует «тяжелое» производство, считают, как правило, наиболее загрязненной. В жилой зоне наблюдается наименьшее загрязнение среды, поскольку жилые постройки представляют барьер на пути распространения загрязнения от автомагистралей, а густота растительности выше, чем на других площадках. Для рекреационной зоны установленные повышенные концентрации металлов связаны с близостью крупных автомагистралей.



**Рис. 4.** Коэффициент концентрации ( $K_k$ ) тяжелых металлов в листьях древесных и кустарниковых растений в зависимости от функциональной зоны города: а) Астана; б) Караганда; в) Павлодар; г) Семей; д) Темиртау; е) Усть-Каменогорск

**Fig. 4.** Concentration coefficient ( $K_k$ ) of heavy metals in the leaves of trees and shrubs depending on functional zones of cities: а) Astana; б) Karaganda; в) Pavlodar; г) Semey; д) Temirtau; е) Ust-Kamenogorsk

В табл. 2 представлены усредненные данные по аккумуляции тяжелых металлов и зольности листьев во всех исследованных городах Казахстана.

В результате исследования выявлены виды древесных и кустарниковых растений, чьи листья имеют высокую аккумуляционную способность к тяжелым металлам. Так, по отношению к цинку максимальной концентрационной способностью обладают *Betula pendula* Roth., *Acer negundo* L. и листья деревьев рода *Populus*; меди – *Acer negundo* L., *Eleagnus argen-*

*tea* Pursch., *Syringa vulgaris* L., *Ulmus minor* L. и *Populus nigra* L., кадмию – листья деревьев семейства *Salicaceae*, свинцу *Betula pendula* Roth., *Syringa vulgaris* L., *Acer negundo* L., *Eleagnus argentea* Pursch. Также у данных растений отмечается значительная вариабельность в накоплении изученных элементов, т. е. высокое отношение максимального содержания над минимальным и превышение над фоном, высокий коэффициент аккумуляции. Эти факты должны учитываться при подборе видов-индикаторов.

**Таблица 2.** Зависимость содержания тяжелых металлов (мг/кг сухой массы) и зольности (%) листьев от вида растений  
**Table 2.** Dependence of accumulation of heavy metals and ash content of leaves on plant species

Вид растения/Plant species	n	Zn	Cu	Cd	Pb	Зольность/Ash content
<i>P. nigra</i> L.	73	$86,6 \pm 4,3$ 4,4	$5,7 \pm 0,3$ 6,6	$10,5 \pm 0,5$ 23,9	$4,7 \pm 0,2$ 10,2	12,3±0,6
<i>P. tremula</i> L.	59	$61,7 \pm 3,1$ 3,3	$4,2 \pm 0,2$ 4,5	$0,51 \pm 0,03$ 4,5	$1,9 \pm 0,1$ 4,4	10,8±0,5
<i>P. pyramidalis</i> Rozier.	21	$66,7 \pm 3,3$ –	$3,1 \pm 0,2$ –	$0,49 \pm 0,02$ –	$1,1 \pm 0,1$ –	10,4±0,5
<i>P. alba</i> L.	34	$89,6 \pm 4,5$ 3,8	$6,4 \pm 0,3$ 3,7	$0,88 \pm 0,04$ 3,0	$4,6 \pm 0,2$ 7,0	9,7±0,5
<i>M. sylvestris</i> Mill.	45	$25,3 \pm 1,3$ 3,2	$3,9 \pm 0,2$ 5,6	$0,12 \pm 0,01$ 3,6	$0,65 \pm 0,05$ 7,1	10,4±0,5
<i>A. negundo</i> L.	80	$50,5 \pm 2,5$ 4,0	$8,5 \pm 0,4$ 7,2	$0,38 \pm 0,02$ 7,0	$4,7 \pm 0,2$ 10,9	12,2±0,6
<i>E. argentea</i> Pursch.	38	$37,2 \pm 1,6$ 3,8	$9,5 \pm 0,4$ 5,8	$0,33 \pm 0,02$ 7,4	$5,5 \pm 0,3$ 25,5	7,5±0,4
<i>B. pendula</i> Roth.	77	$135,1 \pm 6,8$ 5,6	$5,9 \pm 0,3$ 4,7	$0,60 \pm 0,03$ 4,0	$5,7 \pm 0,3$ 12,1	6,5±0,3
<i>S. alba</i> L.	40	$79,5 \pm 4,1$ 3,6	$3,9 \pm 0,3$ 4,8	$0,90 \pm 0,07$ 9,8	$2,5 \pm 0,2$ 10,7	9,0±0,5
<i>U. minor</i> L.	76	$32,4 \pm 1,6$ 3,7	$4,3 \pm 0,2$ 5,4	$0,19 \pm 0,01$ 6,0	$3,9 \pm 0,2$ 8,1	11,5±0,6
<i>U. laevis</i> L.	55	$27,3 \pm 1,4$ 3,6	$3,1 \pm 0,2$ 10,6	$0,13 \pm 0,01$ 6,3	$1,0 \pm 0,1$ 7,6	11,2±0,6
<i>U. glabra</i> L.	25	$24,8 \pm 1,2$ –	$2,7 \pm 0,1$ –	$0,16 \pm 0,01$ –	$2,0 \pm 0,1$ –	10,5±0,5
<i>F. excelsior</i> L.	26	$35,1 \pm 1,8$ –	$7,6 \pm 0,4$ –	$0,44 \pm 0,02$ –	$4,9 \pm 0,2$ –	9,0±0,5
<i>S. vulgaris</i> L.	67	$41,7 \pm 2,1$ 4,1	$6,5 \pm 0,3$ 5,1	$0,38 \pm 0,02$ 7,0	$5,8 \pm 0,3$ 14,8	8,2±0,4
<i>S. aucuparia</i> L.	22	$25,4 \pm 1,3$ 2,4	$3,4 \pm 0,2$ 4,3	$0,32 \pm 0,02$ 9,0	$4,6 \pm 0,2$ 11,1	9,6±0,5
<i>R. canina</i> L.	56	$15,1 \pm 0,8$ 2,7	$1,9 \pm 0,1$ 4,2	$0,07 \pm 0,005$ 4,0	$0,57 \pm 0,03$ 4,8	7,5±0,4
<i>C. oxyacantha</i> L.	29	$72,3 \pm 3,6$ –	$6,9 \pm 0,3$ –	$0,47 \pm 0,02$ –	$4,1 \pm 0,2$ –	8,7±0,4

Примечание: n – число проб; в числителе – среднее арифметическое и его ошибка; в знаменателе – коэффициент концентрации ( $K_k$ ); прочерк – отсутствие данных

Note: n is the number of samples; in the numerator – the arithmetic mean and its error, in the denominator – concentration coefficient ( $K_k$ ); dash – no data.

В ходе исследования была также определена зольность листьев. Зольность представляет собой важный биогеохимический показатель, характеризующий соотношение минеральных и органических веществ в растении. Зольность можно считать показателем приспособленности растительных сообществ к условиям среды. Известно, что чем больше зольность, тем лучше приспособлено растение к условиям произрастания. Зольность растений позволяет получить представление о степени загрязнения атмосферного воздуха, характеризуя газопоглощительную способность растений [7, 13]. По величине зольности листьев древесных и кустарниковых пород растений выявлены значительные межвидовые различия. Так, максимальная зольность характерна для листьев *Populus nigra* L., *Acer negundo* L., *Ulmus minor* L. – 12 % в среднем по городам, что говорит об их высокой газопоглощительной способности, это подтверждают и данные других авторов [20–22], а минимальная зольность зафиксирована у видов *Betula pendula* Roth. и *Eleagnus argentea* Pursch. – 6 % в среднем по городам.

С учетом аккумулирующей способности листьев в различных зонах городов, контрастностью накопления тяжелых металлов в сравнении с фоном, подверженности изменениям их зольности с градиентом антропогенной нагрузки в табл. 3 представлены рекомендуемые виды древесных и кустарниковых пород растений для индикации атмосферного загрязнения и его мониторинга.

**Таблица 3.** Рекомендуемые растения-биогеохимические индикаторы состояния окружающей среды исследованных городов по отношению к тяжелым металлам

**Table 3.** Recommended plant species for bioindication of urban environment to heavy metals

Вид/семейство/Species/family	Zn	Cu	Cd	Pb
<i>Acer negundo</i> L.	+	+	–	+
<i>Betula pendula</i> Roth.	+	–	+	+
<i>Populus nigra</i> L.	+	+	+	+
<i>Syringa vulgaris</i> L.	–	+	–	+
Salicaceae	–	–	+	–
Ulmaceae	+	+	+	–

Таким образом, следует вывод об индикационной значимости листьев древесных и кустарниковых растений при изучении загрязнения городской среды, так как содержание тяжелых металлов и зольность листьев возрастает прямо пропорционально той техногенной нагрузке, которой они подвергаются. Полученные результаты согласуются с многочисленными литературными данными других авторов, в которых показано, что данные виды растений обладают наибольшей аккумуляционной способностью к тяжелым металлам и применимы к биогеохимической индикации [23–29]. Рекомендуется использовать данные виды растений в озеленении города в качестве природных фильтров для очистки атмосферного воздуха.

#### Заключение

Анализ элементного состава листьев древесных и кустарниковых пород растений, произрастающих в крупных городах северной, восточной и центральной части Казахстана, показал, что относительно среднего содержания в растительности Мировой суши и фонового уровня аккумулируются такие элементы, как барий, медь, кадмий, свинец, цинк, хром и уран. Превышение над фоном в листьях растений в городах Казахстана для цинка изменялось в диапазоне от 3 до 7 раз, меди – 4–6, кадмия – 3–11, свинца – 6–23 раз.

Функциональная зона городов определяет уровень накопления металлов в листьях. Так, ли-

стья растений, произрастающие в зонах максимального воздействия транспорта и приуроченных к расположению промышленных узлов, накапливают существенно больше тяжелых металлов, чем в селитебной и рекреационной зонах. Определена видовая специфичность в аккумуляционной способности элементов листьями растений. Максимальной способностью к накоплению металлов в городах Казахстана по отношению к цинку и свинцу обладают листья *Betula pendula* Roth., *Acer negundo* L., *Syringa vulgaris* L. и листья деревьев рода *Populus*; меди – *Acer negundo* L., *Eleagnus argentea* Pursch. и *Ulmus minor* L.; кадмию – листья древесных растений семейства *Salicaceae*, также повышается уровень зольности листьев в зависимости от интенсивности техногенной нагрузки.

Накопление данных об элементном составе древесной и кустарниковой растительности в различных регионах, в том числе изучение фоновых уровней распределения элементов способствует выработке универсальных показателей изменения окружающей среды и в дальнейшем приведет к выработке нормативных показателей по суммарному накоплению элементов в живом веществе.

Таким образом, отдельные виды древесных растений можно рекомендовать в качестве биогеохимических индикаторов состояния городской среды и материала для озеленения городов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bioindication and monitoring of atmospheric deposition using trees and shrubs / S.V. Gorelova, M.V. Frontasyeva, A.V. Gorbunov, S.M. Lyapunov, O.I. Okina // Materials of 27<sup>th</sup> Task Force Meeting of the UNECE ICP Vegetation. – Paris, France, 2014. – P. 63.
2. Петрунина Н.С., Ермаков В.В. Современные аспекты геохимической экологии растений // Проблемы биогеохимии и геохимической экологии. – 2012. – № 1. – С. 147–155.
3. Неверова О.А., Колмогорова Е.Ю. Древесные растения и урбанизированная среда: экологические и биотехнологические аспекты. – Новосибирск: Наука, 2003. – 222 с.
4. Ялалдинова А.Р., Барановская Н.В., Рихванов Л.П. Проявленность промышленных предприятий г. Усть-Каменогорска в геохимических полях по данным изучения золы листьев тополя черного (*Populus nigra* L.) // Тяжелые металлы, радионуклиды и элементы-биофилы в окружающей среде: VII Международная научно-практическая конференция. – Семей, 2012. – Т. 2. – С. 196–201.
5. Andre O., Vollenweider P., Gunthardt-Goerg M. Foliage response to heavy metal contamination in Sycamore Maple (*Acer pseudoplatanus* L.) // For. Snow Landsc. Res. – 2006. – № 80 (3). – P. 275–288.
6. Gillooly S.E., Carr Shmool J.L., Michanowicz D.R. Framework for using deciduous tree leaves as biomonitors for intraurban particulate air pollution in exposure assessment // Environ Monitoring Assessment. – 2016. – № 7. – P. 456–479.
7. Уфимцева М.Д. Закономерности накопления химических элементов высшими растениями и их реакции в аномальных биогеохимических провинциях // Геохимия. – 2015. – № 5. – С. 450–465.
8. Парибок Т.А. Загрязнение растений металлами и его эколого-физиологические последствия // Растения в экстремальных условиях минерального питания. – Л.: Наука, 1983. – С. 82–100.
9. Илькун Г.М. Загрязнители атмосферы и растения. – Киев: Наукова думка, 1978. – 246 с.
10. О состоянии охраны атмосферного воздуха в Республике Казахстан // Информационный бюллетень о состоянии окружающей среды Республики Казахстан. – Астана, 2016. – Т. 1–3.
11. Методические рекомендации по проведению полевых и лабораторных исследований почв и растений при контроле загрязнения окружающей среды металлами / под ред. Н.Г. Зырина, С.Г. Малахова. – М.: Гидрометеоздат, 1981. – 109 с.
12. Ягодин Б.А. Практикум по агрохимии. – М.: Агропромиздат, 1987. – 125 с.
13. Есенжолова А.Ж. Листья древесных и кустарниковых растений как биоиндикаторы состояния окружающей среды городов Восточного, Северного и Центрального Казахстана: автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Новосибирск, 2013. – 20 с.
14. Асылбекова Г.Е. Оценка экологического состояния урбозокостемы г. Павлодара с использованием растительных объектов: автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Новосибирск, 2010. – 24 с.
15. Environmental Exposure to Cadmium: Health Risk Assessment and its Associations with Hypertension and Impaired Kidney Function / H. Wu, Q. Liao, S.N. Chillrud, Q. Yang, L. Huang, J. Bi, B. Yan // Scientific Reports. – 2016. – V. 6. – № 29989. – P. 100–115.
16. The detrimental effects of lead on human and animal health / M.A. Assi, M.N.M. Hezme, A.W. Haron, M.Y. Sabri, M.A. Rajion // Veterinary World. – 2016. – V. 9 (6). – P. 660–671.
17. Добровольский В.В. География микроэлементов. Глобальное рассеяние. – М.: Мысль, 1983. – 272 с.

18. Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants. 4<sup>th</sup> ed. – BocaRaton, USA: CRC Press, 2011. – 505 p.
19. On the temporal variation of leaf magnetic parameters: seasonal accumulation of leaf-deposited and leaf-encapsulated particles of a roadside tree crown / J. Hofman, K. Wuyts, S. van Wittenberghe, R. Samson // Science of the Total Environment. – 2014. – № 3. – P. 766–772.
20. Панин М.С. Химические элементы в пылевых выбросах Усть-Каменогорского металлургического предприятия ОАО «Казцинк» Республики Казахстан // Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде: VI Международная научно-практическая конференция. – Семей, 2010. – С. 144–146.
21. Viscum album Versus host (*Sorbus aucuparia*) as bioindicators of urban areas with various levels of pollution / K. Kolon, A. Samecka-Cymerman, A. Klink, A.J. Kempers // Journal of Environmental Science and Health, P. A. – 2013. – № 48 (2). – P. 205–210.
22. Indication of airborne pollution by birch and spruce in the vicinity of copper smelter / S.M. Serbula, A.A. Radojevic, J.V. Kalinovic, T.S. Kalinovic // Environmental Science and Pollution Research. – 2014. – № 21 (19). – P. 11510–11520.
23. Концентрирование металлов растениями рода *Salix* и их значение при выявлении кадмиевых аномалий / В.В. Ермаков, Н.С. Петрунина, С.Ф. Тютиков, В.Н. Данилова, С.Д. Хушвахтова, А.П. Дегтярев, Е.В. Кречетова // Геохимия. – 2015. – № 11. – С. 978–990.
24. Геохимические особенности элементного состава листьев тополя урбанизированных территорий / Д.В. Юсупов, Л.П. Рихванов, Н.В. Барановская, А.Р. Ялалдинова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – № 6. – С. 25–36.
25. Bioaccumulation of arsenic and cadmium in birch and lime from the Bor region / S.C. Alagic, S.S. Serbula, S.B. Tosic, A.N. Pavlovic, J.V. Petrovic // Archives of Environmental Contamination and Toxicology. – 2013. – № 65 (4). – P. 671–682.
26. Heavy Metal Contamination of Tree Leaves / K.S. Patel, R. Sharma, N.S. Dahariya, A. Yadav, B. Blazhev, L. Matini, J. Hoinkis // American Journal of Analytical Chemistry. – 2015. – V. 6. – P. 687–693.
27. Yusupov D.V., Karpenko Y.A. REE, Uranium (U) and Thorium (Th) contents in *Betula pendula* leaf growing around Komsomolsk gold concentration plant tailing (Kemerovo region, Western Siberia, Russia) // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – V. 43. – № 012053.
28. Heavy metal accumulation in the bark and leaves of *Juglans regia* planted in Artvin City Turkey / Y. Dogan, M.C. Unver, I. Ugulu, M. Calis, N. Durkan // Biotechnology & Biotechnological Equipment. – 2014. – № 28 (4). – P. 643–649.
29. Элементный состав лисы тополя как биогеохимический индикатор промышленной специализации урбосистем / Л.П. Рихванов, Д.В. Юсупов, Н.В. Барановская, А.Р. Ялалдинова // Экология и промышленность России. – 2015. – № 6. – С. 58–63.

Поступила 21.04.2017 г.

#### Информация об авторах

**Ташекова А.Ж.**, кандидат биологических наук, инженер лаборатории элементного анализа Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра РК.

**Торопов А.С.**, аспирант кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 504.064.2:504.53.054

## APPLICATION OF LEAVES AS BIOGEOINDICATORS OF URBAN ENVIRONMENT STATE

Ahzar Zh. Tashekova<sup>1</sup>,  
esenzholova@nnc.kz

Andrey S. Toropov<sup>2</sup>,  
torop990@gmail.com

<sup>1</sup> National Nuclear Centre RK,  
2, Krasnoarmeyskaya street, 071100, Kurchatov, Kazakhstan.

<sup>2</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**Relevance** of the work is caused by the necessity of implementing biologically significant pollution methods to control urban environment. High level of anthropogenic stress in urban areas determines the demand for application of objective methods to assess the current state of the environment and trends of ecological situation evolution in future.

**The aim** of the work is to assess the environmental pollution with heavy metals in Kazakhstan urboecosystems using leaves of trees and shrubs.

**Methods.** In some large cities of Kazakhstan the urban areas with different types of functional pressure were investigated. Leaves sampling was carried out using the averaged sample method in the bottom of the tree or shrub crown to its outer side circumferentially, at the end of the vegetation (August–September). Washed samples of leaves were brought to the air-dry state and autoclaved. Ash content of leaves of plants was determined using the combusting technique. Determination of the chemical elements in leaves was carried out by atomic absorption, atomic emission and mass spectrometric methods.

**Results.** The authors have studied the potential of bioindication of tree and shrub leaves in relation to heavy metals. A wide range of plant species growing in cities of Kazakhstan with different sources of pollution was analyzed. The content of elements such as zinc, lead, cadmium, copper, chromium, barium and uranium in plant leaves of Kazakhstan cities exceeds their background values as well as percentage abundance of terrestrial vegetation. Leaves of the studied plants growing in urban areas with the high industrial and traffic load accumulate more chemical elements in comparison with residential and recreational areas of the cities, which is also correlated with the value of their ash content. Uniqueness of different species of plant leaves to accumulation of heavy metals has been determined. Based on the obtained data some species of trees and shrubs, which leaves can be applied for diagnosis of urban ecosystems pollution with heavy metals, could be suggested for bioindication. The significant result of the paper is to determine the conditionally ambient levels of elements for the studied region.

**Key words:**

Biogeoinidication, urban environment, tree leaves, shrub leaves, heavy metals, ash content, functional zones.

**REFERENCES**

- Gorelova S.V., Frontasyeva M.V., Gorbunov A.V., Lyapunov S.M., Okina O.I. Bioindication and monitoring of atmospheric deposition using trees and shrubs. *Materials of 27<sup>th</sup> Task Force Meeting of the UNECE ICP Vegetation*. Paris, France, 2014. pp. 63.
- Petrulina N.S., Ermakov V.V. Sovremennye aspekty geokhimicheskoy ekologii rasteniy [Modern aspects of geochemical ecology of plants]. *Problems of biogeochemistry and geochemical ecology*, 2012, no. 1, pp. 147–155.
- Neverova O.A., Kolmogorova E.Yu. *Drevesnye rasteniya i urbanizirovannaya sreda: ekologicheskie i biotekhnologicheskie aspekty* [Woody plants and urban environment: environmental and biotechnological aspects]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2003. 222 p.
- Yalaltdinova A.R., Baranovskaya N.V., Rikhvanov L.P. Proyavlenost promyshlennykh predpriyatiy g. Ust-Kamenogorska v geokhimicheskikh polyakh po dannym izucheniya zoly listev topolya chernogo (*Populus nigra* L.) [The trait of industrial facilities in Ust-Kamenogorsk geochemical fields according to the study of poplar leaves (*Populus nigra* L.) ash]. *Tyazhelye metally, radionuklidy i elementy-biofilny v okruzhayushchey srede. VII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya* [VII International Scientific and Practical Conference. Heavy metals, radionuclides and biophylic elements in the environment]. Semey, 2012. Vol. 2, pp. 196–201.
- Andre O., Vollenweider P., Gunthardt-Goerg M. Foliage response to heavy metal contamination in Sycamore Maple (*Acer pseudoplatanus* L.). *For. Snow Landsc. Res.*, 2006, no. 80 (3), pp. 275–288.
- Gillooly S.E., Carr Shmool J.L., Michanowicz D.R. Framework for using deciduous tree leaves as biomonitors for intraurban particulate air pollution in exposure assessment. *Environ Monitoring Assessment*, 2016, no. 7, pp. 456–479.
- Ufimtseva M.D. Common factors of chemical elements accumulation by higher plants and their reactions in anomalous biogeochemical provinces. *Geochemistry*, 2015, no. 5, pp. 450–465. In Rus.
- Paribok T.A. Zagryaznenie rasteniy metallami i ego ekologo-fiziologicheskie posledstviya [Pollution of plants with metals and its ecological and physiological consequences]. *Rasteniya v ekstremalnykh usloviyakh mineralnogo pitaniya* [Plants in extreme conditions of mineral nutrition]. Leningrad, Nauka Publ., 1983. pp. 82–100.
- Ilkun G.M. *Zagryazniteli atmosfery i rasteniya* [Atmosphere pollutants and plants]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1978. 246 p.
- Ezhegodny statistichesy sbornik «O sostoyanii okhrany atmosfery vozdukh v Respublike Kazakhstan»* [Annual statistical report «On the state of protection of atmospheric air in the Republic of Kazakhstan»]. Astana, 2016. Vol. 1–3.
- Metodicheskie rekomendatsii po provedeniyu polevykh i laboratornykh issledovaniy pochv i rasteniy pri kontrole zagryazneniya okruzhayushchey sredy metallami* [Guidelines for conducting field and laboratory studies of soil and plants in the control of environmental pollution by metals]. Eds. N.G. Zyrin, S.G. Malakhov. Moscow, Gidrometeoizdat Publ., 1981. 109 p.
- Yagodin B.A. *Praktikum po agrokhimii* [Laboratory manual on agrochemistry]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1987. 125 p.

13. Yesenzholova A.Zh. *Listya drevesnykh i kustarnikovyykh rasteniy kak bioindikatory sostoyaniya okruzhayushchey sredy gorodov Vostochnogo, Severnogo i Tsentralnogo Kazakhstana*. Avtoreferat Diss. Kand. nauk [Leaves of trees and shrubs as bioindicators of the urban environment state of the Eastern, Northern and Central Kazakhstan. Cand. Diss. Abstract]. Novosibirsk, 2013. 20 p.
14. Asylbekova G.E. *Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya urboekosistemy g. Pavlodara s ispolzovaniem rastiitelnykh obektov*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Evaluation of the ecological state of the urban environment of Pavlodar using plants. Cand. Diss. Abstract]. Novosibirsk, 2010. 24 p.
15. Wu H., Liao Q., Chillrud S.N., Yang Q., Huang L., Bi J., Yan B. Environmental Exposure to Cadmium: Health Risk Assessment and its Associations with Hypertension and Impaired Kidney Function. *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, no. 29989, pp. 100–115.
16. Assi M.A., Hezmee M.N.M, Haron A.W., Sabri M.Y., Rajion M.A. The detrimental effects of lead on human and animal health. *Veterinary World*, 2016, vol. 9 (6), pp. 660–671.
17. Dobrovolsky V.V. *Geografiya mikroelementov. Globalnoe rasseyaniye* [Geography of microelements. Global scattering]. Moscow, Mysl Publ., 1983. 272 p.
18. Kabata-Pendias A. *Trace Elements in Soils and Plants*. 4<sup>th</sup> ed. BocaRaton, USA, CRC Press, 2011. 505 p.
19. Hofman J., Wuyts K., Van Wittenberghe S., Samson R. On the temporal variation of leaf magnetic parameters: seasonal accumulation of leaf-deposited and leaf-encapsulated particles of a roadside tree crown. *Science of the Total Environment*, 2014, no. 3, pp. 766–772.
20. Panin M.S. *Khimicheskie elementy v pylevykh vybrosakh Ust-Kamenogorskogo metallurgicheskogo predpriyatiya OAO «Kaztsink» Respubliki Kazakhstan* [Chemical elements in dust emissions of the Ust-Kamenogorsk metallurgical facility JSC Kazzinc of the Republic of Kazakhstan]. *Tyazhelye metally i radionuklidy v okruzhayushchey srede. VI Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya* [VI International Scientific and Practical Conference. Heavy Metals and Radionuclides in the Environment]. Semey, 2010. pp. 144–146.
21. Kolon K., Samecka-Cymerman A., Klink A., Kempers A.J. *Viscum album Versus host (Sorbus aucuparia)* as bioindicators of urban areas with various levels of pollution. *Journal of Environmental Science and Health, P. A*, 2013, no. 48 (2), pp. 205–210.
22. Serbula S.M., Radojevic A.A., Kalinovic J.V., Kalinovic T.S. Indication of airborne pollution by birch and spruce in the vicinity of copper smelter. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, no. 21 (19), pp. 11510–11520.
23. Ermakov V.V., Petrunina N.S., Tyutikov S.F., Danilova V.N., Khushvakhtova S.D., Degtyarev A.P., Krechetova E.V. Concentration of metals by plants of the genus *Salix* and their implication in detection of cadmium anomalies. *Geochemistry*, 2015, no. 11, pp. 978–990. In Rus.
24. Yusupov D.V., Rikhvanov L.P., Baranovskaya N.V., Yalaltdinova A.R. Geochemical features of the elemental composition of poplar leaves of urbanized territories. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, no. 6, pp. 25–36.
25. Alagic S.C., Serbula S.S., Tomic S.B., Pavlovic A.N., Petrovic J.V. Bioaccumulation of arsenic and cadmium in birch and lime from the Bor region. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2013, no. 65 (4), pp. 671–682.
26. Patel K.S., Sharma R., Dahariya N.S., Yadav A., Blazhev B., Martini L., Hoinkis J. Heavy Metal Contamination of Tree Leaves. *American Journal of Analytical Chemistry*, 2015, vol. 6, pp. 687–693.
27. Yusupov D.V., Karpenko Y.A. REE, Uranium (U) and Thorium (Th) contents in *Betula pendula* leaf growing around Komsomolsk gold concentration plant tailing (Kemerovo region, Western Siberia, Russia). *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43, no. 012053.
28. Dogan Y., Unver M. C., Ugulu I., Calis M., Durkan N. Heavy metal accumulation in the bark and leaves of *Juglans regia* planted in Artvin City Turkey. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 2014, no. 28 (4), pp. 643–649.
29. Rikhvanov L.P., Yusupov D.V., Baranovskaya N.V., Yalaltdinova A.R. Elementnyy sostav listvy topolya kak biogeokhimiicheskiy indikator promyshlennoy spetsializatsii urbosistem [Elemental composition of poplar leaves as biogeochemical indicator of industrial specialization of urban systems]. *Ekologiya i promyshlennost Rossii*, 2015, no. 6, pp. 58–63.

Received: 21 April 2017.

#### Information about the authors

**Ahzar Zh. Tashekova**, Cand. Sc., engineer, National Nuclear Centre RK.

**Andrey S. Toropov**, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 624.131

## ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ОСНОВАНИЯ ОПОРЫ МОСТА НА СТАРОЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ЛИНИИ

Строкова Людмила Александровна<sup>1</sup>,  
sla@tpu.ru

Епифанова Екатерина Александровна<sup>1</sup>,  
epifanova@tpu.ru

Коржнева Татьяна Геннадьевна<sup>1</sup>,  
korzhneva@tpu.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность темы обусловлена необходимостью усовершенствования подходов к оценке и прогнозу деформаций сооружения, работающего в сложных природных условиях. В статье освещено изучение инженерно-геологических условий территории при реконструкции виадука. Особенности реконструкции сооружения связаны с необходимостью укрепления опор, замены пролетных строений, сложностью режима подземных вод, нарушением природного сложения грунтового массива и физико-механических свойств. Поэтому проводимая реконструкция виадука потребовала актуализации расчетных моделей для оценки напряженно-деформированного состояния грунтового основания.

**Целью** исследования является численная оценка напряженно-деформированного состояния системы «основание–сооружение».

**Методика исследования.** Исходными данными для моделирования поведения грунтового массива послужили региональные геологические материалы, а также полевые, полученные в 2011–2012 гг. В процессе работ пробурено 11 скважин, пройдено 9 шурфов, отобрано 17 монолитов и 35 проб нарушенной структуры. Выполнено рекогносцировочное обследование участка. Для прогноза изменения напряженно-деформированного состояния грунтового массива использовался программный комплекс на базе МКЭ. Для оценки деформаций и построения точной трехмерной модели объекта наблюдения использовалась технология лазерного сканирования. Сканирование объекта проводилось лазерным 3D сканером Leica Scanstation C10, планово-высотное обоснование и привязка пунктов обоснования к местной системе координат – с использованием электронного тахеометра LEICA TS15 и GNSS приемника LEICA GS10, обработка массива точек проводилась в программном комплексе Leica Cyclone 8.0, трехмерное моделирование объекта было осуществлено в программном комплексе SolidWorks.

**Результаты.** Детально изучены инженерно-геологические условия участка изысканий. Создана цифровая расчетная модель. Выполнено сравнение результатов моделирования с пространственно-координатным положением конструкций, установленном при лазерном сканировании. Составлен прогноз изменения напряженно-деформированного состояния грунтового массива при реконструкции виадука.

### Ключевые слова:

Грунт, лазерное сканирование, моделирование, деформации, механические свойства, метод конечных элементов.

### Введение

В рамках государственной программы модернизации железнодорожной инфраструктуры с 2011 г. начались работы по реконструкции виадука на участке магистрали Абакан–Тайшет между станциями Джебь и Щетинкино в Восточном Саяне (Курагинский район Красноярского края). Идея строительства железной дороги через Саяны появилась еще в XIX в. Проектирование магистрали началось в 1930-х гг. Трасса должна была обеспечить доставку транзитных грузов из Средней Азии, Казахстана, Кузбасса в Восточную Сибирь и на Дальний Восток страны. В 1935 г. начались поиски наилучшего варианта трассы через Саяны. Исследователи прорабатывали пять линий трассы [1]. При изысканиях в ноябре 1942 г. погибла изыскательская экспедиция в составе А.М. Кошурникова (выпускника ТТИ-ТПУ 1930 г.), К.А. Стофато, А.Д. Журавлева, обследовавших наиболее перспективное – Нижнеудинское – направление. В 1948–1949 гг. была произведена аэрофотосъемка горной части местности. В 1953–1955 гг. была

завершена съемка всей трассы и проведены наземные привязочные работы на площади свыше 15 тыс. км<sup>2</sup>. В 1959 г. был утвержден проект строительства трассы. Одним из самых сложных участков является перегон Джебь–Щетинкино. Расстояние между станциями Джебь и Щетинкино по прямой – 5,6 км, однако перепад высот между ними составляет 220 м. Проектировщики сумели снизить максимальный уклон до 15 ‰, придумав поистине изящное решение: для набора высоты использовали две соседние вершины, закрутив два полукольца (т. н. Джебская петля) и соединив трассу между горами Козинским виадуком. Для набора высоты длина перегона была увеличена до 14 км, заложено три тоннеля. Железная дорога Абакан–Тайшет, носящая второе название «Трасса мужества» была принята государственной комиссией в постоянную эксплуатацию 20 декабря 1965 г. На рис. 1, в центре, виден виадук, слева вверх – портал второго Джебского туннеля. Дорога уходит в тоннель, огибает гору и через виадук переходит на соседний склон.



Рис. 1. Фотография участка объекта

Fig. 1. Picture of the object site

Козинский виадук (длиной 355 м, пролетные строения опираются на бетонные опоры, высота которых достигает 65 м) после 50-летней эксплуатации выработал свой ресурс, потребовалась его модернизация. На первом ее этапе, в 2015 г., укреплены опоры виадука методом инъекций специальными смесями, они стали иметь повышенную прочность, морозостойкость и водонепроницаемость. Кроме того, опоры виадука дополнительно обернуты особым защитным материалом. Вторым этапом, в 2016 г., стала замена 9 пролётных строений виадука. Железобетонные конструкции длиной 34 м и весом 260 т демонтируют, а на их место устанавливают металлические весом 107 т, при монтаже которых используют современные композитные материалы, они вдвое легче прежних, но гораздо прочнее: их установка позволит пропускать грузовые поезда весом более 7 тыс. т [2]. Весной 2017 г. приступят к торкретированию опор моста. Опоры будут обрабатываться специальным составом, что даст им дополнительную защиту и усилит прочность бетона.

#### Инженерно-геологическая характеристика района

**Обобщение региональных геологических данных.** В тектоническом отношении Восточно-Саянский регион отвечает области докембрийской (байкальской) складчатости. Он сложен наиболее древними архейскими и протерозойскими породами, испытавшими глубокий метаморфизм и интенсивную дислоцированность. В толще метаморфических пород в разрезах Восточного Саяна широко распространены интрузивные породы, представленные гранитами и габбро [3].

Гранитные тела мощностью от 5 до 100 м залегают в зонах тектонических разломов. Склоны мостового перехода состоят из горных пород различного литологического состава: кристаллических сланцев, мрамора, мраморизованных известняков, песчаников и алевролитов. Большую часть массива слагают кристаллические слюдяные и хлоритовые окварцованные сланцы с высокой прочностью (сопротивление сжатию достигает 80 МПа). Мраморы и мраморизованные известняки – крупнокристаллические, массивные, залегают в виде слоев мощностью до 100–250 м, также обладают повышенной прочностью и относятся к категории средней устойчивости. Песчаники представлены кремнистыми разновидностями, характеризующимися повышенной прочностью (50–80 МПа). Алевролиты и аргиллиты с известковым и глинистым цементом в верхней зоне интенсивно выветрены, на склонах образуют осыпи. Прочность их составляет 28–35 МПа. К категории совершенно неустойчивых относятся дисперсные грунты на склонах, представленные щебнем с песчано-глинистым заполнителем и глыбами.

**Гидрогеологические условия** региона определяются распространением трещиновато-грунтовых и трещинно-карстовых вод в кристаллических сланцах и грунтах карбонатного состава. В зонах тектонических нарушений распространены трещинно-жилые воды.

**Геологические процессы.** Для региона характерна относительно высокая сейсмичность, до 8–9 баллов по шкале MSK-64. Активность Главного Саянского разлома подтверждается многочисленным количеством эпицентров землетрясений

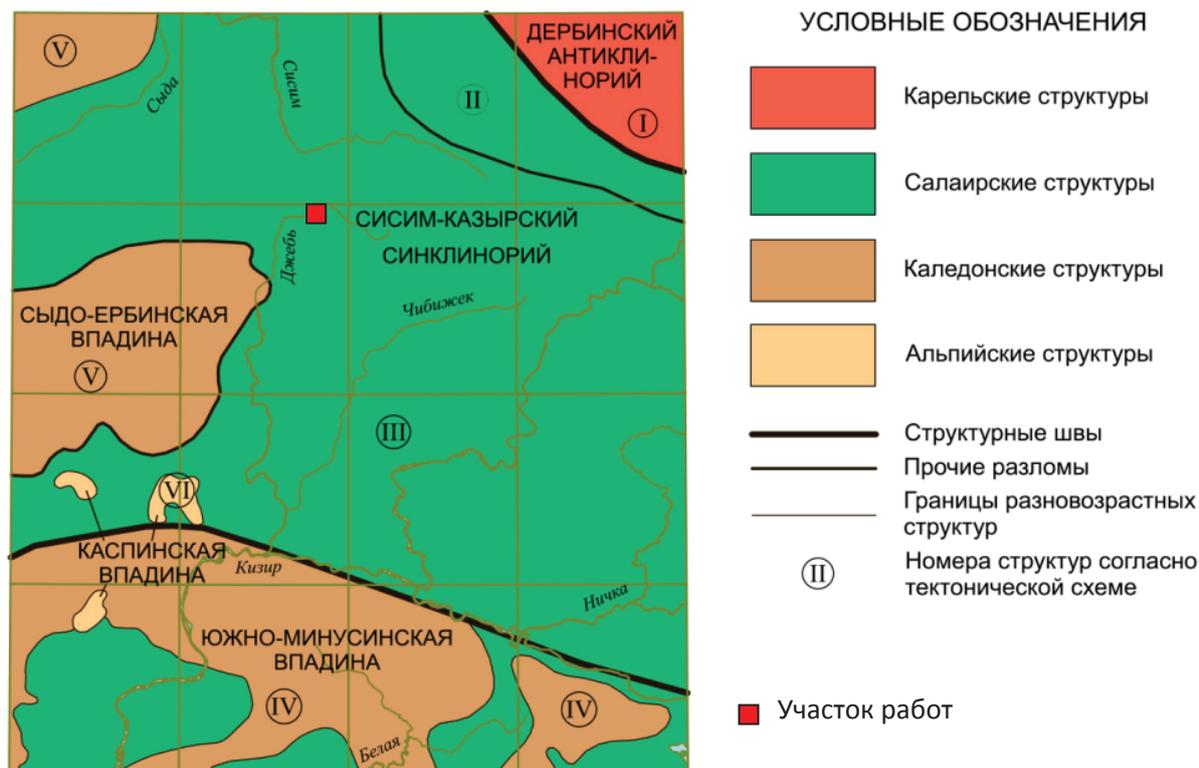


Рис. 2. Схема тектонического районирования района работ. Масштаб 1:1 000 000 [3]

Fig. 2. Scheme of tectonic zoning of the study area. Scale 1:1 000 000 [3]

интенсивностью от 5 до 7 баллов. Широкое распространение карбонатных пород обусловило развитие карстовых процессов, как древних, так и современных. Развиты поверхностные карстовые формы: воронки, поноры, котловины; и подземные формы карста: пещеры, находящиеся на стадии активного развития. Карстовые полости заполнены водой, обладают значительными статическими запасами воды. По склонам долин широко развиты обвалы, осыпи и курумы, обусловленные скоплением крупнообломочного материала на отлогих участках хребтов.

**Инженерно-геологическое строение площадки.** Полевые работы на объекте проводились в августе 2011 г. В процессе работ пробурено 11 скважин, пройдено 9 шурфов, отобрано 17 монолитов и 35 проб нарушенной структуры. Выполнено рекогносцировочное обследование участка [4].

Согласно инженерно-геологическим изысканиям, на участке в геологическом строении до исследованной глубины 10,0 м принимают участие сверху вниз следующие инженерно-геологические элементы (ИГЭ).

**ИГЭ-1.** Насыпной техногенный грунт, представленный загрязненным щебнем путевого балласта, осыпью выветрелых аргиллитов и алевролитов, в верхней зоне с включением почвенно-растительных остатков, глыб и песчано-глинистого заполнителя. Мощность слоя составляет от 0,5 до 3,6 м.

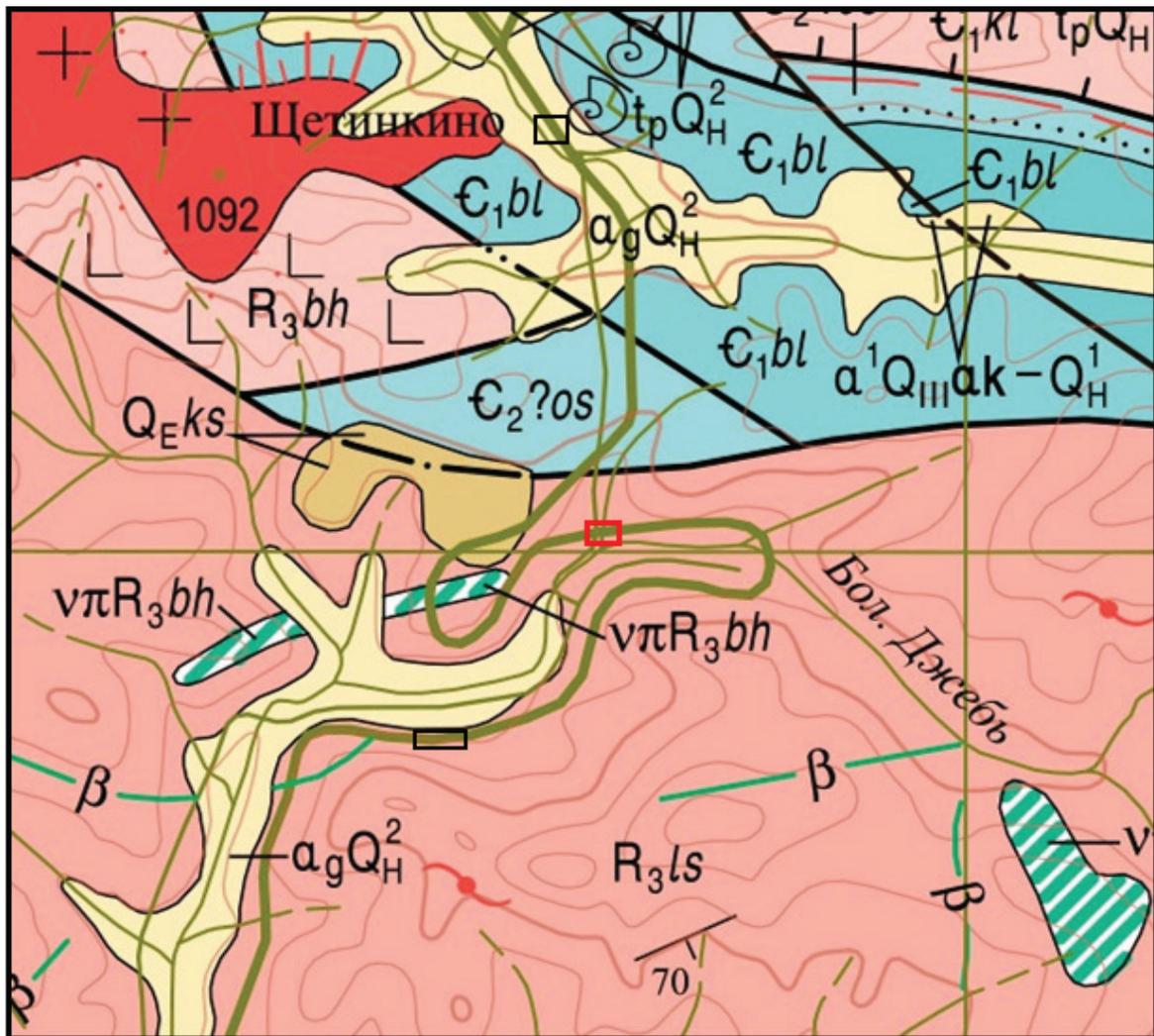
**ИГЭ-2.** Грунт крупнообломочный дресвяный (алевролитовая дресва). Вскрыт в верхней части долины ручья при проходке шурфа под подошвой самой деформируемой опоры. Мощность слоя изменяется от 1,6 до 3,7 м.

**ИГЭ-3.** Суглинок гравелистый от тугопластичной до мягкопластичной консистенции. Нормативное значение плотности грунта составляет  $1,92 \text{ г/см}^3$ .

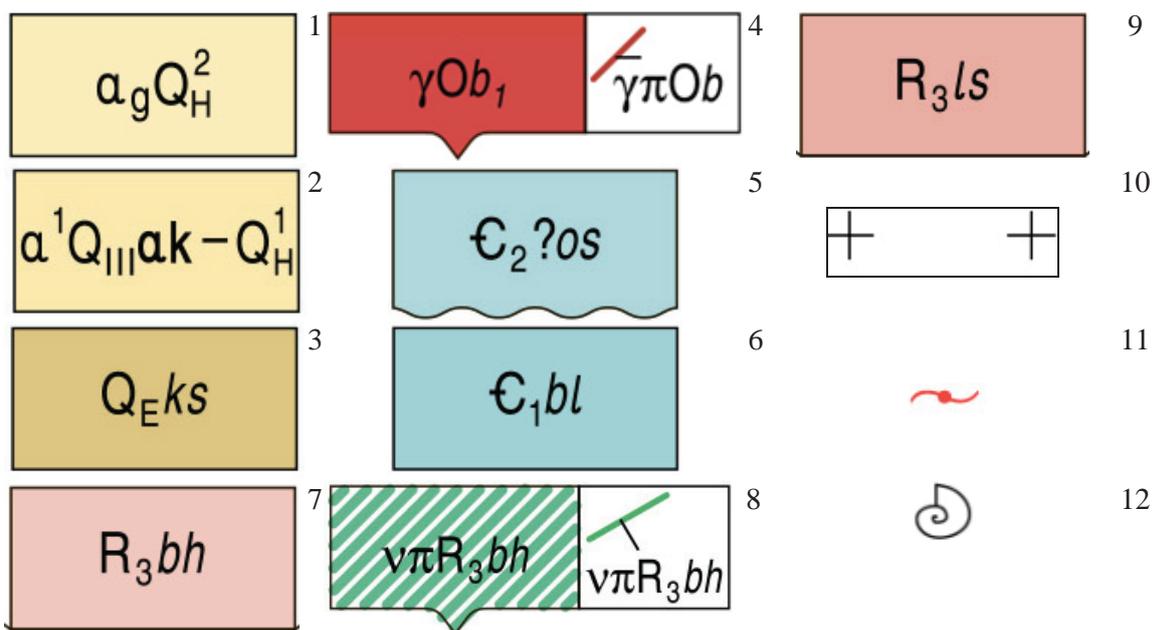
**ИГЭ-4.** Метаморфические и осадочные скальные грунты средней прочности, слабовыветрелые, неразмываемые, представленные крепкими кристаллическими темно-зелеными сланцами, алевролитами, реже мраморизованными известняками и песчаниками. Подошва слоя при бурении не вскрыта.

Следует отметить, что прочностные характеристики всех ИГЭ приняты по СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений», т. к. наличие в них крупного заполнителя не позволило произвести полный комплекс лабораторных исследований их механических характеристик [4].

**Гидрогеологические условия площадки.** На период проведения изысканий (середина августа 2011 г.) грунтовые воды были встречены на глубине 4,3–5,0 м (абс. отм. 643,25–643,58 м) от дневной поверхности в тальвеге. По гидравлическим признакам воды на участке обследования – ненапорные, по степени минерализации – пресные.



 Участок работ



По химическому составу гидрокарбонатно-кальцевые, нейтральные.

*Инженерно-геологические процессы и явления.* Грунты разреза непучинистые, ненабухающие, непросадочные, незасоленные, без значительного содержания органики, реакционно-способные минералы в составе грунтов отсутствуют.

Следов эрозии склона, вывалов, оспей не обнаружено – поверхность склона покрыта травянистой растительностью и кустарником и на момент изысканий обсыпана мощным слоем загрязненного щебеночного балласта, сброшенного с пролетных строений при производстве ремонтных работ.

*Обследование конструкций фундаментов.* В составе инженерно-технического обследования по определению геометрических параметров и состояния конструкций фундаментов произведены следующие работы:

- выбор и согласование с Заказчиком мест расположения горных выработок; рекогносцировочное обследование на объекте и уточнение участков вскрытия фундаментов;
- вскрытие конструкций фундаментов шурфами на запланированных участках;
- необходимые обмеры фундаментов.

По результатам обмерных работ и данных архивных материалов выполнены:

- чертежи фундаментов;
- необходимые обмерные работы по надземным конструкциям для последующей планово-высотной привязки вскрытых участков фундаментов;
- инструментальный поиск наличия армирования в теле фундаментов;

- графическая и фотографическая фиксация повреждений и дефектов обследуемых конструкций;

- определение прочности бетона на участках вскрытых конструкций фундаментов.

Исходя из условия, что обследовательские работы проводились на эксплуатируемом сооружении, инструментальное обследование конструкций фундаментов, связанное с нарушением целостности и повреждением сохраняемых обследуемых конструкций, производилось только в доступных местах и преимущественно – методами неразрушающего контроля. Железнодорожный мост десятипролетный, двухпутный, сооружен по схеме  $9 \times 33 + 15,80$  м. Фактический продольный уклон моста составляет около 14 ‰. Мост расположен на прямом участке пути между двумя туннелями и перекрывает ручей. Подходы к сооружению находятся в выемках. Опоры моста двухпутные индивидуального проектирования. Устои выполнены массивными. Промежуточные опоры имеют в надфундаментной части тонкостенчатую конструкцию из армированного бетона. Фундаменты выполнены массивные, мелкого заложения, различной конфигурации из бутобетона, армированные каркасом: сталь арматуры Ст. 3, профиль периодический по ГОСТ 5181-58, диаметр стержней 12 мм. Глубина заложения фундаментов у различных опор различна. Разница в конфигурации фундаментов и отметках их подошв, по результатам обследования и данным проекта, незначительна.

На всех вскрытых участках фундаментов следов вертикальной гидроизоляции не обнаружено.

**Рис. 3.** Фрагмент геологической карты района работ [3]. 1 – Голоценовые аллювиальные отложения пойм горных рек – валунно-галечниковые отложения с гравием, песком (1..12 м); 2 – Верхнечетвертичные аллювиальные отложения первой террасы – галечники, пески, суглинки (3,5..15 м); 3 – Эоплейстоценовые отложения каспийской свиты. Делювиальные и пролювиальные отложения карстовых западин, пологих склонов. Красноцветные пластичные глины, суглинки с обломками различных пород, оолитовыми стяжениями гидроокислов марганца и железа (1..30 м); 4 – Ордовикские интрузивные образования. Ольховский габбро-диорит-гранодиоритовый комплекс. Граниты; 5 – Среднекембрийские вулканогенно-осадочные образования осиновской свиты. Конгломераты, туфоконгломераты, туфы, туфопесчаники, реже андезиты, дациты, песчаники (менее 1800 м); 6 – Нижнекембрийские отложения балахтинсонской свиты. Известняки рифогенные, песчаники, сланцы известково-глинистые, конгломераты (менее 700 м); 7 – Позднерифейский Бахтинский вулканический комплекс. Бахтинская свита. Лавы и лавобрекчии базальтов, их туфы, прослои известняков (более 1800 м); 8 – Бахтинский вулканический комплекс. Субвулканические образования. Силлы, дайки, габбро-порфиритов; 9 – Позднерифейский вулканический комплекс. Лысанская свита. Сланцы серицит-хлоритовые, углеродисто-кремнистые, потоки базальтов, их туфы, прослои и линзы мраморов (менее 2500 м); 10 – Граниты; 11 – Зеленосланцевая фация регионального метаморфизма; 12 – Места находок ископаемых остатков морских беспозвоночных

**Fig. 3** Fragment of the geological map of the study area [3]. 1 – Holocene alluvial deposits of mountain river floodplains – boulder-pebbly sediments with gravel, sand (1..12 m); 2 – Upper Quaternary alluvial deposits of the first terrace – gravel, sands, clay (3,5..15 m); 3 – Eopleistocene deposits of kaspinskaya suite. Diluvial and proluvial deposits of karst potholes, smooth slopes. Red ball clays, clays with debris of different rocks, oolitic contractions of hydrogen oxides of manganese and iron (1..30 m); 4 – Ordovician intrusive formations. Olkhovsky gabbro-diorite-granodiorite complex. Granites; 5 – Middle Cambrian volcanic-sedimentary formations of osinovskaya suite. Conglomerates, tuff-conglomerates, tufa, sand tuff, andesites more seldom, dacite, sandstones (less than 1800 m); 6 – Low Cambrian deposits of balakhtinsonskaya suite. Reefogenic limestones, sandstones, calcareo-argillaceous slates, conglomerates (less than 700 m); 7 – Late-Riphean Bakhtinsky volcanic complex. Bakhtinskaya suite. Lava and lava-breccia of basalts, their tufa, limestones layers (more than 1800 m); 8 – Bakhtinsky volcanic complex. Subvolcanic formations. Sills, dikes, gabbro-porphyrates; 9 – Late-Riphean volcanic complex. Lysanskaya suite. Sercite-chloritic, carbon-silicate slates, basalt flows, their tufa, marble layers and lens (less than 2500 m); 10 – Granites; 11 – greenschist facies of regional metamorphism; 12 – Areas of findings of fossils of marine invertebrates

В процессе обследования вскрытых участков фундаментов опасных трещин, вывалов бетона и других серьезных повреждений в конструкциях фундаментов, влияющих на их несущую способность, не обнаружено. Общее состояние фундаментов, по результатам обследования вскрытых участков, признано работоспособным.

Прочность бетонов конструкций фундаментов определялась методом неразрушающего контроля прибором ОНИКС-2.5. По результатам замеров класс бетона по прочности на сжатие вскрытых участков фундаментов составляет не менее В12,5. Поиск арматуры в конструкциях фундаментов производился методом неразрушающего контроля прибором ПОИСК-2.5 [4].

#### Лазерное сканирование объекта

Современные требования нормативных документов к проектированию ответственных сооружений предполагают наблюдение за его состоянием на протяжении всего жизненного цикла от проектирования до закрытия. При осуществлении такого наблюдения проверяется верность размеров, допусков, установленных проектом, соответствие выполненных работ положениям СНиП и стандартизированным документам проекта производства работ, замеры собранных строительных элементов и определение достоверности реальных и допускаемых предельных положений, фиксируются различные наружные дефекты и повреждения, возможность производства дальнейших работ по необходимой технологической последовательности.

Одним из методов такого контроля является определение деформаций зданий и сооружений согласно ГОСТ 24846-2012. Использование традиционных геодезических приборов, таких как нивелиры, теодолиты и фототеодолиты, требует огромного количества измерений и времени для этих измерений. Особые проблемы возникают при наблюдениях таких объектов, как мосты, путепроводы, эстакады, надземные коммуникации, и других объектов, имеющих сложные сплайновые поверхности. Построение трехмерных моделей традиционными методами сбора информации в большинстве случаев просто невозможно. С помощью наземного лазерного сканирования (НЛС) поставленные задачи решаются безошибочно, так как все данные

съемки находятся в одном трехмерном координатном поле. Корректность построения частных элементов модели и достоверность их взаимного расположения определяются точностью сканирующей системы. Лазерное сканирование фиксирует абсолютно все детали рельефа, находящиеся в пределах планируемой съемки, и в процессе камеральной обработки позволяет уточнять реальное положение того или иного элемента [5–15].

Данный вид съемки полностью является трехмерным отображением реального положения объекта в момент осуществления съемочных работ, что разрешает выполнять следующие прикладные задачи:

- определение большинства геометрических характеристик технологических элементов и конструкций (расстояний, размеров, высот, объемов и т. п.);
- выполнение профилей, разрезов, сечений;
- выполнение различных планов объекта;
- выполнение проектно-изыскательских работ;
- мониторинг технологического оборудования и состояния объектов;
- анализ и прогнозирование последствий чрезвычайных ситуаций.

Цифровая модель выгодна для эксплуатации объекта, а 3D-графика в сравнении с двухмерными чертежами обладает несомненно большей визуализацией и информативностью, что может позволить применять ее в ходе геотехнического мониторинга для прогноза незапланированных ситуаций.

Параметры сканирования задаются вручную. Например, для частой застройки с высокой плотностью существующей наземной инфраструктуры самыми оптимальными настройками сканирования будут такие: 1 точка на 0,5 см<sup>2</sup> на расстоянии 50 м от сканера. Избыточный объем данных лазерного сканирования позволяет получить максимально полную информацию, исключив ошибки при полевых измерениях. Данные измерений объекта составляют от десятков тысяч до нескольких сот миллионов точек. Полученные данные лазерного сканирования конвертируются в программы для проектирования и ГИС (например, в AutoCad). Интеграция фотокамеры и лазерного сканера в одном устройстве выполняет автоматическую фотофиксацию объекта в процессе работы.

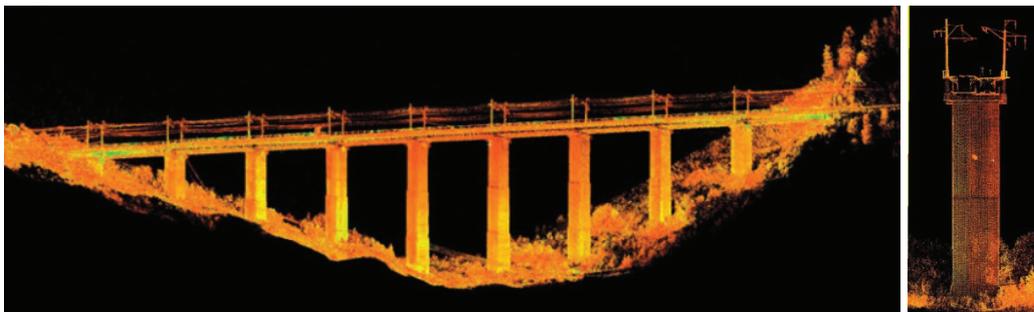


Рис. 4. Исходные данные в виде облака точек

Fig. 4. Original data in the form of a point cloud

Важным преимуществом совместного использования лазерного сканирования с программами для проектирования и ГИС является вариативность обработки результата сканирования – облака точек. В зависимости от способа обработки облака точек решаются следующие задачи:

- получение трехмерной модели объекта, чертежей, разрезов, сечений;
- выявление дефектов конструкций при сравнении облака точек с проектной моделью;
- оценка и определение деформаций при сравнении с предыдущими измерениями;
- создание топографических планов.

Точность получаемой информации составляет ~10 мм.

«Центром лазерных технологий» при кафедре ЛИСТ ИФВТ ТПУ был проведен комплекс работ по съемке моста в 2012 г. Цель работы – получение массива данных, создание комплекса обмерочных чертежей, фиксация крупных дефектов (трещин, смещений, разрушений, повреждений) несущих и ограждающих конструкций, разработка твердотельной трехмерной модели виадука [16]. Наземное лазерное сканирование объекта проводилось Leica Scanstation C10 в светлое время суток и заняло 2 рабочих дня. Съемка проводилась методом тахеометрического хода в два этапа: под мостом по несколько станций на каждый пролет и по мосту. Всего было создано 33 точки установки сканера. На каждой станции измерения выполнялись в течение 5–7 минут.

Перед началом съемки было произведено плано-высотное обоснование и привязка пунктов обоснования к местной системе координат с использованием электронного тахеометра LEICA TS15 и GNSS приемника LEICA GS10, а также определены на местности наиболее оптимальные места для станций сканера, чтобы конечное облако точек содержало наиболее полную информацию обо всех конструктивах моста.

Результатом наземного лазерного сканирования является массив точек (рис. 4), где каждая точка имеет координаты положения в пространстве и интенсивность.

Камеральная обработка результатов сканирования заняла 1 неделю и состояла из следующих этапов:

1. Уравнивание в системе координат, определение оценки точности измерений и сшивка в единое облако точек данных, полученных в результате сканирования с каждой станции. Обработка массива точек от «шумов» и элементов, не несущих в себе сведений об объекте, в программном комплексе Leica Cyclone 8.0. Общий объем начальной информации, полученной по данным лазерно-сканирующей съемки, составлял облако в 500 млн точек, после удаления лишней информации размер общего скана сократился до 400 млн точек. Среднеквадратическая погрешность «сшивки» всех полученных «облаков точек» в единую систему координат составила 4 мм.
2. Детальное трехмерное моделирование объекта в программном комплексе SolidWorks, формирование информационной базы элементов объекта. Каждый элемент: колонны, опоры, пролеты, ограждение и т. д., строился методом точного встраивания в облако точек, благодаря чему были получены точные твердотельные копии реальных объектов. Однако, ввиду того, что лазерный сканер не может производить съемку объектов, которые скрыты за препятствиями, некоторая часть внутренних конструкций моста была построена по проектным документам. Построенные элементы собирались в общую сборку с жесткой привязкой элементов друг к другу в соответствии с реальным их положением друг относительно друга.

В результате полученная трехмерная твердотельная модель (рис. 5) является точной копией сооружения [16].

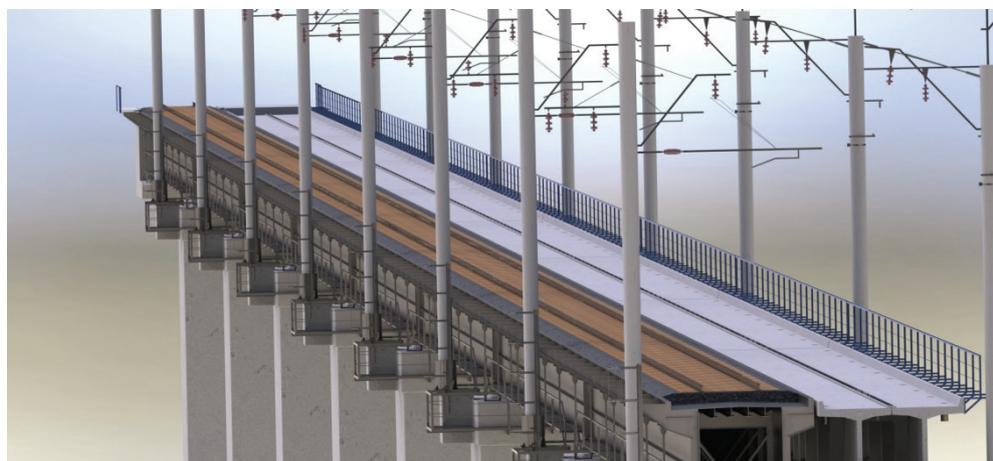


Рис. 5. Трехмерная модель моста

Fig. 5. Three-dimensional model of the bridge

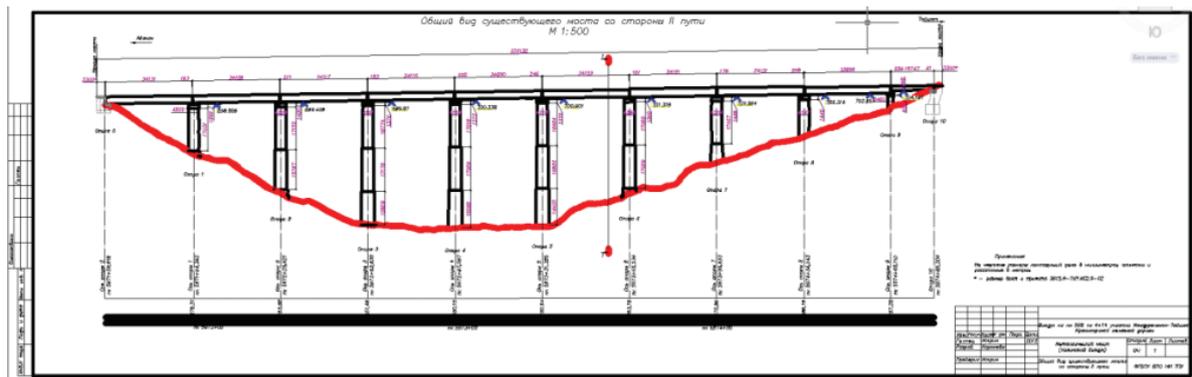


Рис. 6. Обмерочный чертеж модели

Fig. 6. Model working drawing

- Высокая точность модели (5–10 мм) позволяет:
- произвести замер геометрических параметров любого элемента в модели и сделать разрез или сечение в любом месте;
- построить в автоматическом режиме двумерный чертеж любого элемента, либо части модели, либо модели в целом;
- произвести анализ текущего состояния сооружения, а также прочностной расчет в специализированных программах;
- создать информационную систему конструкций с необходимыми чертежами и спецификацией, выявить отклонения от проектной документации;
- нарушения и анализ опор на вертикальность.

На основе трехмерной модели в автоматическом режиме построены обмерочные чертежи моста (рис. 6) с нанесением размеров и дефектов конструкций [16]. На основе результатов сканирования построен также топографический план участка 500 масштаба.

Значительные отклонения от проектного положения наблюдаются у одной опоры сооружения,

для которой нами выполнено моделирование напряженно-деформированного состояния грунтового массива методом конечных элементов в декабре 2016 г.

#### Анализ напряженно-деформированного состояния грунтового массива методом конечных элементов

В данном исследовании использован программный комплекс PLAXIS (2006). PLAXIS – комплекс, разработанный нидерландскими геотехниками de Borst, Vermeer (1984), успешно показал себя при решении многих геотехнических задач [17].

Грунтовой массив длиной 40 м, высотой 23 м представлен в виде 2D-модели на рис. 7.

После построения геометрической модели и задания свойств грунта PLAXIS автоматически сгенерирована сетка конечных элементов (рис. 8) из 5407 неправильных треугольных 15-узловых элементов. При расчете конечного элемента смещения рассчитываются по узлам, напряжения – в 943 интегральных точках Гаусса (или точках напряжения).

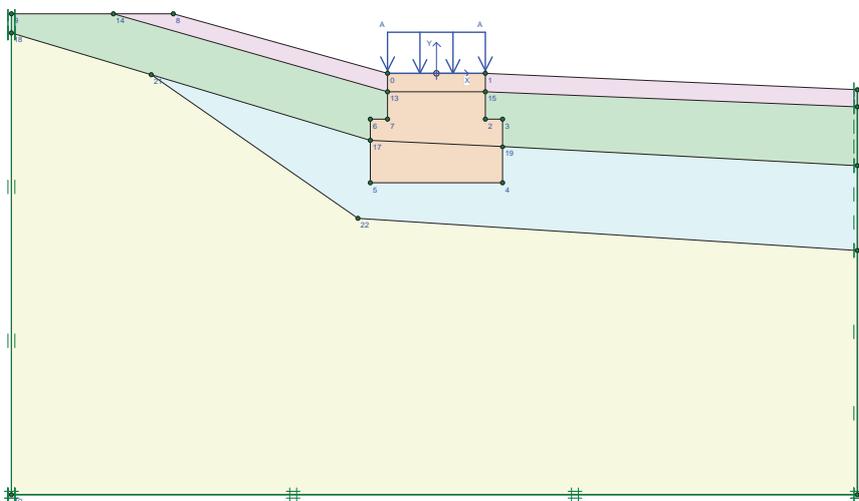


Рис. 7. Геометрическая модель грунтового массива

Fig. 7. Geometry model of the site

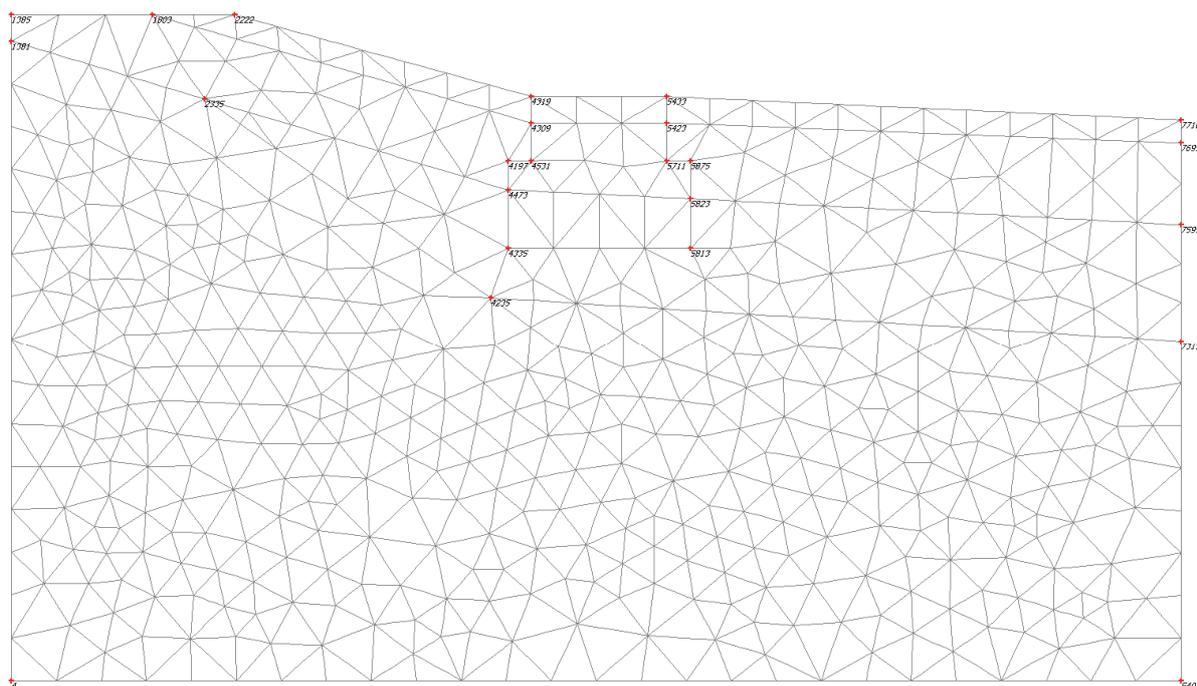


Рис. 8. Сетка конечных элементов с базовыми узлами

Fig. 8. Mesh of finite elements with significant nodes

Вертикальная нагрузка от веса опоры до обреза фундамента, веса пролетных строений, подвижного состава задана опцией *Distributed loads A* – до ремонта принята 200 кН/м/м, а после замены пролетных строений на более легкие и усиления опор принята, равной 100 кН/м/м.

Для материала фундамента опоры использовалась упругая модель (Plaxis). Были использованы

следующие параметры: удельный вес 25 кН/м<sup>3</sup>, коэффициент Пуассона 0,25. Для оценки поведения грунта использована *упругопластическая модель с изотропным упрочнением Hardening Soil Model* (Plaxis). Модель учитывает несовпадение модуля упругости ветвей разгрузки и повторно-нагружения, наблюдаемое при лабораторных испытаниях. Модель точно описывает поведение

Таблица 1. Параметры грунтов

Table 1. Soil data sets parameters

Параметры/наименование грунта Parameters/name of soil		Щебень Ballast	Древесный грунт Gravel	Гравелистые суглинки Gravelly loam	Кристалличе- ские сланцы Shale
$\gamma_{\text{unsat}}$	[kN/m <sup>3</sup> ] Удельный вес грунта Soil unit weight above phreatic level	19,00	23,00	19,00	25,00
$\gamma_{\text{sat}}$	[kN/m <sup>3</sup> ] Удельный вес водонасыщенного грунта Soil unit weight below phreatic level	21,00	24,00	21,00	26,00
$E_{50}^{\text{ref}} = E_{\text{bed}}^{\text{ref}}$	[kN/m <sup>2</sup> ] Модуль Юнга при первичном нагружении Young' modulus	100000	80000	60000	200000
power (m)	[–] Показатель степени компрессионной кривой Power for stress-level dependency of stiffness	0,5	0,3	0,5	0,5
$c_{\text{ref}}$	[kN/m <sup>2</sup> ] Сцепление Cohesion	10	10	5	5
$\varphi$	[°] Угол внутреннего трения Angle of internal friction	45	42	32	30
$\psi$	[°] Угол дилатансии Dilatancy angle	5	5	0	0
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	[kN/m <sup>2</sup> ] Модуль Юнга при разгрузке – повторном нагружении Unloading/reloading stiffness	200000	160000	120000	500000
$\nu_{\text{ur}}^{(\text{nu})}$	[–] Коэффициент Пуассона Poisson's ratio	0,2			

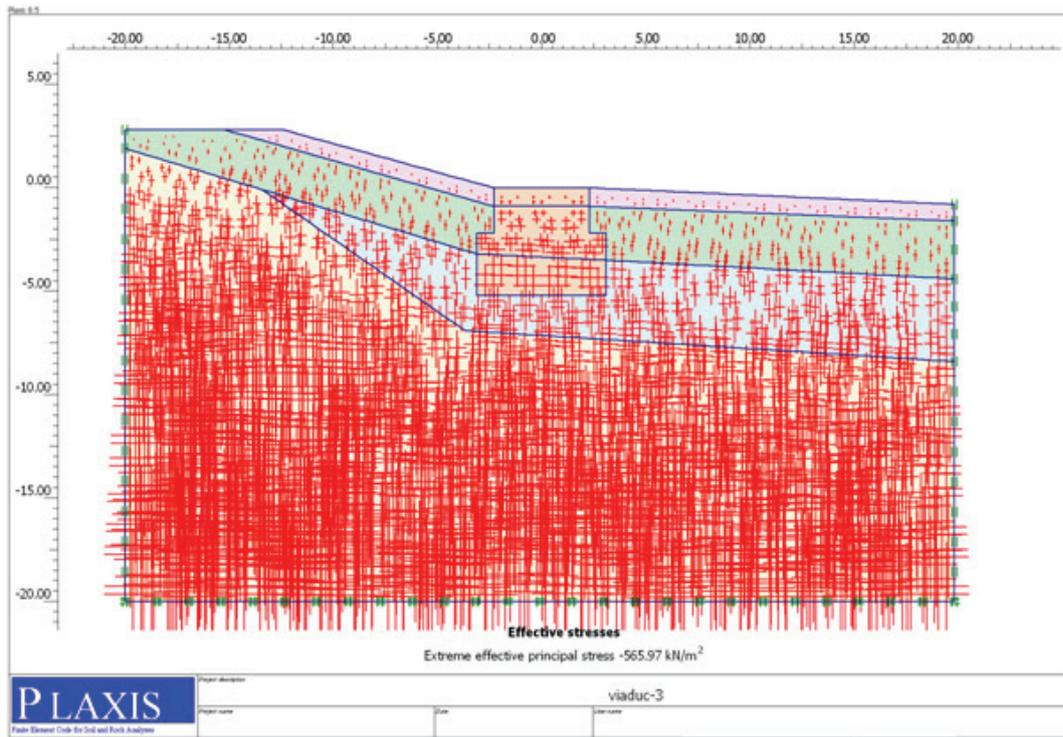


Рис. 9. Поле начальных эффективных напряжений в грунтовом массиве

Fig. 9. Initial stress field in the geometry around the footing

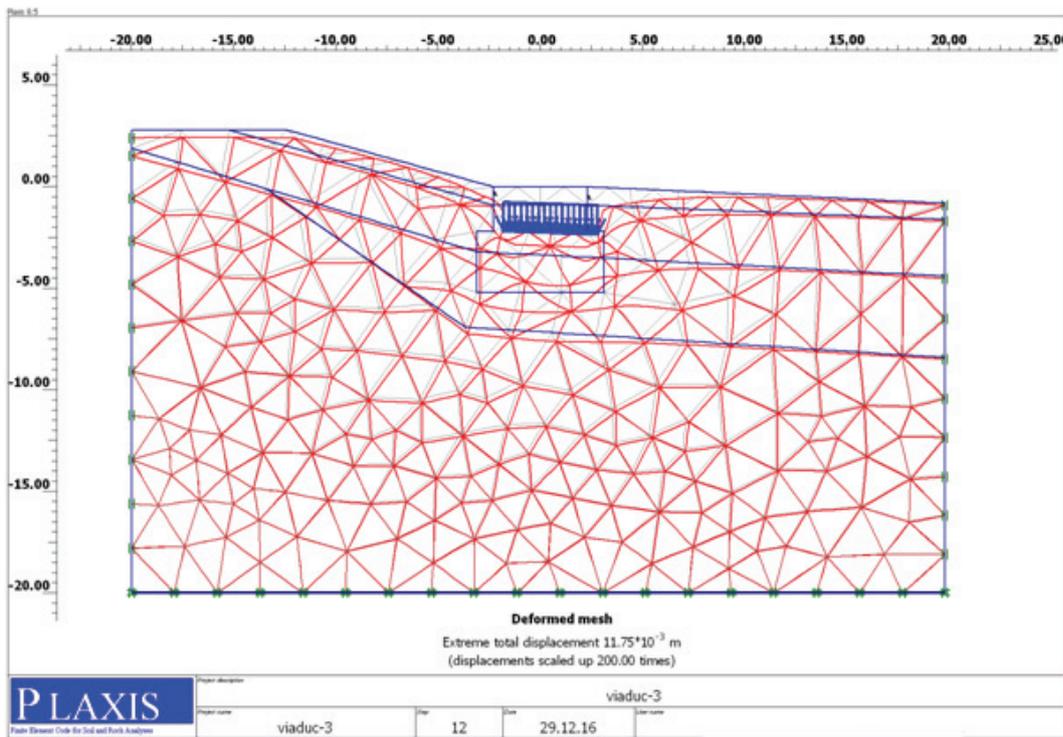


Рис. 10. Деформированная сетка в ходе эксплуатации объекта

Fig. 10. Deformed mesh after loading

грунта при экскавации, при устройстве подпорных стен и проходке туннелей, сопровождающейся уменьшением среднего эффективного напряжения

и одновременно мобилизацией сопротивления пород сдвигу. Ограничения модели: неспособность учесть явления анизотропии прочности и жестко-

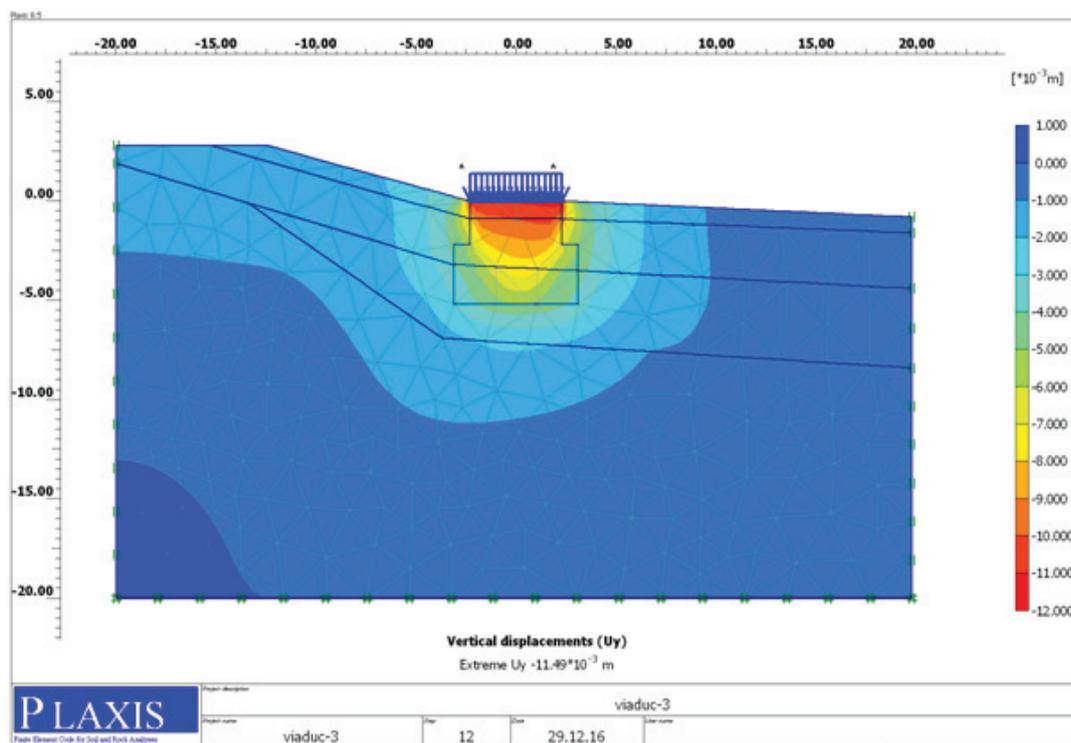


Рис. 11. Вертикальные перемещения грунтового основания при эксплуатации объекта

Fig. 11. Vertical displacements of the site after loading

сти, ползучести и длительной прочности, непригодность для моделирования динамических процессов [17]. Для задания модели необходимо 10 параметров грунтов, приведенных в табл. 1.

При задании начальных условий сгенерировано давление воды и начальные напряжения (рис. 9).

Расчеты заключались в определении вертикальных перемещений грунтового основания от массы надфундаментной части. Моделирование процесса нагружения опоры осуществлялось с помощью опции расчета *Staged construction*. Эта опция позволяет активировать или деактивировать вес, жесткость и прочность выбранных компонентов конечноэлементной модели.

В основной модели определены два расчетных этапа, на первом этапе с нагрузкой 200, на второй – 100 кН/м/м. В восьми клонах от основной модели выполнено изменение прочности материала фундамента от 16 до 80 МПа. Ниже представлены некоторые примеры выходных данных расчета, деформированная сетка конечных элементов модели (рис. 10) и вертикальные перемещения грунтового массива (рис. 11) на разных этапах.

### Результаты исследований и их обсуждение

Моделирование проводилось с целью оценки изменения напряженно-деформированного состояния грунтового массива в ходе эксплуатации сооружения и прогноза его изменения при реконструкции виадука. Так как в ходе полевых работ установлено, что прочность бутобетона конструкций фундаментов составляет 16–24 МПа, поэтому она была выбрана основным параметром для варьирования (табл. 3) в расчетах.

Проверка результатов моделирования проводилась путем сравнения расчетных данных с пространственно-координатным положением конструкций, установленным при лазерном сканировании (рис. 12). Значения вертикальных перемещений, предсказанные в ходе упруго-пластического моделирования показывают небольшое отклонение от данных полевых работ. Тот факт, что реальное значение меньше расчетного, можно объяснить переуплотнением грунтового массива в ходе его формирования. Как было установлено в работах [18–22], степень переуплотнения грунтовых массивов ( $K_0$ -OCR) необходимо учитывать при проектировании грунтовых оснований. Для предвари-

Таблица 2. Результаты моделирования

Table 2. Results of simulation

Прочность бетона, МПа Stiffness modulus of concrete, mPa	Факт/Measured	Расчетные значения/FE predictions								
	16,4	16,4	18,4	19,3	20,6	21,7	24	24,4	50	80
Вертикальные перемещения, мм Vertical displacement, mm	43	48,6	44,2	42,4	40,4	38,6	35,8	35,3	22,1	16,3

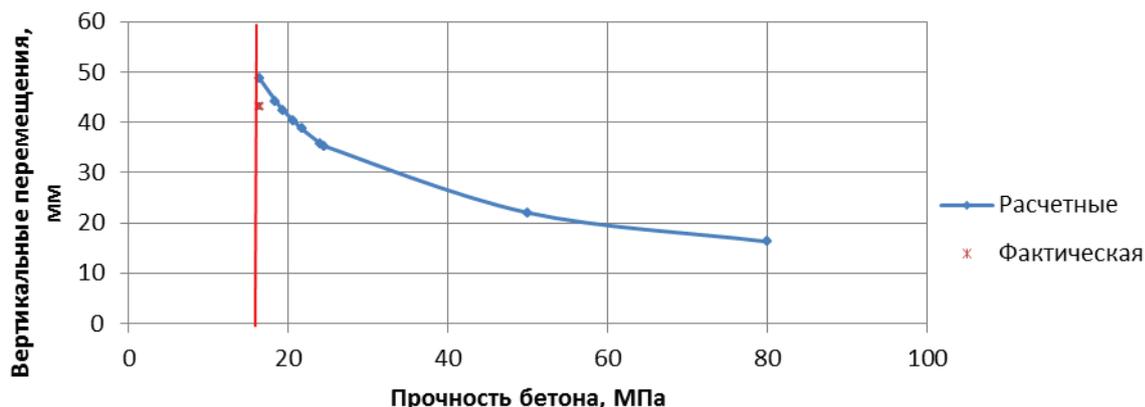


Рис. 12. Сравнение измеренных и расчетных значений вертикальных перемещений

Fig. 12. Comparison of measured vertical displacement with FE predictions

тельной оценки напряженно-деформированного состояния грунтового массива допустимо использовать эмпирические формулы определения  $K_0$ , для стадии рабочей документации следует выполнять специальные лабораторные и полевые исследования.

Кроме того, учитывая факт трудности определения основных параметров механических свойств крупнообломочных грунтов и вынужденного их назначения по литературным данным, этот прогноз можно считать приемлемым для предварительных проектных решений.

#### Выводы

На основании обобщения региональных геологических данных и анализа результатов камеральной обработки материалов полевых и лабораторных исследований, можно сделать вывод, что участок работ относится к III (сложной) категории сложности инженерно-геологических условий.

Применение наземных лазерно-сканирующих систем дало возможность произвести тотальную

съемку объекта и окружающего рельефа с высокой степенью плотности съёмочных точек, построены векторные обмерные чертежи, разрезы путем преобразования трехмерной модели в двумерные чертежи, создан топографический план 500 масштаба моста и прилегающей территории, выявлены отклонения конструкций от проектного положения.

Разработана цифровая модель грунтового основания самой деформируемой опоры сооружения. Поведение грунтового массива смоделировано с помощью упруго-пластической модели с изотропным упрочнением *PLAXIS Hardening Soil*. Рассчитаны деформации грунтового основания от массы опоры. Обеспечение достаточной точности расчетов связано с необходимостью проведения полноценных лабораторных и полевых исследований для определения механических свойств грунтов. Показано преимущество комплексирования методов по оценке геометрии объекта и МКЭ для описания напряженно-деформированного состояния объекта.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ценюга И.Н. «Трасса мужества» (Строительство трассы Абакан–Тайшет) // Железнодорожник: история российских железных дорог. – 2010–2014. URL: [jелезнодорожник.рф/istoricheskaja\\_spravka/trassa\\_muzhestva.html](http://jелезнодорожник.рф/istoricheskaja_spravka/trassa_muzhestva.html) (дата обращения 02.04.2017).
2. Пасечник Е. Половина пути пройдена // Гудок. – 2015. – № 187 (26089). – С. 3.
3. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Изд. второе. Минусинская серия. Масштаб 1:200000. – ОАО «Красноярскгеолсъемка», 2007. – С. 1.
4. Технический отчет об инженерно-геологических изысканиях грунтов основания моста на 598 км по объекту «Комплексное развитие участка Междуреченск–Тайшет Красноярской железной дороги. Строительство вторых путей на перегоне Джебь–Щетинкино» / НИЛ «Геология, основания, фундаменты и земляное полотно» СГУПС. – Новосибирск, 2011. – 25 с.
5. Пусков В.И., Караулов А.М., Королев К.В. Основания и фундаменты мостовых опор. – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2016. – 66 с.
6. The potential of terrestrial laser scanners for digital ground surveys / D.D. Lichti, J. Franke, W. Cannel, K.D. Wheeler // J. Spat. Sci. – 2005. – V. 50. – № 1. – С. 75–89.
7. Рылский И.А., Малеванная М.С. Наземные лазерные методы – новые подходы к информационному обеспечению географических исследований // Геодезия и картография. – 2014. – № 8. – С. 38–48.
8. Селезнева Е.В. Применение лазерного сканирования в геоморфологических исследованиях // Вестн. МГУ. Сер. 5. – 2013. – № 2. – С. 47–53.
9. Assessing modern ground survey methods and airborne laser scanning for digital terrain modelling: A case study from the Lake District, England / M. Gallay, Ch.D. Lloyd, J. McKinley, L. Barry // Comput. and Geosci. – 2013. – V. 51. – P. 216–227.
10. Geotechnical properties of gullying in Tomsk Oblast / A.V. Leonova, K.M. Lomakina, S.A. Dmitrieva, A.V. Baranova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – № 43. – 6 p.
11. Leonova A.V., Khabibullin R.R., Baranova A.V. Geotechnical conditions contributing to negative geological process develop-

- ment in urban areas (the case of Kemerovo-city) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – № 33. – 6 p.
12. Brakorenko N.N. Impact of oil on groundwater chemical composition // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – V. 27. – 6 p.
13. Комиссаров А.В., Широкова Т.А., Комиссаров Д.В. Общий подход к изучению погрешностей наземной лазерной съемки, вызванных метрологическими свойствами объектов // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 1. – С. 36–42.
14. Terrestrial Laser Scanning Technology for Deformation Monitoring and Surface Modeling of Arch Structures / H. Yang, M. Omidalizargandi, X. Xu, I. Ingo Neumann // Composite Structures. – 2016. – P. 93–105.
15. Use of Terrestrial Laser Scanning Technology for Long Term High Precision Deformation Monitoring / R. Vezocnik, T. Ambrožič, O. Sterle, G. Bilban, N. Pfeifer, B. Stopar // Sensors. – 2009. – № 9. – P. 9873–9895.
16. Применение наземного лазерного сканирования и трехмерного информационного моделирования для неразрушающего контроля / А.Н. Яковлев, Е.В. Токмаков, О.В. Павлов, В.Г. Ли, А.Н. Искрин, Т.Г. Коржнева // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 12. – Ч. 2. – С. 72–75.
17. Plaxis. Material Models Manual. – 2016. – 216 p.
18. Knudsen B.S. Comparison of 2D and 3D FEM Calculations, Strengthening of the Little Belt Bridge of 1935 in Denmark // Proc. 23rd European Young Geotechnical Engineers Conference, Barcelona 2–5 September 2014 / Eds. M. Arroyo, A. Gens. – Barcelona: Universitat Politecnica de Catalunya, 2014. – P. 77–80.
19. Karst hazard assessment in the design of the main gas pipeline (South Yakutia) / L.A. Strokova, E.M. Dutova, A.V. Ermolaeva, I.N. Alimova, A.B. Strelnikova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – № 27. – 6 p.
20. Strokova L.A., Teterin E. A. Identification, diagnosis and ranking of risks of geohazard in pipeline and urbanized territories // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – № 43. – 6 p.
21. Strokova L.A., Ermolaeva A.V., Golubeva V.V. The Investigation of Dangerous Geological Processes Resulting in Land Subsidence while Designing the Main Gas Pipeline in South Yakutia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – № 43. – 6 p.
22. Purgina D.V., Strokova L.A., Kuzevanov K.I. Modeling of changing hydrogeological conditions during construction of pier foundations on the Kama river bank // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – № 33. – 6 p.

*Поступила 05.04.2017 г.*

#### **Информация об авторах**

**Строкова Л.А.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Епифанова Е.А.**, аспирант кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Коржнева Т.Г.**, ассистент кафедры лазерной и световой техники Института физики высокой технологии Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 624.131

## NUMERICAL ANALYSIS OF BRIDGE FOUNDATION BEHAVIOUR ON THE OLD RAILWAY LINE

Lyudmila A. Strokova<sup>1</sup>,

sla@tpu.ru

Ekaterina A. Epifanova<sup>1</sup>,

epifanova@tpu.ru

Tatiana G. Korzhneva<sup>1</sup>,

korzhneva@tpu.ru

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The topic is relevant due to the necessity to improve approaches to estimation and prediction of deformations of structures operating in harsh natural conditions. The article deals with the study of engineering-geological conditions of the area during reconstruction of the viaduct. It is necessary to introduce new technologies, such as laser scanning technology for constructing the accurate three-dimensional model of the object, finite element method for prediction of soil behaviour.

**The aim** of the study is to prove the effectiveness of the method of terrestrial laser scanning over traditional tacheometry.

**Research methodology.** The initial data for simulating the behaviour of the soil massif were obtained through regional geological works and field study in 2011-2012. In the course of the work 11 wells were drilled, 9 holes were trenched, more than 50 samples were selected. A reconnaissance survey of the site was completed. A program complex on the basis of FEM is used to forecast the stress-strain state of soil massif. Laser scanning technology is used for evaluating deformations and construction of accurate three-dimensional model of the object. The terrestrial laser scanning of the object was held by 3D laser scanner Leica Scanstation C10; horizontal, vertical justification and binding study points to a local coordinate system were carried out using Total Station LEICA TS15 and GNSS receiver LEICA GS10; handling cloud of points was held in the software package Leica Cyclone 8.0; three-dimensional object modeling was carried out in the software package SolidWorks.

**The results.** Engineering geological conditions of the research site are studied in detail. A digital design model is developed. The forecast of stress-strain state of the soil massif in reconstruction of the viaduct is made.

### Key words:

Soil, laser scanning, modeling, deformation, mechanical behavior, finite element method.

### REFERENCES

1. Tsenyuga I.N. «Trassa muzhestva» (stroitelstvo trassy Abakan–Tayshet) [Trail of courage (construction of the railway Abakan–Tayshet)]. Available at: [железнодорожник.рф/istoricheskaja\\_spravka/trassa\\_muzhestva.html](http://железнодорожник.рф/istoricheskaja_spravka/trassa_muzhestva.html) (accessed 2 April 2017).
2. Pasechnik E. Polovina puti proydena [Half of the way is passed]. *Gudok*, 2015, no. 187 (26089), p. 3.
3. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Minusinskaya seriya. Masshtab 1:200000 [State geological map of the Russian Federation. Minusinsk series. Scale 1:200000]. OAO «Krasnojarskgeolsemka», 2007, p. 1.
4. Tehnicheskyy otchet ob inzhenerno-geologicheskikh izyskaniyakh gruntov osnovaniya po obektu. Kompleksnoe razvitie uchastka Mezhdurechensk–Tayshet Krasnoyarskoy zheleznoy dorogi. Stroitelstvo vtorykh putey na peregone Dzheb–Shchetinkino [Technical report on geological engineering survey of soil foundation of bridge. The project «Integrated development of the plot Mezhdurechensk–Tayshet section of the Krasnoyarsk railway. The construction of the second track on the stretch Dzheb–Shchetinkino»]. *NIL «Geologiya, osnovaniya, fundamenty i zemlyanoe polotno»* [Geology, foundation and subgrade]. Novosibirsk, 2011, 25 p.
5. Puskov V.I., Karaulov A.M., Korolev V.K. *Osnovaniya i fundamenty mostovykh opor* [Foundations of bridge piers]. Novosibirsk, SGUPS Publ. house, 2016, 66 p.
6. Lichti D.D., Franke J., Cannel W., Wheeler K.D. The potential of terrestrial laser scanners for digital ground surveys. *J. Spat. Sci.*, 2005, vol. 50, no. 1, pp. 75–89.
7. Rylsky I.A., Malevannaya M.S. Nazemnye lazernye metody – novyye podkhody k informatsionnomu obespecheniyu geograficheskikh issledovaniy [Terrestrial laser methods are the new approaches to information support of geographical research]. *Geodeziya i kartografiya*, 2014, vol. 8, pp. 38–48.
8. Selezneva E.V. Primenenie lazernogo skanirovaniya v geomorfologicheskikh issledovaniyakh [Application of laser scanning in geomorphologic studies]. *MSU Vestnik. Series 5*, 2013, vol. 2, pp. 47–53.
9. Gally M., Lloyd Ch.D., McKinley J., Barry L. Assessing modern ground survey methods and airborne laser scanning for digital terrain modelling: a case study from the Lake District, England. *Comput. and Geosci.*, 2013, vol. 51, pp. 216–227.
10. Leonova A.V., Lomakina K.M., Dmitrieva S.A., Baranova A.V. Geotechnical properties of gullying in Tomsk Oblast. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43, 012037.
11. Leonova A.V., Khabibullin R.R., Baranova A.V. Geotechnical conditions contributing to negative geological process development in urban areas (the case of Kemerovo-city). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 33, 012043.
12. Brakorenko N.N. Impact of oil on groundwater chemical composition. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 27, 6 p.
13. Komissarov A.V., Shirokova T.A., Komissarov D.V. Obshchy podkhod k izucheniyu pogreshnostey nazemnoy lazernoy semki, vyzvannykh metrologicheskimi svoystvami obektov [General approach to the study of errors of terrestrial laser shooting caused by metrological properties of objects]. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotosemka*, 2013, no. 1, pp. 36–42.
14. Yang H., Omidalizarandi M., Xu X., Ingo Neumann I. Terrestrial Laser Scanning Technology for Deformation Monitoring and Surface Modeling of Arch Structures. *Composite Structures*, 2016, vol. 149, pp. 93–105.

15. Vezočnik R., Ambrožič T., Sterle O., Bilban G., Pfeifer N., Stopar B. Use of Terrestrial Laser Scanning Technology for Long Term High Precision Deformation Monitoring. *Sensors*, 2009, no. 9, pp. 9873–9895.
16. Yakovlev A.N., Tokmakov E.V., Pavlov O.V., Li V.G., Iskrin A.N., Korzhneva T.G. Primenenie nazemnogo lazernogo skanirovaniya i trekhmernogo informatsionnogo modelirovaniya dlya nerazrushayushchego kontrolya [Application of terrestrial laser scanning and three-dimensional information modeling for non-destructive testing]. *Izvestiya vuzov. Fizika*, 2013, vol. 56, no. 12 (2), pp. 72–75.
17. *Plaxis. Material Models Manual*. 2016. 216 p.
18. Knudsen B.S. Comparison of 2D and 3D FEM Calculations, Strengthening of the Little Belt Bridge of 1935 in Denmark. *Proc. 23<sup>rd</sup> European Young Geotechnical Engineers Conference*. Barcelona 2–5 September 2014. pp.77–80
19. Strokova L.A., Dutova E.M., Ermolaeva A.V., Alimova I.N., Strelnikova A.B. Karst hazard assessment in the design of the main gas pipeline (South Yakutia). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 27, 6 p.
20. Strokova L.A., Teterin E.A. Identification, diagnosis and ranking of risks of geohazard in pipeline and urbanized territories. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43, 6 p.
21. Strokova L.A., Ermolaeva A.V., Golubeva V.V. The Investigation of Dangerous Geological Processes Resulting in Land Subsidence while Designing the Main Gas Pipeline in South Yakutia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43, 6 p.
22. Purgina D.V., Strokova L.A., Kuzevanov K.I. Modeling of changing hydrogeological conditions during construction of pier foundations on the Kama river bank. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 33, 6 p.

Received: 5 April 2017.

#### Information about the authors

**Lyudmila A. Strokova**, Dr. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University.

**Ekaterina A. Epifanova**, postgraduate student National Research Tomsk Polytechnic University.

**Tatiana G. Korzhneva**, assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.