УДК 621.182.002(571.16)(092)

ВКЛАД НАУЧНОЙ ШКОЛЫ АКАДЕМИКА В.Е. НАКОРЯКОВА В ТЕПЛОФИЗИКУ И ТЕПЛОТЕХНИКУ

Заворин Александр Сергеевич,

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой парогенераторостроения и парогенераторных установок Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30, E-mail: zavorin@tpu.ru

Кузнецов Гений Владимирович,

д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и промышленной теплотехники Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30, E-mail: marisha@tpu.ru

Актуальность работы связана с 80-летием со дня рождения академика Владимира Елиферьевича Накорякова и определяется его ролью в развитии фундаментальных основ теплофизику, теоретической теплотехники и их инженерных приложений в различных отраслях промышленности.

Цель работы: провести систематизацию наиболее значимых работ и публикаций В.Е. Накорякова и его сотрудников по основным направлениям исследований, выделить главные результаты, полученные им совместно с учениками, показать их значение для науки.

Результаты. Составлен обзор научных достижений академика В.Е. Накорякова и созданной им научной школы в области теплофизику и теплотехники. Показано значение работ в области нестационарного теплообмена. Впервые им получены расчетные зависимости для тел классической формы при теплообмене в звуковом поле в условиях свободной конвекции и вынужденного течения, для горения капли в звуковом поле камер сгорания. На основе экспериментальных результатов даны теоретические объяснения ряда теплофизических эффектов в камерах сгорания, показана их связь с локальной концентрацией тепловых потоков, что позволило повысить надежность реактивных двигателей. Внесен весомый вклад в экспериментальную термодинамику многофазных систем. Разработана теория электродиффузионного метода диагностики однофазных и многофазных сред. Осуществлена экспериментальная реализация метода, которая позволила решить широкий класс задач гидродинамики и массообмена двухфазных течений, впервые провести измерения профиля скорости жидкой фазы и газосодержания, измерить турбулентные характеристики газожидкостных потоков. Исследования процессов в двухфазных средах привели к созданию теории волновой динамики газожидкостных систем.

Выводы. В качестве заключения приведены сведения о признании заслуг В.Е. Накорякова научной общественностью, академическими и общественными сферами.

Ключевые слова:

Научная школа, теплофизика, теплотехника, тепломассообмен, эксперимент, методы измерения, двухфазный поток.

Введение. Академик Накоряков В.Е. – основатель научной школы

Путь в науку Владимира Елиферьевича Накорякова начинался после окончания в 1958 г. теплоэнергетического факультета Томского политехнического института. В студенческие годы среди его учителей были профессора: И.Н. Бутаков – основатель теплотехнической научной школы в Сибири, Г.И. Фукс – создатель метода эксергетического анализа процессов в энергетических установках, И.К. Лебедев – организатор сибирской научно-образовательной школы котлоостроения. Сформировался как ученый В.Е. Накоряков в Институте теплофизику Сибирского отделения Академии наук СССР под руководством академика С.С. Кутателадзе, где в короткий срок прошел этапы роста от молодого научного сотрудника до доктора наук, заведующего отделом, заместителя директора института.

Широчайший круг научных интересов, глубокая эрудиция, новаторские подходы к исследованию решаемых проблем принесли Владимиру Елиферьевичу известность и признание научного сообщества как ученого и крупного организатора в нау-

ке. В начале восьмидесятых годов прошлого века он был избран членом-корреспондентом, а в 1986 г. стал действительным членом АН СССР и директором академического Института теплофизику имени С.С. Кутателадзе.

Много внимания и энергии В.Е. Накоряков уделяет работе по подготовке научных кадров. В период с 1983 по 1985 гг. он ректор Новосибирского государственного университета, затем заместитель председателя Сибирского отделения РАН. Он организовал кафедру тепловых электрических станций в Новосибирском государственном техническом университете, содействовал созданию в Томском политехническом университете кафедры водородной энергетики и является ее действующим профессором.

Одним из впечатляющих результатов многогранной деятельности академика А.Е. Накорякова является создание научной школы – среди его учеников более 50 докторов наук и 250 кандидатов наук. Совместно с ними получен ряд фундаментальных результатов, имеющих огромное значение для развития не только технологий энергетики, но и многих других отраслей техники.

Общая теория горения пленок и капель жидкости, частиц угля в звуковом поле [1–3, 5 и др.]

Еще в кандидатской диссертации «Тепломассообмен в звуковом поле» В.Е. Накоряков впервые получил результаты, ставшие развитием работ Дж. Рэлея «Теория звука» и Г. Шлихтинга «Теория пограничного слоя» по вторичным акустическим течениям. Впоследствии на этой основе им была построена общая теория горения пленок и капель жидкости, частиц угля в звуковом поле. По этому научному направлению опубликованы монографии «Кинетика горения ископаемых топлив», (Новосибирск, 1963); «Тепло- и массообмен в звуковом поле» (Новосибирск, 1970).

Результаты исследования влияния стоячей звуковой волны на теплообмен при вынужденном течении защищены в докторской диссертации «Тепломассообмен в осциллирующих и пульсирующих потоках». Основные теоретические следствия, полученные по этому научному направлению, использовались при анализе режимов работы двигателей при вибрационных режимах горения. Разработана теория горения пористого углерода при вынужденном обтекании, учитывающая внутрислойное горение. Этот цикл исследований был продолжением начатых в работах Д.А. Франк-Каменецкого, Я.Б. Зельдовича, В.А. Шваба, Б. Сполдинга фундаментальных исследований.

Методы измерения скорости и трения в однофазных и двухфазных потоках [2–4, 6–17, 20–31 и др.]

По результатам анализа и обобщения большого цикла исследований В.Е. Накоряков разработал метод измерения скорости и трения в однофазных и двухфазных потоках. Практически одновременно с Т. Ханратти, который впервые показал возможность измерения трения и пульсаций трения в квазистационарных режимах, им была построена теория измерения напряжений трения и спектра этой величины вплоть до частот 1000–1500 Гц. Выполнена серия экспериментов, подтвердивших большие возможности этого метода. Также в этот период времени разработан метод измерения скорости с использованием игольчатых датчиков диаметром до 50 мкм.

Впервые этот метод использовался для детального исследования турбулентных характеристик однофазных и газожидкостных потоков. Он успешно применяется с 1968 г. и до настоящего времени в ряде лабораторий мира, особенно в Сибирском отделении РАН, а также в нескольких лабораториях во Франции (Лион, Гренобль).

Исследование структуры циркуляционных течений [7, 17–19, 27 и др.]

Большой цикл работ выполнен под руководством В.Е. Накорякова по исследованию структуры однофазных циркуляционных течений.

Проведено математическое моделирование процессов переноса отрывных течений в турбулентной области смещения. Исследовалось течение в пря-

моугольных траншеях. Построена теория тепло-массообмена в траншеях на основе использования теоремы Сквайера. Метод, который используются в настоящее время, расширен на разработку теории тепло- и массообмена в трубах и каналах с регулярной шероховатостью. Обнаружены вихри Гертлера в траншеях прямоугольной формы, оказывающие существенное влияние на процессы переноса. Такой подход в обобщенном виде использовался для анализа процессов тепло-массообмена в зернистых упаковках при движении через них жидкости. Разработана теория тепло-массообмена при течении жидкости в каналах, заполненных шарами. К этому циклу работ примыкают исследования течений Хил-Шоу с обтеканием цилиндра при больших скоростях и струйных течений с образованием замкнутых циркуляционных зон. Основанный на этом подход применен для анализа русловых речных потоков при турбулентных течениях.

В экспериментальных исследованиях использовались электрохимический и лазер-доплеровский методы измерения. По результатам экспериментов выделены новые физические явления, названные квазитурбулентными. Данному циклу исследований посвящено более 20 работ.

Теоретические и экспериментальные исследования двухфазных потоков [4, 7, 8, 10, 13, 16, 20–43 и др.]

Возможно, наибольшее внимание в своих исследованиях В.Е. Накоряков уделял двухфазным потокам. Самым детальным образом им изучен вертикальный пузырьково-снарядный режим течения газожидкостной смеси с использованием электрохимического метода. Исследовались подъемные и опускающие течения. Обнаружены особенности в спектрах турбулентных пульсаций, взаимных корреляций, радикально отличающихся от этих характеристик в однофазных потоках. Изучено трение и пульсация трения на стенках. Такой же цикл работ выполнен для горизонтальных двухфазных потоков.

Эти экспериментальные и теоретические исследования проводились параллельно с работами профессора Г. Хьюита (Англия) и Жан-Марка де Лои (Франция).

Созданные при этом модели и методы решения задач крайне важны для обеспечения надежного функционирования каналов ядерных реакторов. В последнее время их роль возрастает в связи с переходом на мини- и микроканалы в теплоэнергетике, водородной энергетике, радиоэлектронике и ряде химических технологий. Этому направлению исследований посвящено около 100 работ и 3 монографии В.Е. Накорякова.

Исследования пленочных течений [3, 9 и др.]

Ряд фундаментальных результатов получены при исследовании пленочных течений жидкостей.

В 1944 г. академик П.Л. Капица выполнил основополагающую работу по волновому стеканию пленки по вертикальной стене. Им получено ура-

вление движения пленки и проведены базовые экспериментальные исследования. В работах В.Е. Накорякова и соавторов показано, что результаты экспериментов П.Л. Капицы описываются эволюционными уравнениями с решениями в виде уединенных волн, переходящих в трехмерные.

Выполнен большой цикл экспериментальных и теоретических работ как по гидродинамике, так и по тепломассообмену пленочных течений. Опубликовано более 100 статей по этой тематике. Учениками В.Е. Накорякова по проблеме теплопереноса в движущихся пленках защищено более 15 докторских диссертаций, опубликовано около 100 статей и монография «Волновая динамика в газо- и парожидкостной среде» (на русском и английском языках), переиздаваемая до настоящего времени. Полученные для такого течения решения активно использовались затем в работах Т. Бенжамина, С. Лина, А. Даклера, В.Я. Шкадова, Т. Ханратти, Г. Бэнкова. В их работах показана возможность использования теории пленочных течений при создании конденсаторов электростанций, градирен, дистилляционных и ректификационных колонн и других технических систем.

Теоретические и экспериментальные исследования ударно-волновых процессов в газожидкостных средах [11, 14, 15, 23, 26, 28–34, 36, 37, 42, 44–50, 52–54 и др.]

Многие годы В.Е. Накоряков посвятил решению задач нелинейной акустики и ударных волн в газожидкостных средах.

Им впервые показано, что нелинейные волновые процессы в пузырьковых системах описываются уравнениями Картевьёга-де Вриза-Бюргерса. Проведен подробный численный анализ на основе этих уравнений. Выполнен комплекс экспериментальных исследований по эволюции слабых ударных волн в такой среде.

С использованием разработанной теории он описал появление системы солитонов волновых пакетов. Созданный математический аппарат оказался прекрасной средой для моделирования процессов с дисперсией и диссипацией. Работа выполнялась параллельно с исследованиями профессоров Л. Вингардена, С.В. Иорданского и В.К. Кедринского. Впервые в мире были получены уравнения такого типа для сред с фазовыми переходами. Проведены эксперименты по распространению ударных волн в жидкости, находящейся при температуре насыщения с пузырьками пара. Важность этих работ по волновым процессам с фазовыми переходами и растворением газа начала осознаваться только в последнее время. К этому циклу относятся исследования, выполненные вместе с академиками Я.Б. Зельдовичем, С.С. Кутателадзе, И.И. Новиковым и братьями Анатолием и Александром Борисовыми по обнаружению ударных волн разрежения вблизи критической точки. Проведен уникальный эксперимент по подтверждению реального существования ударных волн раз-

режения. Зарегистрировано открытие за № 321. Результаты опубликованы в монографии «Волновая динамика в газо- и парожидкостной среде», которая неоднократно переиздавалась в России и США.

Результаты этих исследований использовались при расчетах газожидкостных сопел двигателей и подводных звуковых каналов. В последнее время основное внимание автора теории было сосредоточено на исследовании волновых процессов в пористых средах с пузырьками газа. Эти исследования имеют принципиально важное значение для геофизики поиска нефти в условиях сильного искажения сигнала при наличии газовых пузырьков или фазовых переходов.

Рассматривая основные приложения этих результатов В.Е. Накорякова, можно также отметить, что в энергетике при уменьшении размеров парогенераторов и соответствующем уменьшении размеров каналов конструкторы идут на увеличение скорости потока, что приводит к проявлению эффекта сжимаемости. Во многих случаях расчет циркуляции становится невозможным без анализа волновых явлений неустойчивости. Возникает необходимость построения теории тепломассообмена в сжимаемых средах с дисперсией диссипации в энергетических установках всех типов. Важность исследований в этой области возросла в последнее время многократно. Одним из их частных результатов стала возможность получения газогидратов натурального газа на основе ударно-волнового воздействия. Полученный результат будет иметь громадное применение в ближайшем будущем при транспорте натурального газа.

Физические и теоретические основы водородной энергетики [51, 55–60 и др.]

Водородной энергетике посвящены работы В.Е. Накорякова последних нескольких лет. Им построена теория топливного элемента на протонной мембране, где учтены диффузионные процессы и влияние стефановского потока на тепломассообмен в пористой среде на основе подхода Б. Сполдинга и Я.Б. Зельдовича. Эти работы интенсивно развиваются, создается водородный генератор по схеме микроканалов, и выполняются экспериментальные исследования на топливных элементах с протонными мембранами. Получены патенты на новые типы топливных элементов.

В настоящие годы под руководством В.Е. Накорякова проведены экспериментальные исследования гидродинамических процессов, возникающих при инжектировании криогенной жидкости в воду. Актуальность задачи обусловлена возможностью использования результатов исследования для получения газогидратов, основанного на ударно-волновом способе. Инжектирование жидкого азота осуществлялось с использованием специально разработанного устройства. Установлено, что амплитуды развивающихся в таком процессе скачков давления находятся в диапазоне от 1,4 до 5,3 МПа, а

давление зависит от изменения различных условий инжестирования (температура рабочей среды, объем свободной поверхности и др.). Проведена визуализация процесса с помощью высокоскоростной видеосъемки. Полученные в ходе работы скачки давления могут оказаться достаточными для возможного образования газогидратов при применении жидкого азота в качестве инжеструемой криогенной жидкости.

Исследования теплообмена при интенсивном нагреве капель [58–60 и др.]

В последние годы под руководством В.Е. Накорякова выполнен большой цикл работ по разработкам методики измерения мгновенных скоростей десорбции капель и определения концентрации солей (LiBr, NaCl, CaCl₂) для нестационарных процессов в диапазоне массовой концентрации соли 0–0,6.

Изучен теплообмен капель в диапазоне 3–250 °С в интервале толщин стенки 1–40 мм и класса шероховатости стенки 6–12, а также при использовании материалов с различной теплопроводностью. Исследованы режимы кипения капли при неустойчивой контактной линии и быстром изменении площади смачивающей поверхности капли.

Исследован также кризис кипения капель воды в диапазоне диаметров капель 3–20 мм. Изучена неизотермическая десорбция водно-солевых растворов капель на нагретой стенке и в миканалах при наличии кризиса кипения. Также исследованы различные режимы кипения растворов со-

ли LiBr в миканалах с диаметром от 2 до 10 мм с целью определения наиболее интенсивного режима десорбции.

Проведены экспериментальные исследования капель водно-спиртовых смесей для определения перегрева стенки и концентрации компонентов смеси, при которых реализуется максимальный критический тепловой поток.

Установлены основные закономерности процессов диссоциации гидратов метана и «самоконсервации» при отрицательных температурах в широком диапазоне тепловых потоков 65–1300 Вт/м² и диаметров гранул 2–10 мм.

Признание заслуг

Накоряков В.Е. – лауреат ряда престижных премий и государственных наград. За исследования и их результаты в области волновой динамики двухфазных систем ему присуждена Государственная премия СССР, за цикл работ по нестационарным тепловым и гидродинамическим процессам в однофазных средах – Государственная премия РСФСР. Он отмечен премиями Правительства РФ, Премией имени академика Лыкова, является одним из первых лауреатов премии «Глобальная энергия», награжден высокими правительственными наградами: орденами «За заслуги перед Отечеством» IV степени, Трудового Красного Знамени, «Знак Почета», Орденом Дружбы и медалями.

Томский политехнический университет с признательностью отмечает вклад своего выпускника в развитие науки и образования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурдуков А.П., Накоряков В.Е. О переносе массы в звуковом поле // Прикладная механика и техническая физика. – 1965. – № 2. – С. 62–66.
2. Бурдуков А.П., Накоряков В.Е. Влияние колебаний на массоотдачу от сферы при больших числах Прандтля // Прикладная механика и техническая физика. – 1967. – № 3. – С. 158–160.
3. Накоряков В.Е., Шрейбер И.Р. Волны на поверхности тонкого слоя вязкой жидкости // Прикладная механика и техническая физика. – 1973. – № 2. – С. 109–113.
4. Накоряков В.Е., Борисов А.А. Распространение возмущений в среде с релаксацией или химической реакцией // Физика горения и взрыва. – 1976. – Т. 12. – № 3. – С. 414–422.
5. Бурдуков А.П., Валукина Н.В., Накоряков В.Е. Особенности течения газожидкостной пузырьковой смеси при малых числах Рейнольдса // Прикладная механика и техническая физика. – 1975. – № 4. – С. 137–141.
6. Propagation of perturbations in a gas-liquid mixture / V.V. Kuznetsov, V.E. Nakoryakov, G. Pokusaev, I.R. Shreiber // Journal of Fluid Mechanics. – 1978. – V. 85. – P. 85–96.
7. Nakoryakov V.E., Pokusaev B.G., Troyan E.N. Impingement of an axisymmetric liquid jet on a barrier // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1978. – V. 21. – P. 1175–1184.
8. Гасенко В.Г., Накоряков В.Е., Шрейбер И.Р. Нелинейные волны в жидкости с пузырьками газа // Акустический журнал. – 1979. – Т. 25. – № 5. – С. 681–685.
9. Алексеенко С.В., Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г. Волнообразование при тении пленки жидкости на вертикальной стенке // Прикладная механика и техническая физика. – 1979. – Т. 20. – № 6. – С. 77–87.
10. Гасенко В.Г., Накоряков В.Е., Шрейбер И.Р. Двухволновая модель распространения возмущений в жидкости с пузырьками газа // Прикладная механика и техническая физика. – 1979. – № 6. – С. 119–127.
11. Экспериментальное обнаружение ударной волны разрежения вблизи критической точки жидкость–пар / С.С. Кутателадзе, А.А. Борисов, А.А. Борисов, В.Е. Накоряков // Доклады Академии наук. – 1980. – Т. 252. – № 3. – С. 595–598.
12. Жак В.Д., Мухин В.А., Накоряков В.Е. Трехмерные вихревые структуры в кавернах // Прикладная механика и техническая физика. – 1981. – № 2. – С. 54–59.
13. Local characteristics of upward gas-liquid flows / V.E. Nakoryakov, O.N. Kashinsky, A.P. Burdukov, V.P. Odnorol // International Journal of Multiphase Flow. – 1981. – V. 7. – № 1. – P. 63–81.
14. Rarefaction shock wave near the critical liquid-vapor point / A.A. Borisov, Al.A. Borisov, S.S. Kutateladze, V.E. Nakoryakov // Journal of Fluid Mechanics. – 1983. – V. 126. – P. 59–73.
15. Донцов В.Е., Кузнецов В.В., Накоряков В.Е. Ударные волны умеренной интенсивности в двухфазной среде // Акустический журнал. – 1985. – № 2. – С. 193–196.
16. Конденсация пара на наклонной пластине, помещенной в пористую среду / В.А. Мухин, В.Е. Накоряков, П.Т. Петрик, Г.С. Сердаков // Прикладная механика и техническая физика. – 1985. – № 5. – С. 85–90.
17. Распространение затопленной струи в узкой щели / В.Д. Жак, В.А. Мухин, В.Е. Накоряков, С.А. Сафонов // Прикладная механика и техническая физика. – 1985. – № 3. – С. 69–77.
18. Nakoryakov V.E., Kashinsky O.N., Kozmenko B.K. Experimental study of gas-liquid slug flow in a small-diameter vertical

- pipe // *International Journal of Multiphase Flow*. – 1986. – V. 12. – № 3. – P. 337–355.
19. Эволюция волн давления умеренной интенсивности в жидкости с пузырьками газа / В.Е. Донцов, В.Е. Кузнецов, П.Г. Марков, В.Е. Накоряков // *Акустический журнал*. – 1987. – Т. 33. – № 6. – С. 1041–1044.
 20. Горелик Р.С., Кашинский О.Н., Накоряков В.Е. Исследование опускного пузырькового течения в вертикальной трубе // *Прикладная механика и техническая физика*. – 1987. – Т. 28. – № 1. – С. 69–73.
 21. Донцов В.Е., Кузнецов В.В., Накоряков В.Е. Распространение волн давления в пористой среде, насыщенной жидкостью // *Прикладная механика и техническая физика*. – 1988. – № 1. – С. 120–130.
 22. The wave dynamics of a vapour-liquid medium / V.E. Nakoryakov, V.G. Pokusaev, I.R. Shreiber, N.A. Pribaturin // *International Journal of Multiphase Flow*. – 1988. – V. 14. – № 6. – P. 655–677.
 23. Горелик Р.С., Кашинский О.Н., Накоряков В.Е. Теплообмен от стенки к восходящему пузырьковому течению при малых скоростях жидкой фазы // *Теплофизика высоких температур*. – 1989. – Т. 27. – № 2. – С. 300–305.
 24. Распространение волн давления в жидкости с пузырьками газа разных размеров / В.Е. Донцов, В.Е. Кузнецов, П.Г. Марков, В.Е. Накоряков // *Акустический журнал*. – 1989. – Т. 35. – № 1. – С. 157–159.
 25. Study of local hydrodynamic characteristics of upward slug flow / V.E. Nakoryakov, O.N. Kashinsky, A.V. Petukhov, R.S. Gorelik // *Experiments in Fluids*. – 1989. – V. 7. – № 8. – P. 560–566.
 26. Nakoryakov V.E., Kuznetsov V.V., Dontsov V.E. Pressure waves in saturated porous media // *International Journal of Multiphase Flow*. – 1989. – V. 15. – № 6. – P. 857–875.
 27. Pressure waves of moderate intensity in liquid with gas bubbles / V.E. Nakoryakov, V.V. Kuznetsov, V.E. Dontsov, P.G. Markov // *International Journal of Multiphase Flow*. – 1990. – V. 16. – № 5. – P. 741–749.
 28. Natural convection in a hele-shaw cell / S.S. Vorontsov, A.V. Gorin, V.Ye. Nakoryakov, A.G. Khoruzhenko, V.M. Chupin // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 1991. – V. 34. – № 3. – P. 703–709.
 29. Nakoryakov V.E., Kuznetsov V.V., Vitovsky O.V. Experimental investigation of upward gas-liquid flow in a vertical narrow annulus // *International Journal of Multiphase Flow*. – 1992. – V. 18. – № 3. – P. 313–326.
 30. Накоряков В.Е., Яичникова Н.Н. Ламинарная струя в «узкой» щели при больших числах Рейнольдса // *Прикладная механика и техническая физика*. – 1985. – № 5. – С. 30–35.
 31. Alekseenko S.V., Nakoryakov V.E., Pokusaev B.G. Wave formation on vertical falling liquid films // *International Journal of Multiphase Flow*. – 1985. – Т. 11. – № 5. – P. 607–627.
 32. Усиление амплитуды волн давления в парожидкостной среде пузырьковой структуры / В.Е. Накоряков, Е.С. Вассерман, Б.Г. Покусаев, Н.А. Прибатурин // *Теплофизика высоких температур*. – 1994. – Т. 32. – № 3. – С. 411–417.
 33. Nakoryakov V.E., Dontsov V.E., Pokusaev B.G. Pressure waves in liquid suspension with solid particles and gas bubbles // *Multiphase flow 1995: proceedings of the 2nd International conference on Multiphase Flow*. – Kyoto, Japan, April 3–7, 1995. – V. 1. – P. 11–17.
 34. Донцов В.Е., Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г. Волны давления в суспензии жидкости с твердыми частицами и газовыми пузырьками // *Прикладная механика и техническая физика*. – 1995. – № 1. – С. 32–40.
 35. Alekseenko S.V., Nakoryakov V.E. Instability of a liquid film moving under the effect of gravity and gas flow // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 1995. – V. 38. – № 11. – P. 2127–2134.
 36. Nakoryakov V.E., Dontsov V.E., Pokusaev B.G. Pressure waves in a liquid suspension with solid particles and gas bubbles // *International Journal of Multiphase Flow*. – 1996. – V. 22. – № 3. – P. 417–429.
 37. Alekseenko S.V., Nakoryakov V.E. Instability of a liquid film moving under the effect of gravity and gas flow // *International Journal of Multiphase Flow*. – 1996. – V. 22. – № S1. – P. 116–120.
 38. Накоряков В.Е., Кузнецов В.В. Капиллярные явления, тепло-массообмен и волновые процессы при двухфазном течении в пористых системах и засыпках // *Прикладная механика и техническая физика*. – 1997. – Т. 38. – № 4. – С. 155–166.
 39. In memoriam – Professor Michael Adol'fovich Styrikovich (1902–1995) / V.E. Nakoryakov, A.I. Leontiev, I.L. Mostinskiy, J.P. Hartnett // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 1997. – V. 40. – № 3. – P. 503–504.
 40. Alexander I. Leontiev on his 70th birthday / V.E. Nakoryakov, S.V. Alekseenko, N.V. Medvetskaya, I.L. Mostinski, M.I. Osipov, E.P. Volchkov, Ju.A., Zeigavnik J.P. Hartnett // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 1998. – V. 41. – № 1. – P. 1–2.
 41. Естественная конвекция от цилиндра в узкой щели и пористой среде / А.В. Горин, А.Ю. Егоров, В.Е. Накоряков, В.М. Чупин // *Прикладная механика и техническая физика*. – 1999. – Т. 40. – № 1. – P. 140–150.
 42. Донцов В.Е., Накоряков В.Е. Распространение ударных волн в пористой среде, насыщенной жидкостью с пузырьками растворимого газа // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2000. – Т. 41. – № 5 (243). – С. 91–102.
 43. Григорьева Н.И., Накоряков В.Е. Моделирование тепло- и массопереноса при абсорбции в бинарных двухфазных системах, используемых в тепловых насосах // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2001. – Т. 42. – № 1 (245). – С. 115–123.
 44. Dontsov V.E., Nakoryakov V.E. Enhancement of shock waves in a porous medium saturated with a liquid containing soluble-gas bubbles // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2001. – V. 27. – № 12. – P. 2023–2041.
 45. Dontsov V.E., Nakoryakov V.E. Pressure-wave damping in a liquid with bubbles produced by two kinds of gases // *Doklady Physics*. – 2002. – V. 47. – № 2. – P. 153–155.
 46. Донцов В.Е., Накоряков В.Е. Эволюция волн давления в жидкости с пузырьками двух разных газов // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2002. – Т. 43. – № 2 (252). – С. 110–115.
 47. Донцов В.Е., Накоряков В.Е. Волны давления в газожидкостной среде с расслоенной структурой жидкость – пузырьковая смесь // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2003. – Т. 44. – № 4 (260). – С. 102–108.
 48. Теплоперенос при абсорбции пара неподвижным слоем раствора / В.Е. Накоряков, Н.С. Буфетов, Н.И. Григорьева, Р.А. Дехтярь // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2003. – Т. 44. – № 2 (258). – С. 101–108.
 49. Накоряков В.Е., Буфетов Н.С., Дехтярь Р.А. Экспериментальное исследование влияния малых добавок пав на неизотермическую абсорбцию // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2004. – Т. 45. – № 2 (264). – С. 156–161.
 50. Vapor absorption by immobile solution layer / V.E. Nakoryakov, N.S. Bufetov, N.I. Grigoryeva, R.A. Dekhtyar, I.V. Marchuk // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2004. – V. 47. – № 6–7. – P. 1525–1533.
 51. The effect of surfactants on absorption under conditions of heat pumps and refrigerators / V.E. Nakoryakov, N.S. Bufetov, N.I. Grigoryeva, R.A. Dekhtyar // *International Journal of Low Carbon Technologies*. – 2006. – V. 1. – № 3. – P. 273–284.
 52. Донцов В.Е., Накоряков В.Е., Чернов А.А. Ударные волны в воде с пузырьками фреона-12 с образованием гидрата газа // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2007. – Т. 48. – № 3 (283). – С. 58–75.

53. Heat and mass transfer intensification at steam absorption by surfactant additives / V.E. Nakoryakov, N.I. Grigoryeva, N.S. Bufetov, R.A. Dekhtyar // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2008. – V. 51. – № 21–22. – P. 5175–5181.
54. Накоряков В.Е., Гасенко В.Г. Математическая модель катодного узла топливного элемента с твердым электролитом // Прикладная механика и техническая физика. – 2005. – Т. 46. – № 5 (273). – С. 27–37.
55. Донцов В.Е., Накоряков В.Е., Донцов Е.В. Процессы гидратообразования и растворения за ударной волной в жидкости с пузырьками газа (смесь азота и углекислого газа) // Прикладная механика и техническая физика. – 2009. – Т. 50. – № 2 (294). – С. 178–187.
56. Nakoryakov V.E., Grigoryeva N.I., Bartashevich M.V. Heat and mass transfer in the entrance region of the falling film: absorption, desorption, condensation and evaporation // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2011. – V. 54. – № 21–22. – P. 4485–4490.
57. Nakoryakov V.E., Misyura S.Ya., Elistratov S.L. The behavior of water droplets on the heated surface // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2012. – V. 55. – № 23–24. – P. 6609–6617.
58. Nakoryakov V.E., Bartashevich M.V., Ostapenko V.V. Heat and mass transfer in the liquid film on a vertical wall in roll-wave regime // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2012. – V. 55. – № 23–24. – P. 6514–6518.
59. Lezhnin S.I., Nakoryakov V.E. Growth of vapor bubbles from the solution with one volatile component at surface desorption // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2012. – V. 55. – № 5–6. – P. 1433–1440.
60. Экспериментальные исследования процесса инжекции жидкого азота в воду / В.Е. Накоряков, А.Н. Цой, И.В. Мезенцев, А.В. Мелешкин // Теплофизика и аэромеханика. – 2014. – Т. 21. – № 3. – С. 293–298.

Поступила 24.06.2015 г.

UDC 621.182.002(571.16)(092)

CONTRIBUTION OF THE SCIENTIFIC SCHOOL OF ACADEMICIAN V.E. NAKORYAKOV IN THERMOPHYSICS AND HEAT ENGINEERING

Alexander S. Zavorin,

Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

E-mail: zavorin@tpu.ru

Geniy V. Kuznetsov,

Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

E-mail: marisha@tpu.ru

Relevance of the work is related to the 80th anniversary of the birth of Academician Vladimir El. Nakoryakov. The relevance is defined as well by his role in development of fundamentals of thermal physics, theoretical heat engineering and engineering applications in various industries.

The aim of the work is to systematize the most significant works of Vladimir El. Nakoryakov and his colleagues in the main areas of research, to identify the main results obtained by him together with his disciples, to show their importance for science.

Results. The authors have made a review of scientific achievements of Academician Vladimir El. Nakoryakov and scientific school in the field of thermal physics and heat engineering established by him. The paper demonstrates the importance of the works in the field of unsteady heat transfer. For the first time he obtained the rated dependences for bodies with classical form at heat transfer in the audio field in the conditions of free convection and forced flow, for burning a drop in the sound field under free convection and forced flow for drop combustion in the sound field of combustion chambers. Based on the experimental results the theoretical explanations of a number of thermal effects in the combustion chambers was give, their relation to the local concentration of heat flows was shown, thus improving the reliability of jet engines. Vladimir El. Nakoryakov contributed significantly to the experimental thermodynamics of multiphase systems and developed the theory of electrodiffusion diagnostic method of single-phase and multiphase fluids. The method was experimentally implemented that allowed solving a wide class of problems of hydrodynamics and mass transfer of two-phase flows. For the first time it was possible to measure the velocity profile of the liquid phase and gas content, the turbulent characteristics of gas-liquid flows. The research of processes in two-phase media led to the development of the theory of wave dynamics of gas-liquid systems.

Conclusions. In conclusion the paper introduces the information on recognition of merits of V.E. Nakoryakov by scientific community, academia and public spheres.

Key words:

Scientific school, thermal physics, heat engineering, heat and mass transfer, experiment, methods of measurement, two-phase flow.

REFERENCES

1. Burdukov A.P., Nakoryakov V.E. O perenose massy v zvukovom pole [On mass transfer in an acoustic field]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1965, vol. 2, pp. 62–66.
2. Burdukov A.P., Nakoryakov V.E. Vliyaniye kolebaniy na massootdachu ot sfery pri bolshikh chislakh Prandtlya [Influence of oscillations on mass transfer from sphere at large Prandtl numbers]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 1967, no. 3, pp. 158–160.
3. Nakoryakov V.E., Shreiber I.R. Volny na poverkhnosti tonkogo sloya vyazkoy zhidkosti [Waves on the surface of a thin layer of viscous liquid]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1973, no. 2, pp. 109–113.

4. Nakoryakov V.E., Borisov A.A. rasprostranenie vozmushcheniy v srede s relaksatsiyey ili khimicheskoy reaktivnoy [Propagation of disturbances in a relaxing or chemically reacting medium]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1976, vol. 12, no. 3, pp. 414–422.
5. Burdukov A.P., Valukina N.V., Nakoryakov V.E. Osobennosti techeniya gazozhidkostnoy puzyrkovoy smesi pri malyykh chislakh Reynoldsa [Peculiarities of gas-liquid bubble mixture at low Reynolds numbers]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1975, no. 4, p. 137–141.
6. Kuznetsov V.V., Nakoryakov V.E., Pokusaev G., Shreiber I.R. Propagation of perturbations in a gas-liquid mixture. *Journal of Fluid Mechanics*, 1978, vol. 85, pp. 85–96.
7. Nakoryakov V.E., Pokusaev B.G., Troyan E.N. Impingement of an axisymmetric liquid jet on a barrier. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1978, vol. 21, pp. 1175–1184.
8. Gasenko V.G., Nakoryakov V.E., Shreiber I.R. Nelineynye volny v zhidkosti s puzyrkami gaza [Nonlinear perturbations in liquid with gas bubbles]. *Akustichesky zhurnal*, 1979, vol. 25, no. 5, pp. 681–685.
9. Alekseenko S.V., Nakoryakov V.E., Pokusaev B.G. Volnoobrazovanie pri techenii plenki zhidkosti na vertikalnoy stenke [Wave formation in liquid film flow on a vertical wall]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1979, vol. 20, no. 6, pp. 77–87.
10. Gasenko V.G., Nakoryakov V.E., Shreyber I.R. Dvukhvolnovaya model rasprostraneniya vozmushcheniy v zhidkosti s puzyrkami gaza [Two-wave model of propagation of disturbances in liquid with gas bubbles]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1979, no. 6, pp. 119–127.
11. Kutateladze S.S., Borisov A.I., Borisov A.A., Nakoryakov V.E. Eksperimentalnoe obnaruzhenie udarnoy volny razrezheniya vblizi kriticheskoy tochki zhidkost–par [Experimental detection of a rarefaction shock wave near a liquid–vapor critical point]. *Soviet Physics. Doklady*, 1980, vol. 252, no. 3, pp. 595–598.
12. Jak V.D., Mukhin V.A., Nakoryakov V.E. Trekhmernyye vikhriyye struktury v kavernakh [Three dimensional vortex structures in cavities]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1981, no. 2, p. 54–59.
13. Nakoryakov V.E., Kashinsky O.N., Burdukov A.P., Odnoral V.P. Local characteristics of upward gas-liquid flows. *International Journal of Multiphase Flow*, 1981, vol. 7, no. 1, pp. 63–81.
14. Borisov A.A., Borisov A.I., Kutateladze S.S., Nakoryakov V.E. Rarefaction shock wave near the critical liquid-vapor point. *Journal of Fluid Mechanics*, 1983, vol. 126, pp. 59–73.
15. Dontsov V.E., Kuznetsov V.V., Nakoryakov V.E. Udarnyye volny umerennoy intensivnosti v dvukhfaznoy srede [Shock waves of moderate amplitude in two-phase medium]. *Akustichesky zhurnal*, 1985, no. 2, pp. 193–196.
16. Mukhin V.A., Nakoryakov V.E., Petrik P.T., Serdakov G.S. Kondensatsiya para na naklonnoy plastine, pomeshchennoy v poristuyu sredyu [Steam condensation on the inclined plate placed in a porous medium]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1985, no. 5, pp. 85–90.
17. Zhak V.D., Mukhin V.A., Nakoryakov V.E., Safonov S.A. Rasprostranenie zatoplennoy strui v uzkoj shcheli [Distribution of submerged jet in a narrow gap]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1985, no. 3, pp. 69–77.
18. Nakoryakov V.E., Kashinsky O.N., Kozmenko B.K. Experimental study of gas-liquid slug flow in a small-diameter vertical pipe. *International Journal of Multiphase Flow*, 1986, vol. 12, no. 3, pp. 337–355.
19. Dontsov V.E., Kuznetsov V.E., Markov P.G., Nakoryakov V.E. Evolyutsiya voln davleniya umerennoy intensivnosti v zhidkosti s puzyrkami gaza [The evolution of the pressure waves of moderate intensity in liquid with gas bubbles]. *Akustichesky zhurnal*, 1987, vol. 33, no. 6, pp. 1041–1044.
20. Gorelik R.S., Kashinsky O.N., Nakoryakov V.E. Issledovanie opusknogo puzyrkovogo techeniya v vertikalnoy trube [Research of bubbly downflow in a vertical pipe]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1987, vol. 28, no. 1, pp. 69–73.
21. Dontsov V.E., Kuznetsov V.V., Nakoryakov V.E. Rasprostranenie voln davleniya v poristoy srede, насыщенной жидкостью [Pressure waves in saturated porous media]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1988, no. 1, pp. 120–130.
22. Nakoryakov V.E., Pokusaev B.G., Shreiber I.R., Pribaturin N.A. The wave dynamics of a vapour-liquid medium. *International Journal of Multiphase Flow*, 1988, vol. 14, no. 6, pp. 655–677.
23. Gorelik R.S., Kashinsky O.N., Nakoryakov V.E. Teploobmen ot stenki k voskhodyashchemu puzyrkovomu techeniyu pri malyykh skorostyakh zhidkoy fazy [Heat transfer from a wall to the ascending bubbly flow with low liquid-phase velocities]. *High Temperature*, 1989, vol. 27, no. 2, pp. 300–305.
24. Dontsov V.E., Kuznetsov V.E., Markov P.G., Nakoryakov V.E. Rasprostranenie voln davleniya v zhidkosti s puzyrkami gaza raznykh razmerov [Propagation of pressure waves in liquid with gas bubbles of different sizes]. *Akustichesky zhurnal*, 1989, vol. 35, no. 1, pp. 157–159.
25. Nakoryakov V.E., Kashinsky O.N., Petukhov A.V., Gorelik R.S. Study of local hydrodynamic characteristics of upward slug flow. *Experiments in Fluids*, 1989, vol. 7, no. 8, pp. 560–566.
26. Nakoryakov V.E., Kuznetsov V.V., Dontsov V.E. Pressure waves in saturated porous media. *International Journal of Multiphase Flow*, 1989, vol. 15, no. 6, pp. 857–875.
27. Nakoryakov V.E., Kuznetsov V.V., Dontsov V.E., Markov P.G. Pressure waves of moderate intensity in liquid with gas bubbles. *International Journal of Multiphase Flow*, 1990, vol. 16, no. 5, pp. 741–749.
28. Vorontsov S.S., Gorin A.V., Nakoryakov V.E., Khoruzhenko A.G., Chupin V.M. Natural convection in a hele-shaw cell. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1991, vol. 34, no. 3, pp. 703–709.
29. Nakoryakov V.E., Kuznetsov V.V., Vitovsky O.V. Experimental investigation of upward gas-liquid flow in a vertical narrow annulus. *International Journal of Multiphase Flow*, 1992, vol. 18, no. 3, pp. 313–326.
30. Nakoryakov V.E., Yaichnikova N.N. Laminarnaya struya v «uzkoj» shcheli pri bolshikh chislakh Reynoldsa [Laminar jet in a «narrow» gap at high Reynolds numbers]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1985, no. 5, pp. 30–35.
31. Alekseenko S.V., Nakoryakov V.E., Pokusaev B.G. Wave formation on vertical falling liquid films. *International Journal of Multiphase Flow*, 1985, vol. 11, no. 5, pp. 607–627.
32. Nakoryakov V.E., Vasserman E.S., Pokusaev B.G., Pribaturin N.A. Usilenie amplitudy voln davleniya v parozhidkostnoy srede puzyrkovoy struktury [Increased amplitude of pressure waves in liquid-vapor medium with bubble structure]. *High Temperature*, 1994, vol. 32, no. 3, pp. 411–417.
33. Nakoryakov V.E., Dontsov V.E., Pokusaev B.G. Pressure waves in liquid suspension with solid particles and gas bubbles. *Multiphase flow 1995: Proc. of the 2nd International conference on Multiphase Flow*. Kyoto, Japan, April 3–7, 1995. Vol. 1, pp. 11–17.
34. Dontsov V.E., Nakoryakov V.E., Pokusaev B.G. Volny davleniya v suspenzii zhidkosti s tverdyimi chastitsami i gazovymi puzyrkami [Pressure waves in liquid slurry with solid particles and gas bubbles]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1995, no. 1, pp. 32–40.
35. Alekseenko S.V., Nakoryakov V.E. Instability of a liquid film moving under the effect of gravity and gas flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1995, vol. 38, no. 11, pp. 2127–2134.
36. Nakoryakov V.E., Dontsov V.E., Pokusaev B.G. Pressure waves in a liquid suspension with solid particles and gas bubbles. *Inter-*

- national Journal of Multiphase Flow*, 1996, vol. 22, no. 3, pp. 417–429.
37. Alekseenko S.V., Nakoryakov V.E. Instability of a liquid film moving under the effect of gravity and gas flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 1996, vol. 22, no. S1, pp. 116–120.
 38. Nakoryakov V.E., Kuznetsov V.V. Kapilyarnye yavleniya, teplo-massoobmen i volnovye protsessy pri dvukhfaznom techenii v poristykh sistemakh i zasypkakh [Capillary phenomena, heat-and-mass exchange, and wave processes in two-phase flow in porous systems and packings]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1997, vol. 38, no. 4, pp. 155–166.
 39. Nakoryakov V.E., Leontiev A.I., Mostinsky I.L., Hartnett J.P. In memoriam – Professor Michael Adol'fovich Styrikovich (1902–1995). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1997, vol. 40, no. 3, pp. 503–504.
 40. Nakoryakov V.E., Alekseenko S.V., Medvetskaya N.V., Mostinski I.L., Osipov M.L., Volchkov E.P., Zeigavnik Ju.A., Hartnett J.P. Alexander I. Leontiev on his 70th birthday. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1998, vol. 41, no. 1, pp. 1–2.
 41. Gorin A.V., Egorov A.Yu., Nakoryakov V.E., Chupin V.M. Estestvennaya konvektsiya ot tsilindra v uzkoj shcheli i poristoy srede [Natural convection from cylinder in a narrow slit and a porous medium]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1999, vol. 40, no. 1, pp. 140–150.
 42. Dontsov V.E., Nakoryakov V.E. Rasprostranenie udarnykh voln v poristoy srede, nasyshchennoy zhidkostyu s puzyrkami rastvorimogo gaza [Propagation of shock waves in porous medium saturated with liquid with bubbles soluble gas]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2000, vol. 41, no. 5 (243), pp. 91–102.
 43. Grigorieva N.I., Nakoryakov V.E. Modelirovanie teplo- i massopere-nosa pri absorbtzii v binarnykh dvukhfaznykh sistemakh, ispolzuemykh v teplovykh nasosakh [Simulation of heat and mass transfer in binary biphasic absorption systems used in heat pumps]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2001, vol. 42, no. 1 (245), pp. 115–123.
 44. Dontsov V.E., Nakoryakov V.E. Enhancement of shock waves in a porous medium saturated with a liquid containing soluble-gas bubbles. *International Journal of Multiphase Flow*, 2001, vol. 27, no. 12, pp. 2023–2041.
 45. Dontsov V.E., Nakoryakov V.E. Pressure-wave damping in a liquid with bubbles produced by two kinds of gases. *Doklady Physics*, 2002, vol. 47, no. 2, pp. 153–155.
 46. Dontsov V.E., Nakoryakov V.E. Evolyutsiya voln davleniya v zhidkosti s puzyrkami dvukh raznykh gazov [Evolution of pressure waves in liquid with bubbles of two different gases]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2002, vol. 43, no. 2 (252), pp. 110–115.
 47. Dontsov V.E., Nakoryakov V.E. Volny davleniya v gazozhidkostonoy srede s rassloennoy strukturoy zhidkost – puzyrkovaya smes [Pressure waves in a gas-liquid medium with a stratified structure of liquid – bubble mixture]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2003, vol. 44, no. 4 (260), pp. 102–108.
 48. Nakoryakov V.E., Bufetov N.S., Grigoryeva N.I., Dekhtyar R.A. Teplomassopere-nos pri absorbtzii para nepodvizhnym sloem rastvora [Heat and mass transfer in vapor absorption with solution fixed bed]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2003, vol. 44, no. 2 (258), pp. 101–108.
 49. Nakoryakov V.E., Bufetov N.S., Dekhtyar R.A. Eksperimentalnoe issledovanie vliyaniya malyykh dobovok pav na neizotermicheskuyu absorbttsiyu [Experimental study of surfactants small additions effect on non-isothermal absorption]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2004, vol. 45, no. 2 (264), pp. 156–161.
 50. Nakoryakov V.E., Bufetov N.S., Grigoryeva N.I., Dekhtyar R.A., Marchuk I.V. Vapor absorption by immobile solution layer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, vol. 47, no. 6–7, pp. 1525–1533.
 51. Nakoryakov V.E., Bufetov N.S., Grigoryeva N.I., Dekhtyar R.A. The effect of surfactants on absorption under conditions of heat pumps and refrigerators. *International Journal of Low Carbon Technologies*, 2006, vol. 1, no. 3, pp. 273–284.
 52. Dontsov V.E., Nakoryakov V.E., Chernov A.A. Udar nye volny v vode s puzyrkami freona-12 s obrazovaniem gidrata gaza [Shock waves in water with bubbles of Freon-12 with gas hydrate formation]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2007, vol. 48, no. 3 (283), pp. 58–75.
 53. Nakoryakov V.E., Grigoryeva N.I., Bufetov N.S., Dekhtyar R.A. Heat and mass transfer intensification at steam absorption by surfactant additives. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, vol. 51, no. 21–22, pp. 5175–5181.
 54. Nakoryakov V.E., Gasenko V.G. Matematicheskaya model katodnogo uzla toplivnogo elementa s tverдыm ehlektrolitom [Mathematical model of a fuel cell cathode assembly with a solid electrolyte]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2005, vol. 46, no. 5 (273), pp. 27–37.
 55. Dontsov V.E., Nakoryakov V.E., Dontsov E.V. Protsessy gidrato-obrazovaniya i rastvoreniya za udarnoy volnoy v zhidkosti s puzyrkami gaza (smes azota i uglekislogo gaza) [Hydrating and dissolving behind a shock wave in liquid with gas bubbles (mixture of nitrogen and carbon dioxide)]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2009, vol. 50, no. 2 (294), pp. 178–187.
 56. Nakoryakov V.E., Grigoryeva N.I., Bartashevich M.V. Heat and mass transfer in the entrance region of the falling film: absorption, desorption, condensation and evaporation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, vol. 54, no. 21–22, pp. 4485–4490.
 57. Nakoryakov V.E., Misyura S.Ya., Elistratov S.L. The behavior of water droplets on the heated surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, vol. 55, no. 23–24, pp. 6609–6617.
 58. Nakoryakov V.E., Bartashevich M.V., Ostapenko V.V. Heat and mass transfer in the liquid film on a vertical wall in roll-wave regime. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, vol. 55, no. 23–24, pp. 6514–6518.
 59. Lezhnin S.I., Nakoryakov V.E. Growth of vapor bubbles from the solution with one volatile component at surface desorption. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, vol. 55, no. 5–6, pp. 1433–1440.
 60. Nakoryakov V.E., Tsoy A.N., Mezentsev I.V., Meleshkin A.V. Eksperimentalnye issledovaniya protsesssa inzhektzii zhidkogo azota v vodu [Experimental studies of liquid nitrogen injection into water]. *Teplofizika i aeromekhanika*, 2014, vol. 21, no. 3, pp. 293–298.

Received: 24 June 2015.