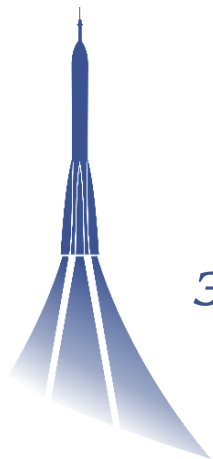


*XI Школа-семинар молодых ученых и специалистов
академика РАН В.Е. Алемасова*



***ПРОБЛЕМЫ
ТЕПЛОМАССОБМЕНА
И ГИДРОДИНАМИКИ В
ЭНЕРГОМАШИНОСТРОЕНИИ***

25-30 мая 2026, г. Казань

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Министерство науки и высшего образования РФ
Министерство цифрового развития государственного управления,
информационных технологий и связи Республики Татарстан
Академия наук Республики Татарстан
Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ

ПРОБЛЕМЫ ТЕПЛОМАССООБМЕНА И ГИДРОДИНАМИКИ В ЭНЕРГОМАШИНОСТРОЕНИИ

25-30 мая 2026, Казань

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

УДК 621.1+536.2

ББК 31.6

Про 78

Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении. Казань, 25-30 мая 2026 г.: тезисы докладов. – Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2026. – 320 с.

Сборник содержит тезисы пленарных докладов приглашенных лекторов и научных сообщений молодых ученых, аспирантов и студентов, представленных на XI Школе-семинаре молодых ученых и специалистов академиком РАН В.Е. Алемасова «Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении», проведенной с 25 по 30 мая 2026 года в городе Казани.

ISBN 978-5-7579-2782-4

Организаторы конференции: Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН»; ООО «Научно-производственное предприятие "Ирвис"»; Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ; Российский национальный комитет по тепломассообмену; Российский национальный комитет по теоретической и прикладной механике.

Представлены тезисы докладов по направлениям: фундаментальные и прикладные проблемы гидродинамики и тепломассообмена при однофазной конвекции; тепло- и массообмен в многофазных и реагирующих средах; радиационный, сложный и сопряженный теплообмен; прочность, надежность и долговечность элементов конструкции; методы и средства измерений и обработка данных; интенсификация нефтедобычи, экология, возобновляемая энергетика.

Оргкомитет: *председатель: Михеев Н.И., д.т.н., профессор, руководитель Института энергетики и перспективных технологий ФИЦ КазНЦ РАН; заместитель председателя: Кратиров Д.В., к.т.н., директор ООО НПП «ИРВИС».*

Члены оргкомитета: *Гольцман А.Е., к.т.н.; Душин Н.С., к.т.н.; Кадыров А.И., к.т.н.; Караева Ю.В. к.т.н.; Молочников В.М., д.т.н.; Пашкова Н.Д.; Попов И.А., д.т.н.; Шлянников В.Н., д.т.н.; Щелчков А.В., д.т.н.*

Секретариат: *Кадыров А.И.; Гольцман А.Е.; Пашкова Н.Д.*

УДК 621.1+536.2

ББК 31.6

ISBN 978-5-7579-2782-4

© Авторы, перечисленные в содержании, 2026

© Изд-во КНИТУ-КАИ, 2026

УДК 536.4

*Д.В. Антонов^{1,2}, С.А. Керимбекова^{1,2}, Г.В. Кузнецов^{*1,2},
А.В. Микулич^{1,2}, М.Е. Микулич^{1,2}*

*¹Национальный исследовательский Томский политехнический
университет, 634050, г. Томск, проспект Ленина, 30,
^{*}kuznetsovgv@tpu.ru*

*²Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 1*

ИССЛЕДОВАНИЕ РАССЛОЕНИЯ И СЕДИМЕНТАЦИИ ОРГАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ В СТОЧНЫХ ВОДАХ

Проблема недостатка чистой питьевой воды становится с каждым годом все более острой по целому ряду причин – рост населения планеты, развитие промышленности, загрязнение окружающей среды, а также нерациональное природопользование [1]. Но до последнего времени, несмотря на глобальную значимость этой проблемы, нет технических и технологических решений, обеспечивающих эффективную очистку сточных вод с приемлемыми для практики затратами энергии и других ресурсов [3]. В современных очистных сооружениях очистка сточных вод достигается за счет сочетания физических, химических, биологических процессов, применяемых последовательно. Сточная вода первым этапом проходит предварительную очистку, которая включает в себя измельчение, выравнивание потока, просеивание, удаление песка, нейтрализацию, снятие пены и предварительную аэрацию. Этот этап главным образом необходим для защиты оборудования и стабилизации характеристики поступающей воды.

На следующей стадии первичной обработки используются методы физического разделения – фильтрация, центрифугирование, седиментация, коагуляция и флотация, для удаления крупных частиц и взвешенных твердых частиц, что снижает нагрузку на этап биологической очистки. После песколовок из воды удаляются

тяжелые минеральные примеси, но остаются более мелкие и легкие частицы. Практически вся взвешенная органика проходит через песколовки без задержки, так как их скорость осаждения гораздо ниже. После первичных отстойников вода освобождается от основной массы оседающей взвеси. На выходе остаются тонкодисперсные частицы (взвешенные вещества размером менее 0,05–0,1 мм), коллоидные примеси (частицы размером от 0,001 до 0,1 мкм, которые не оседают под силой тяжести) и растворенные органические вещества и соли. Заявленная эффективность улавливания песка в системах очистки обычно составляет от 80 до 95%.

Основное назначение первичного отстойника состоит в том, что при гравитационной сепарации или седиментации тяжелые органические примеси за счет более высокой плотности осаждаются на дно, а всплывающие жиры и масла собираются на поверхности. Исследований поведения растворимых и нерастворимых примесей в объеме очищаемой воды крайне мало. Ключевой и первоочередной задачей в этом направлении является экспериментальное исследование поведения органических примесей в воде. Важно понимание процессов расслоения, седиментации, агломерации твердых частиц и жидких примесей в воде, а также их взаимное влияние. Объектом исследования являются сточные воды пищевой промышленности и жилищно-коммунального хозяйства (или хозяйственно-бытовые сточные воды). В качестве наиболее типичных органических загрязнений выбраны растительное масло, поверхностно-активные вещества (ПАВ), крахмал, клетчатка, белково-минеральные остатки и глицерин.

Установлено, что максимальная скорость седиментации характерна для мясокостной муки при наличии в сточной воде только последней. При добавлении к мясокостной муке 2,5 % клетчатки скорость седиментации уменьшается на 35 %. Скорость седиментации смеси мясокостной муки и клетчатки (соотношение 1:1, суммарная массовая концентрация 5%) и клетчатка (5%) сопоста-

вима (отклонение менее 3%). При добавлении водному раствору с клетчаткой мясокостной муки и их смеси растительного масла (в соотношении 1:1) скорость седиментации изменяется в пределах 8%. Полученные экспериментальные зависимости хорошо описываются экспоненциальной функцией.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант 075-15-2024-620). № 075-15-2025-007.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tong, S. et al.* A diagnostic framework to reveal future clean water scarcity in a changing climate // *J Hydrol Reg Stud. Elsevier*, – 2024. – Vol. 56. – P. 102040.

2. *Katekar, V.P., Deshmukh, S.S.* A review on research trends in solar still designs for domestic and industrial applications // *J Clean Prod. Elsevier*. – 2020. – Vol. 257. – P. 120544.

***D.V. Antonov^{1,2}, S.A. Kerimbekova^{1,2}, G.V. Kuznetsov^{1,2*},
A.V. Mikulich^{1,2}, M.E. Mikulich^{1,2}***

¹*National Research Tomsk Polytechnic University, Heat and Mass Transfer Laboratory, Tomsk, 634050, Russia*

²*Kutateladze Institute of Thermophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1, Lavrentiev Avenue, Novosibirsk, 630090, Russia,*

**kuznetsovgv@tpu.ru*

INVESTIGATION OF STRATIFICATION AND SEDIMENTATION OF ORGANIC IMPURITIES IN WASTEWATER

***В.С. Бердников¹, В.А. Винокуров¹, В.В. Винокуров¹,
В.А. Гришков¹, С.А. Кислицын¹, К.А. Митин^{1*},
А.В. Митина¹, А.В. Михайлов¹***

*¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 1,*

**mitin86@mpei.ru*

ТЕПЛОВАЯ ГРАВИТАЦИОННО-КАПИЛЛЯРНАЯ КОНВЕКЦИЯ В ВЕРТИКАЛЬНЫХ СЛОЯХ И В ПОЛОСТЯХ С ТОНКИМИ ВЕРТИКАЛЬНЫМИ СТЕНКАМИ

На стендах с прозрачными рабочими участками экспериментально исследована эволюция локальных характеристик свободно-конвективных пограничных слоев по продольной координате, изучены пространственные формы вторичных течений у нагретых до разных температур стенок плоского и кольцевого вертикальных слоев жидкости и в ядрах слоев. Прозрачные стенки позволяют вести видеосъемку течения в двух плоскостях.

В областях ламинарного, переходного и турбулентного пограничного слоя (ПС): проведены измерения локальных полей скорости и температуры, локальных тепловых потоков; исследована эволюция пространственной формы течения по продольной координате в установившихся режимах и в нестационарных режимах при нагреве или охлаждении вертикальных стенок; изучены локальные характеристики ПС и качественная перестройка пространственной формы течения на стенках плоского вертикального слоя, в условиях, когда пограничные слои на горячей и холодной стенках развиваются в значительной мере автономно; в кольцевом слое, где исключено влияние торцевых стенок и угловых зон на течение вдоль стенок, рассмотрено влияние гидродинамического взаимодействия погра-

нических слоев на особенности ЛТП; установлено, что сценарии нарушения устойчивости в ПС на вертикальных стенках в плоском и кольцевом слоях совпадают.

Но процессы турбулизации ядра жидкости существенно отличаются в зависимости от расстояний между вертикальными стенками, нагретыми до разных температур. В более тонком кольцевом слое переход к турбулентным течениям в слоях в целом вызван гидродинамическим взаимодействием восходящего потока на горячей стенке и нисходящего на холодной. В этом случае развивается неустойчивость: 1) в ПС, характерная для случая отдельной вертикальной стенки или для невзаимодействующих разнонаправленных пограничных слоев на стенках плоского вертикального слоя; 2) на границе встречных потоков. В результате взаимодействия двух типов неустойчивости в ядре кольцевого слоя возникает топологически сложное течение в виде двойной спирали, в которой навстречу друг другу движутся потоки нагретой и холодной жидкостей. Совместная обработка видеofilмов и сигналов термопар позволяет определить количественную связь между гидродинамической структурой, характеристиками вторичных течений и закономерностями локальной теплоотдачи. Локальная теплоотдача монотонно уменьшается в ламинарной области и области развитых двумерных вторичных течений вплоть до момента их полного разрушения. Рост локального теплового потока происходит в области “теплового перехода” ($2,3 \times 10^9 \leq Ra_x \leq 5 \times 10^9$). Получена наглядная картина “запаздывания теплового перехода” относительно гидродинамического.

Численно методом конечных элементов исследовано развитие нестационарных пограничных слоев при монотонном разогреве до заданной температуры внешней поверхности одной из стенок вертикального слоя жидкости. При геометрии расчетной области, подобной экспериментальному рабочему участку, воспроизведена регулярная структура вторичного течения, наблюдаемая экспериментально. Изучены нестационарные поля температуры и локальные

тепловые потоки в жидкости и обтекаемой стенке конечной теплопроводности. По полученным данным можно оценить глубину проникновения возмущений температуры и сдвиги фаз тепловой волны по толщине стенки. Процессы формирования нестационарных пограничных слоев на разогреваемой стенке исследованы в зависимости от теплопроводности стенок и углов наклона слоя.

Экспериментально и численно проанализировано развитие нестационарной тепловой гравитационно-капиллярной конвекции в слое этилового спирта со свободной поверхностью после внезапного разогрева одной из вертикальных стенок прямоугольной полости. Изучено влияние потока нагретой жидкости, натекающего вдоль свободной поверхности на поле температуры на противоположной тонкой металлической стенке полости. Получены распределения температуры и градиентов температуры по высоте стенки в зависимости от времени. Определены амплитудно-частотные характеристики пульсаций температуры, вызванные возникновением вторичных течений в набегающем на стенку потоке нагретой жидкости, изучено их влияние на мгновенные поля температуры на стенке на фоне монотонного изменения.

*V.S. Berdnikov¹, V.A. Vinokurov¹, V.V. Vinokurov¹,
V.A. Grishkov¹, S.A. Kislitsyn¹, K.A. Mitin^{1*}, A.V. Mitinf,
A.V. Mikhailov¹*

*¹Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia
mitin86@mpei.ru

**THERMAL GRAVITATIONAL-CAPILLARY
CONVECTION IN VERTICAL LAYERS AND
IN CAVITIES WITH THIN VERTICAL WALLS**

Ю.В. Жукова^{1*}, А.Д. Чорный¹, И.А. Попов², А.В. Щелчков²

¹*Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН
Беларуси, 220072, Республика Беларусь, Минск, ул. П. Бровки, 15,
julia_zhukova@rambler.ru

²*Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.Н. Туполева-КАИ,
420111 г. Казань, ул. К. Маркса, 10*

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ И АНАЛИЗ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ РАДИО- И МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОГАЗОДИНАМИКИ

Современные тенденции в развитии радио- и микроэлектронных систем диктуют необходимость отвода высоких тепловых потоков, что может быть достигнуто разными способами [1] – [5]:

1) вход и выход канала, где размещается радиатор, могут быть расположены или спрофилированы таким образом, чтобы формировать поток теплоносителя, максимально полно омывающий охлаждаемую поверхность. Распределение потока является симметричным, когда вход и выход расположены напротив друг друга. Из анализа форм коллектора видно, что прямоугольная форма коллектора обеспечивает лучшую равномерность скорости потока, чем симметричные трапецевидный и треугольный коллекторы;

2) большое значение для повышения эффективности теплоотвода имеют как материал основания теплоотвода, так и материал, из которого изготовлены ребра теплоотвода. Необходим аналитический подход к стоимости материала, из которого изготавливаются основание и радиатор, а также выбор теплоносителя. Соотношение стоимость/эффективность должно быть оптимальным;

3) используются радиаторы различных типов: проволочные, пластинчато-разрезные, пластинчатые, штыревые и с основанием

различной формы. Некоторые современные тенденции связаны с использованием различных типов радиаторов и форм ребер, а также с созданием дополнительных условий течения (пульсации, локальные струйные течения, изменение структуры потока);

4) изменение формы радиатора, в частности, профилирование корня ребра и размещение различных интенсификаторов на боковой поверхности ребер;

5) разработка численных алгоритмов, позволяющих определить форму ребер, оптимальную с точки зрения тепловых и гидравлических характеристик. Цифровой двойник – современная тенденция для теплового проектирования радиаторов. Его создание дает возможность сэкономить трудозатраты, время и финансовые ресурсы при проектировании новых объектов.

Был разработан подход, позволяющий с высокой надежностью определять параметры теплообмена радиаторов с высоким тепловыделением на этапе разработки конструкции. Этот подход включает в себя инженерные методы прогнозирования геометрических и средних эксплуатационных параметров теплового режима систем охлаждения радио- и микроэлектроники и вычислительный эксперимент в трехмерной постановке, который позволяет получить коэффициент теплообмена для теплообменных поверхностей со сложной геометрией и более детальную картину тепловых полей в областях, особо чувствительных к изменению температур. Такой подход позволяет оценить площадь теплообменной поверхности, необходимую для рассеивания заданного количества тепла. Определенная площадь теплообменной поверхности позволяет провести проектный расчет радиатора.

Работа выполнена в рамках Соглашения о консорциуме между КНИТУ-КАИ и Институтом тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hung, T.C., Huang, Y.X., Yan, W.M.* Thermal Performance of Porous Microchannel Heat Sink: Effects of Enlarging Channel Outlet // *Int. Commun. Heat Mass Transf.* – 2013. – Vol. 48. – Pp. 86–92.

2. *Shkarah, A.J., Sulaiman, M.Y.B., Ayob, R.B.H., Togun, H.* A 3D Numerical Study of Heat Transfer in a Single-Phase Micro-Channel Heat Sink Using Graphene, Aluminum and Silicon as Substrates // *Int. Commun. Heat Mass Transf.* – 2013. – Vol. 48. – Pp. 108–115.

3. *Rohachev, V., Terekh, A., Baranyuk, A., Nikolaenko, Yu., Zhukova, Yu., Rudenko, A.* Heataerodynamic efficiency of small size heat transfer surfaces for cooling thermally loaded electronic components // *Therm. Sci. Eng. Progr.* – 2020. – Vol.20. – P. ID 100726.

4. *Freegah, B.* CFD analysis of heat transfer enhancement in plate-fin heat sinks with fillet profile: Investigation of new designs // *Therm. Sci. Eng. Progr.* – 2020. – Vol. 17. – P. ID 100458.

5. *Borovkov, A.I.* Digital twins in high-tech industry. Brief report / A.I. Borovkov, A.A. Gamzikova, K.V. Kukushkin, Yu.A. Ryabov. – St. Petersburg: POLYTECH-PRESS, 2019. – 62 p.

***Yu.V. Zhukova^{1*}, A.D. Chorny¹, I.A. Popov²,
A.V. Shchelchkov²***

¹*A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, 220072 Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka Str, 15*

²*Kazan National Research Technical University
named after A.N. Tupolev-KAI,*

*420111 Russian Federation, Tatarstan, Kazan, K. Marksa st., 10,
julia_zhukova@rambler.ru

**THERMAL DESIGN AND ANALYSIS OF HEAT SINKS
USIND THE CFD-APPROACH**

С.А. Исаев^{1}, Н.И. Михеев², Е.А. Осюк¹, Н.С. Душин²*

*¹Санкт-Петербургский государственный университет
гражданской авиации имени Главного маршала авиации
А.А. Новикова, 196210, Санкт-Петербург, ул. Пилотов, 38,
isaev3612@yandex.ru

*²Федеральный исследовательский центр «Казанский научный
центр РАН», 420111, Казань, ул. Лобачевского, 2/31, а/я 261*

ФИЗИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ УСКОРЕНИЯ В ЯДРЕ ЛАМИНАРНОГО ПОТОКА И АНОМАЛЬНОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В УЗКОМ КАНАЛЕ С ДВУХРЯДНЫМИ НАКЛОННЫМИ КАНАВКАМИ

Явление ускорения ламинарного потока воздуха в структурированном канале с однорядными наклонными редко расположенными канавками на стабилизированном участке также предсказано численно на основе решения уравнений Навье – Стокса [1–4]. Более чем двукратное увеличение скорости по сравнению с среднemasсовой скоростью наблюдается при $Re=1000$ в области канала над входными частями канавок, начиная с глубины канавки порядка 25% от ширины [2]. Тепловая эффективность структурированной стенки нарастает практически линейно с ростом Re , начиная с $Re = 250$, и при $Re = 1500$ достигает величины порядка 1,9. Относительные гидравлические потери увеличиваются, следуя квадратичной зависимости, но по темпу роста отстают от тепловой эффективности. При $Re = 1500$ они достигают уровня 1,44 [3]. Интегральные теплогидравлические характеристики овальной лунки по мере роста длины траншеи при сохранении площади пятна и фиксации глубины претерпевают значительные изменения [4]. Тепловая эффективность структурированной стенки периодического мо-

дуля увеличивается практически от 1 до 1,75 при длине лунки 5,25 (в долях ширины). Рост относительных гидравлических потерь не превысил 1,43 при длине 5,375. В работе [5] явление ускорения ламинарного потока в структурированном оптически прозрачном канале с двухрядными плотно расположенными канавками подтверждается сопоставлением расчетных прогнозов с измерениями скорости методом SIV с приемлемой точностью. Представлена корреляция локального ускорения ламинарного потока в узком структурированном канале и аномальной интенсификации отрывного течения в двухрядных наклонных канавках на стенке. Обнаружено, что при $Re = 2500$ для удаленных от входа канавок в продольном сечении канала, проходящем через центры сечений стыковки входных сферических сегментов и траншейных частей, отрицательное относительное трение выходит на минимальные величины порядка -9 и сочетается с достижением величин максимальной скорости в сдвиговых слоях над канавками (на высоте $y = 0,005$) порядка 1,4. Однако механизм локального ускорения до сих пор остается недостаточно понятным. В работе [5] обоснована взаимосвязь аномальной интенсификации отрывного течения и экстраординарных сосредоточенных перепадов давления между областями торможения входящего в канавки потока на наветренных склонах и зонами отрицательного давления в ядрах смерчеобразных вихревых структур на сферических сегментах. В данной работе рассматриваются черты управляющего механизма ускорения ламинарного потока в длинном структурированном канале с 26 двухрядными канавками, наклоненными под углами $\pm 45^\circ$, при $Re=1000$ на основе анализа численных прогнозов и экспериментальных данных. Обнаружено, что механизм ускорения пристеночной скорости связан с прохождением ламинарного потока через последовательность зон отрицательного давления на подветренных кромках пакета наклонных канавок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Isaev, S.A., Baranov, P.A., Leontiev, A.I., Popov, I.A.* Intensification of a laminar flow in a narrow microchannel with single-row inclined oval-trench dimples // TPL. – 2018. – Vol. 44. – №. 5. – Pp. 398–400.

2. *Isaev, S.A., Leontiev, A.I., Milman, O.O., Popov, I.A., Sudakov, A.G.* Influence of the depth of single-row oval-trench dimples inclined to laminar air flow on heat transfer enhancement in a narrow microchannel // HMT. – 2019. – Vol. 134. – Pp. 338–358.

3. *Isaev, S.A., Milman, O.O., Osiyuk, E.A., Nikushchenko, D.V., Khmara, D.S.* Intensification of laminar heat transfer in stabilized air flow in a narrow channel with single-row sparse inclined oval-trench dimples on the wall as the Reynolds number increases from 50 to 1500 // FD. – 2025. – Vol. 60:98. – P. 98.

4. *Isaev, S.A., Gritckevich, M.S., Osiuk, E.A., Nikushchenko, D.V., Kharchenko, V.B., Kong, Dehai.* Anomalous heat transfer enhancement for the developed laminar channel flow with a single-row array of inclined oval-trench dimples with variable values of the trench length at the fixed dimple depth and spot area // FD. – 2026. – Vol. 61. – P. 11.

5. *Isaev, S.A., Mil'man, O.O., Mikheev, N.I., Nikushchenko, D.V., Dushin, N.S., Klyus, A.A., Osiyuk, E.A.* Interrelation between the local acceleration of laminar flow in a channel and the anomalous heat transfer enhancement in inclined two-row grooves // FD. – 2024. – Vol. 59. – №. 4. – Pp. 633–686.

S.A. Isaev^{1*}, N.I. Mikheev², E.A. Osiyuk¹, N.S. Dushin²

¹Novikov Saint-Petersburg State University of Civil Aviation, 196210 Russian Federation, Saint-Petersburg, ul. Pilotov, 38

²Federal State Budgetary Institution of Science «Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences», 420111 Russian Federation, Tatarstan, Kazan, ul. Lobachevskogo, 2/31

**isaev3612@yandex.ru*

PHYSICAL MECHANISM OF ACCELERATION IN THE CORE OF LAMINAR FLOW AND ANOMALOUS HEAT TRANSFER ENHANCEMENT IN A NARROW CHANNEL WITH DOUBLE-ROW INCLINED GROOVES

В.В. Кузнецов

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1,
vladkuz@itp.nsc.ru*

ТЕПЛО- И МАССООБМЕН ПРИ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ И ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЯХ В МАЛОРАЗМЕРНЫХ СИСТЕМАХ

Перспективным направлением развития энергетических установок является применение малоразмерных систем, позволяющих значительно повысить энергоэффективность за счет увеличения удельной поверхности и интенсификации процессов тепло- и массообмена. Отсутствие надежных методов расчета в данных условиях обусловлено слабой изученностью взаимосвязи процессов на микро- и макромасштабах при определяющем влиянии капиллярных сил [1]. В данной работе рассмотрено многомасштабное физическое и математическое моделирование гидродинамики и тепломассообмена в теплообменниках энергетических установок, в которых применены малоразмерные каналы для реализации ранее недоступных технологий.

Рассмотрены методы моделирования процессов тепло- и массообмена при испарении и конденсации в каналах пластинчато-ребристых теплообменников систем сжижения природного газа. Разработана математическая модель, основанная на сшивке решений для течения жидкости в углах и на стенках каналов в условиях доминирующего влияния капиллярных сил. В данных условиях конфигурация пленки жидкости отличается для испарения и конденсации, что обуславливает различие в коэффициентах теплоотдачи. Расчеты показали, что формирование сухих пятен и увеличение коэффициента теплоотдачи вблизи контактной линии типичны для испарения жидкости в малоразмерных каналах, но их влияние

ограничено величиной теплового потока. Предложенная модель тепломассообмена для малых тепловых потоков хорошо согласуется с экспериментальными данными и закладывает основы для расчета компактных испарителей и конденсаторов.

Рассмотрены особенности моделирования процессов тепло- и массообмена при противоточном газожидкостном течении в структурных насадках воздухоразделительных установок с малоразмерными каналами сложной формы. В таких каналах многокомпонентный конденсат стекает вниз в виде пленки жидкости, деформированной капиллярными силами, а пар поднимается вверх в условиях интенсивного обмена на межфазной поверхности. Разработан метод расчета межфазного тепло- и массообмена в данных условиях, основанный на учете самопроизвольной закрутки потока пара, вызванной взаимодействием потоков в слое смешения. Установлено, что основной причиной крупномасштабной неустойчивости в воздухоразделительных установках, снижающих их энергоэффективность, являются взаимосвязанные гидродинамические и массообменные процессы, приводящие к развитию конвективных течений и капиллярно-гравитационной неустойчивости, что снижает эффективность разделения.

Для обоснования микроканальных систем отвода тепла от теплонапряженных зон энергетического оборудования и микропроцессоров разработан новый метод расчета теплообмена при кипении жидкости в микроканальных и микроструйных системах, учитывающий совместно вклад подавления пузырькового кипения, двухфазной конвекции и испарения тонкой пленки жидкости в неравновесных условиях. Установлены физические механизмы и предложены методы повышения критической тепловой нагрузки для кипения воды, диэлектрической жидкости и хладонов в микроразмерных системах охлаждения, выявлены закономерности теплообмена при микроструйном охлаждении областей повышенного тепловыделения.

Рассмотрены процессы тепло- и массообмена при химических превращениях в микроканальных реакторах-теплообменниках водородной энергетики. Разработка компактных реакторов-теплообменников для конверсии природного газа позволяет создать интегрированные электрохимические генераторы, не связанные с крупномасштабным производством водорода. Синтезированы многокомпонентные наноструктуры на основе родия и палладия для проведения реакций паровой и автотермальной конверсии углеводородов и спиртов. Разработаны физическая и математическая модели конверсии модельного природного газа в обогащенный водородом синтез-газ в микроканальном реакторе-теплообменнике, совмещенном с парогенератором, получены экспериментальные данные по оптимальным режимам конверсии.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН 126021217055-8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kuznetsov, V.V.* Heat and Mass Transfer with Phase Change and Chemical Reactions in Microscale // Proceedings of the International Heat Transfer Conference IHTC14. 2010. Washington, USA. Keynote IHTC14-22570.

V.V. Kuznetsov

*Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS,
Russia, 630090 Novosibirsk, pr. Akademika Lavrentjeva, 1,
vladkuz@itp.nsc.ru*

**HEAT AND MASS TRANSFER DURING PHASE
TRANSITIONS AND CHEMICAL REACTIONS
IN SMALL-SIZED SYSTEMS**

М.А. Абрамов^{}, К.Ю. Арефьев*

*Федеральное автономное учреждение «Центральный институт
авиационного моторостроения имени П.И. Баранова»,
111116, Москва, ул. Авиамоторная, 2,
^{*}maabramov@ciam.ru*

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОСТРОЕНИЯ ПОЛЯ РАСХОДОНАПРЯЖЕННОСТИ ПОТОКА ЧАСТИЦ В НЕСУЩЕМ ГАЗОВОМ ПОТОКЕ НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТНОГО ПОДХОДА

Исследование двухфазных потоков имеет важное значение для современной науки и техники. Следует отметить, что двухфазная среда является перспективным рабочем телом для энергетических, силовых и технологических установок. Рассматриваемые двухфазные рабочие тела являются концентрированными взвесями полифракционных частиц, а также их агломератов или конгломератов в высокоскоростных потоках газа. Актуальность рассматриваемого направления исследования определяется тем, что повышение качества (с точки зрения надлежащего распределения частиц в сечении) и разработка технологии управления двухфазными потоками – ключевые проблемы при организации рабочего процесса в энергосиловых установках и в современных стендовых и технологических устройствах. Особенно остро эти проблемы стоят для случая инъекции большого количества твердых частиц в высокоскоростные высоконтальпийные потоки.

Задача настоящего исследования – создание математической модели, позволяющей провести перобразованье дискретного распределения потока частиц в несущем газовом потоке в непрерывную функцию расходонапряженности.

Математическая модель основана на предположении, что получаемые в расчетах с использованием комбинированного подхода

Лагранжа – Эйлера дискретные распределения траекторий движения частиц в потоке газа могут быть интерпретированы в виде локально-непрерывного поля расходонапряженности дисперсной фазы. Для этого было предложено преобразовать бесконечно тонкие базовые траектории частиц с единичной вероятностью прохождения через них всей дисперсной фазы в локализованные области вблизи этих траекторий. Вероятность прохождения частицы в каждом сечении такой локализованной области имеет распределенную функцию плотности, интеграл которой в сечении нормирован на единицу. Функция распределения плотности вероятности зависит в общем случае от расстояния до базовой траектории, пройденного частицей пути, уровня турбулентных пульсаций, газодинамических параметров, несферичности частиц дисперсной фазы и других условий. В конечном итоге, совокупность таких областей позволяет провести преобразование дискретных траекторий в локально-непрерывное поле расходонапряженности дисперсной фазы.

Предложенная математическая модель позволяет повысить качество процессов смешения в разрабатываемых энергосиловых, технологических и промышленных установках за счет формирования требуемого поля расходонапряженности дисперсной фазы.

M.A. Abramov**, *K.Y. Arefyev

*Central Institute of Aviation Motors, 111116, Russian Federation,
Moscow, Aviamotornaya st., 2,*

**maabramov@ciam.ru*

**MATHEMATICAL MODEL FOR CONSTRUCTING
A PARTICLE FLOWRATE IN A CARRIER GAS FLOW
BASED ON A PROBABLISTIC APPROACH**

Т.Н. Абсатаров^{1}, П.А. Тупотилов¹, Е.В. Богданова¹,
А. В. Захаренков¹, А.В. Дедов¹*

*¹Национальный исследовательский университет “МЭИ”,
111250, Российская Федерация, Москва, ул. Красноказарменная, 14,
absatarovtn@mpei.ru

ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ФАКТОРА НА ТЕПЛООБМЕН ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ОБОГРЕВАЕМОЙ МИШЕНИ ДИСПЕРГИРОВАННЫМ ПОТОКОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

В работе представлены результаты экспериментального исследования теплообмена при охлаждении медной мишени газожидкостным диспергированным потоком теплоносителя в условиях одностороннего нагрева тепловыми нагрузками до нескольких МВт/м². Представлено описание основных элементов экспериментальной установки и ее систем, конструкции рабочего участка. Основное внимание уделено изучению влияния расстояния от форсунки до охлаждаемой поверхности мишени. Получены зависимости температуры охлаждаемой поверхности, плотности теплового потока и коэффициента теплоотдачи от подводимой мощности при различных расстояниях между форсункой и мишенью. Показано, что определение оптимального расстояния между форсункой и охлаждаемой поверхностью позволяет варьировать коэффициент теплоотдачи в пределах 20 %.

Диспергированное охлаждение – один из наиболее эффективных способов отвода тепла при высоких плотностях теплового потока, характерных для энергетических установок, силовой электроники, различных аэрокосмических систем [1, 2]. В формируемой на поверхности охлаждения жидкой пленке теплоносителя параллельно происходят процессы турбулизации, испарения и микропузырьково-

го кипения, что позволяет обеспечивать эффективный теплообмен при минимальном расходе теплоносителя [3].

Изменение расстояния между форсункой и мишенью приводит к изменению структуры факела распыла, распределения плотности орошения, среднего диаметра капель и их импульса при взаимодействии с поверхностью. При малых расстояниях реализуется выраженное импактное воздействие капель на поверхность с повышенной локальной плотностью орошения. При увеличении расстояния происходит расширение факела распыла, снижение кинетической энергии капель и перераспределение жидкой фазы по площади охлаждения.

С целью изучения влияния расстояния на теплообмен на экспериментальной установке «Односторонний нагрев мишени» кафедры ОФиЯС НИУ «МЭИ» был выполнен цикл работ по охлаждению разработанной конструкции мишени. Тепловая нагрузка на мишень создавалась сканирующим электронным пучком мощностью до 60 кВт, обеспечивающим плотность теплового потока до нескольких МВт/м², а ее охлаждение – пневматической форсункой, формирующей газожидкостный диспергированный поток. Для охлаждения мишени ранее была создана система охлаждения с возможностью удаленного управления (рис. 1) [4].

В ходе экспериментов варьировалось расстояние от сопла форсунки до поверхности мишени при фиксированных расходах воды и газа.

В результате проведенных исследований получены температурные поля мишени и зависимости плотности теплового потока от температуры в центральном сечении при различных расстояниях распыла (рис. 2).

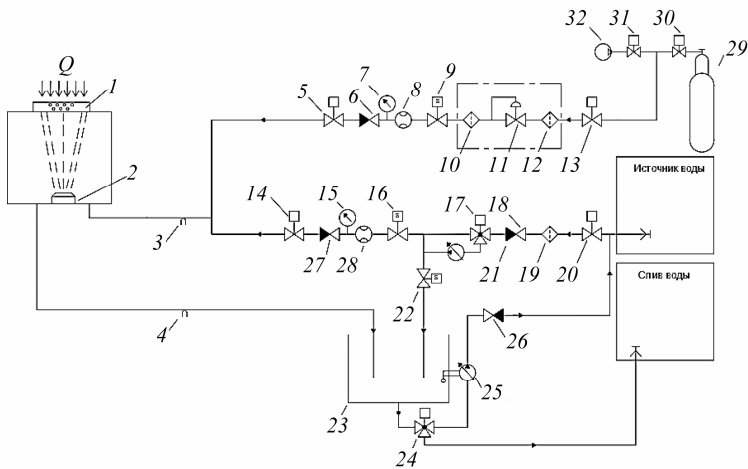


Рис. 1. Принципиальная схема контура охлаждения: 1 – рабочий участок; 2 – форсунка; 3 – термопара на входе в РУ; 4 – термопара на выходе из РУ; 5, 13, 14, 20, 30, 31 – 2-линейные клапаны с электрическим управлением; 6, 18, 26, 27 – обратные клапаны; 7, 15, – манометры; 8, 28 – расходомер; 9, 16 – регулятор потока с электрическим управлением; 10 – фильтр тонкой очистки; 11 – редуктор; 12, 19 – фильтры грубой очистки; 17, 24 – 3-линейный клапан с прямым электрическим управлением; 21 – насос регулируемый; 22 – регулятор потока с электрическим управлением; 25 – регулируемый насос с поплавковым управлением; 23 – сепаратор; 29 – баллон с газом; 32 – компрессор

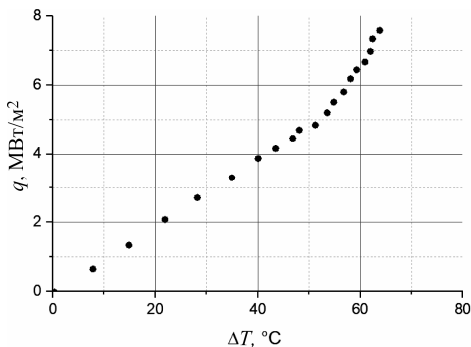


Рис. 2. Зависимости плотности теплового потока от температурного напора при расстоянии 87 мм от форсунки до мишени

На основе измеренных температурных градиентов выполнена оценка плотности теплового потока и коэффициента теплоотдачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ni, Q. et al.* New insights into intermittent spray cooling for high-power electronics applications // *Applied Thermal Engineering*. – 2025. – Vol. 261. – P. 125148. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.125148>.

2. *Wang, J.X. et al.* Review of aerospace-oriented spray cooling technology // *Progress in Aerospace Sciences*. – 2020. – Vol. 116. – P. 100635. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2020.100635>.

3. *Yin, J. et al.* Spray cooling as a high-efficient thermal management solution: A review // *Energies*. – 2022. – Vol. 15. – №. 22. – P. 8547 <https://doi.org/10.3390/en15228547>.

4. *Groo, D.A., Demidov, A.S., Zakharenkov, A.V. et al.* Analysis of the Effectiveness of Cooling a High-Temperature Surface with a Dispersed Coolant Flow // *Thermal Engineering*. – 2024. – Vol. 71. – № 9. – Pp. 761–775. DOI 10.1134/S0040601524700253.

***T.N. Absatarov^{1*}, P.A. Tupotilov¹, E.V. Bogdanova¹,
A.V. Zakharenkov¹, A.V. Dedov¹***

¹National Research University "MPEI"

111250, Russian Federation, Moscow, Krasnokazarmennaya St.,

Building 14,

**absatarovtn@mpei.ru*

**INFLUENCE OF THE SPATIAL FACTOR ON HEAT
TRANSFER DURING COOLING OF A HEATED TARGET
BY A DISPERSED COOLANT**

А.А. Аганин¹, И.Н. Мустафин^{1}*

*¹Федеральный исследовательский центр
«Казанский научный центр РАН»,
420111, Казань, ул. Лобачевского, 2/31, а/я 261,
ildarmn@mail.ru

КОЛЛАПС СИММЕТРИЧНО РАСПОЛОЖЕННЫХ ПАРОГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ

Изучение совместного коллапса кавитационных парогазовых пузырьков имеет большое научное и практическое значение. Так, в конце коллапса в пузырьках могут возникать очень высокие температуры и давления [1, 2], что используется, например, в химических и биологических приложениях кавитации. При этом вблизи пузырьков могут образовываться расходящиеся ударные импульсы [2], что приводит к механическим повреждениям и эрозии близлежащих твердых тел. В случае совместного коллапса пузырьков их гидродинамическое взаимодействие может привести к гораздо более высоким давлениям и температурам внутри пузырьков и гораздо большей интенсивности расходящихся ударных импульсов, чем в случае коллапса одиночных пузырьков. Состав парообразного содержимого в пузырьках также имеет важное значение, поскольку максимальные температуры и давления внутри пузырьков, а также интенсивность исходящих импульсов в значительной степени зависят от соотношения массовых долей пара и неконденсируемого газа [3].

В настоящей работе изучаются особенности совместного коллапса двух, трех и четырех парогазовых пузырьков (рисунок) в воде. Пузырьки одинаковы по размеру и содержанию, расположены на равном удалении друг от друга, т.е. находятся в вершинах равностороннего треугольника в случае трех пузырьков и в вершинах правильного тетраэдра в случае четырех пузырьков. Первоначально пузырьки заполнены водяным паром в состоянии насыщения и некон-

денсифицируемым газом (воздухом). В начальный момент времени $t = 0$ (в начале коллапса) вода неподвижна, радиусы всех пузырьков равны $R_0 = 1$ мм, температура T и давление p воды равны $T_L = 20$ °C и $p_L = 1$ бар, где нижний индекс L обозначает жидкость.

В используемой модели динамики пузырьков содержимое пузырьков рассматривается как гомобарическое, жидкость как слабо-сжимаемая, а пар и газ в пузырьках – как совершенные газы. Представленная в данной работе математическая модель совместного коллапса симметрично расположенных одинаковых сферических парогазовых пузырьков может рассматриваться либо как обобщение модели совместного коллапса симметрично расположенных одинаковых сферических парогазовых пузырьков Аганина и Халитовой [4] на случай парогазовых пузырьков, либо как обобщение модели коллапса одиночного парогазового пузырька Аганина и Мустафина [3] на случай симметрично расположенных одинаковых сферических парогазовых пузырьков. Данная модель включает:

1) обыкновенные дифференциальные уравнения:

$$\begin{aligned} & \left(1 - \frac{u_L^+}{c_L}\right) R \dot{u}_L^+ + \frac{3}{2} \left(1 - \frac{u_L^+}{3c_L}\right) (u_L^+)^2 + 2 \left(1 - \frac{u_L^+}{4c_L}\right) u_L^+ (\dot{R} - u_L^+) = \\ & = \left(1 + \frac{\dot{R}}{c_L}\right) \frac{p_L^+ - p_\infty}{\rho_L} + \frac{R}{c_L} \frac{\dot{p}_L^+ - \dot{p}_\infty}{\rho_L} - (N-1) \frac{(R^2 \ddot{R} + 2R\dot{R}^2)|_{t-\tau}}{d}, \\ & \dot{p} = \frac{-R^2 p u^- + \Gamma(R)}{R^3 / 3 - \Phi(R)}; \quad \dot{R} = u_L^+ + \frac{j_v}{\rho_L}; \end{aligned}$$

2) уравнения в частных производных для температуры T и массовой доли газа Y_g :

• в пузырьках ($0 < r < R$)

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{\rho c_p} \left(\dot{p} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \kappa \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right) + (c_{pg} - c_{pv}) \rho D \frac{\partial Y_g}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r},$$

$$\frac{\partial Y_g}{\partial t} + u \frac{\partial Y_g}{\partial r} = \frac{1}{\rho r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \rho D \frac{\partial Y_g}{\partial r} \right),$$

- в жидкости ($r > R$)

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_L \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{\rho_L c_{v,L} r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \kappa_L \frac{\partial T}{\partial r} \right),$$

$$\frac{\partial Y_g}{\partial t} + u_L \frac{\partial Y_g}{\partial r} = \frac{1}{\rho_L r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \rho_L D_L \frac{\partial Y_g}{\partial r} \right);$$

3) граничные условия:

- на поверхности пузырьков

$$\left(\kappa_L \frac{\partial T}{\partial r} \right)^+ - \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial r} \right)^- = j_v l(p_v), \quad T^+ = T^-,$$

$$\left(Y_g j + \rho_L D_L \frac{\partial Y_g}{\partial r} \right)^+ = \left(Y_g j + \rho D \frac{\partial Y_g}{\partial r} \right)^- = j_g,$$

$$Y_g^+ = H p_g^-, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial Y_g}{\partial r} = 0,$$

- на бесконечном удалении от пузырьков

$$T = T_L; \quad Y_g = Y_{g\infty}.$$

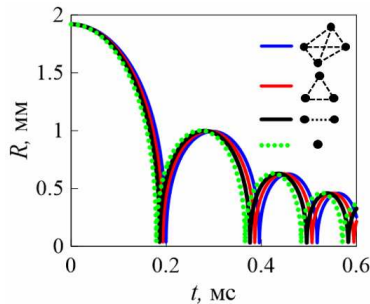
Интенсивность фазовых превращений j_v определяется выражениями:

$$j_v = \frac{\alpha_{ac}}{\sqrt{2\pi B_v}} \left(\frac{p_S(T^+)}{\sqrt{T^+}} - \frac{\chi p_v}{\sqrt{T^-}} \right); \quad \chi = e^{-\Omega^2} - \Omega \sqrt{\pi} \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\Omega} e^{-x^2} dx \right);$$

$$\Omega = \frac{j_v \sqrt{B_v T^-}}{\sqrt{2 p_v}}, \quad j = j_v + j_g,$$

где r – расстояние от центра пузырька; u – радиальная скорость; ρ – плотность; d – расстояние между центрами пузырьков; N – число пузырьков; c_L – скорость звука в жидкости; $\tau = d/c_L$ – временная задержка; c_V – теплоемкость при постоянном объеме; c_p – теплоемкость при постоянном давлении; D – коэффициент бинарной диффузии; κ – коэффициент теплопроводности; H – константа Генри; j_g – диффузионный поток через поверхность пузырька на единицу площади; α_{ac} – коэффициент аккомодации; B_v – газовая постоянная пара; $p_s(T)$ – давление насыщенного пара при температуре T ; $l(p_v)$ – удельная теплота парообразования и конденсации при давлении пара p_v ; нижние индексы g и v обозначают газ и пар соответственно, ∞ – соответствует значениям на большом удалении от пузырьков; верхние индексы $(-)$ и $(+)$ обозначают значения на внутренней и внешней сторонах поверхности пузырька; верхняя точка означает дифференцирование по времени; интегралы $\Gamma(R)$ и $\Phi(R)$ определяются по формулам из работы [3].

На рисунке показано влияние количества пузырьков на изменение радиусов пузырьков в ходе их коллапса и последующих отскоков. Видно, что это влияние относительно невелико. Интенсивность коллапса пузырьков незначительно возрастает с увеличением N . Соответственно, радиусы пузырьков в конце их коллапса несколько уменьшаются, в то время как соответствующее давление и температура парогазовой смеси в пузырьках несколько увеличиваются.



Изменение радиусов пузырьков в процессе их коллапса и последующих отскоков для числа пузырьков $N = 1, 2, 3$ и 4 ; $Y_{g0} = 0,02$; $\alpha_{ac} = 0,075$; $d/R_0 = 10$

Из рисунка видно, что при увеличении начальной массовой доли газа в пузырьках Y_{g0} от 0 до 10 % максимальное давление внутри пузырьков и максимальная температура в их центрах уменьшаются примерно в 10 и 1,5 раза соответственно. При увеличении коэффициента аккомодации α_{ac} от 0 до 1 они увеличиваются примерно в 30 и 2,5 раза. При увеличении числа пузырьков N от 2 до 4 изменения максимального давления и температуры довольно незначительны.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-71-00088, <https://rscf.ru/project/25-71-00088>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nigmatulin, R.I., Akhatov, I.Sh., Topolnikov, A.S., Bolotnova, R.Kh., Vakhitova, N.K., Lahey, R.T., Taleyarkhan, R.P.* Theory of super-compression of vapor bubbles and nanoscale thermonuclear fussion // *Physics of Fluids*. – 17 (10). – 107106 (2005).

2. *Lauterborn, W., Kurz, T.* Physics of bubble oscillations // *Progr. Phys.* 73, 106501 (2010).

3. *Aganin, A.A., Mustafin, I.N.* Influence of a non-condensable gas admixture inside a vapor bubble on its collapse // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 46 (5). 19351944 (2025).

4. *Aganin, A.A., Khalitova, T.F.* Collapse of Equal Symmetrically Located Spherical Cavitation Bubbles // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 45 (5). 18751885 (2024).

A.A. Aganin¹, I.N. Mustafin^{1*}

¹Federal State Budgetary Institution of Science «Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences», 420111 Russian Federation, Tatarstan, Kazan, ul. Lobachevskogo, 2/31,

**ildarmn@mail.ru*

COLLAPSE OF SYMMETRICALLY ARRANGED VAPOR-GAS BUBBLES

*А.А. Акашев**, *А.В. Решетников*, *В.Г. Пастухов*

Институт теплофизики Уральского отделения РАН,

620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 107а,

**akashev.anton@gmail.com*

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДВУХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПЕРЕГРЕТЫХ СТРУЙ ВОДЫ В УСЛОВИЯХ ВЗРЫВНОГО ВСКИПАНИЯ

Введение. Струи вскипающих жидкостей используются в различных технических устройствах и ряде технологических процессов, в частности, в микроэлектронике, при охлаждении теплонагруженных элементов, в металлургии, пищевых производствах и т.д. Предшествующие опыты по истечению перегретой воды через один канал показали, что форма струи изменяется в зависимости от величины перегрева воды [1]. В условиях высоких перегревов наблюдался полный развал струи – веерное распространение потока, перпендикулярное оси выходного канала. Полный развал струи обусловлен интенсивным объемным вскипанием (взрывное вскипание) при наличии перпендикулярной оси канала прилегающей плоскости за выходным срезом канала. Цель работы – изучение эволюции формы потока при взаимодействии двух струй перегретой воды с увеличением перегрева и характера воздействия интегрального потока на неподвижную преграду.

Организация эксперимента. Проведены опыты по истечению воды из камеры высокого давления в атмосферу через два коротких цилиндрических канала при температурах в интервале 25–275 °С. Каналы расположены на расстоянии 1 мм между их центрами симметрично относительно центральной оси фланца. Диаметры каналов равны 0,5 мм, а длина – 0,7 мм. Для холодных струй воды были реализованы режимы истечения при постоянном давлении от 0,2 до 1 МПа. Перегретые струи истекали при давлении, соответст-

вующем линии насыщения для заданной температуры из указанного интервала. В качестве преграды был использован круглый диск диаметром 12 см, который мог перемещаться в пределах 0–12 см от выхода канала вплоть до его касания. Воздействие на преграду фиксировалось при помощи электронных весов, подключенных к ПК.

Результаты. Наблюдения за эволюцией поведения двух взаимодействующих струй показали, что для струи с преимущественно жидкой сердцевиной (при перегревах $<500\text{ }^{\circ}\text{C}$) столкновение струй происходит на расстояниях 30–40 мм от выходного среза канала. Столкновение струй инициирует их взаимное вскипание (рис. 1). При перегревах в струе выше 50° спонтанное вскипание происходит еще до столкновения струй. Это приводит к тому, что распространение образующейся от вскипания парокапельной среды происходит преимущественно в направлении, перпендикулярном к линии, соединяющей центры каналов. Фотография интегральной струи для этого случая приведена на рис. 2. Аналогичная ситуация с распространением парожидкостной струи наблюдалась при истечении вскипающей воды через щелевой канал [2, 3].



Рис. 1. Столкновение двух струй при истечении при $140\text{ }^{\circ}\text{C}$

В случае одиночного канала при перегревах истекающей воды более $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ имел место полный развал струи с равномерным распределением парожидкостной среды по ортогональной прилегающей плоскости. Добавление еще одного канала приводит к изменению формы разваленной струи. Струя распространяется также вдоль

плоскости выходного фланца, но уже не равномерно во все стороны, а преимущественно перпендикулярно линии, на которой расположены каналы. Эта картина подобна поведению разваленной струи при истечении перегретых жидкостей через щелевой канал.



Рис. 2. Фотография интегральной струи при перегревах свыше 50 °С

Проведены измерения силового воздействия двух взаимодействующих струй на плоскую преграду. Найдено, что величина силы, действующей на преграду, одинакова как для положения преграды до точки взаимодействия струй, так и после нее. Отмечено линейное возрастание силы с ростом начального давления (температуры) в рабочей камере при изменении параметров вдоль линии насыщения. Эти данные соответствуют начальным температурам, при которых не происходит полного развала струи.

В случае полного развала струи в ее окрестности создается область пониженного давления. Проведено качественное зондирование поля давления разваленной струи при помощи дисков различных диаметров. Установлено возрастание притягивающей силы, действующей на приближающийся к разваленной струе диск. Обнаружен эффект перескока разваленной струи с плоскости выходного фланца на плоскость зондирующего диска. Этот перескок отмечается резким изменением притягивающей силы. Показано, что наибольшее разрежение у струи с полным развалом сосредоточено в непосредственной близости к выходу из канала.

Проведенные опыты с двумя взаимодействующими струями вскипающей воды показали ряд особенностей в их поведении по сравнению со струей, истекающей через одиночный канал. Что касается особенностей, связанных с формой струи, то интегральный струйный поток при истечении через два канала напоминает струю, истекающую через щелевой канал. Получены результаты по силовому воздействию двух параллельных взаимодействующих струй воды в условиях интенсивных фазовых превращений на плоскую преграду.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Решетников, А.В., Роечко, В.В., Мажейко, Н.А., Коверда, В.П., Храпцов, С.П., Бусов, К.А., Пряничников, А.В. Взрывное вскипание и полный развал струи перегретой воды // Тепловые процессы в технике. – 2013. – Т. 5. – № 7. – С. 295–302.

2. Мажейко, Н.А., Решетников, А.В., Бусов, К.А., Коверда, В.П., Старостин, А.А., Плотников, Л.В., Жилкин, Б.П., Бродов, Ю.М. Влияние термических и геометрических факторов на распыл жидкости при взрывном вскипании // Тяжелое машиностроение. – 2014. – № 6. – С. 35–40.

3. Reshetnikov, A.V., Mazheiko, N.A., Busov, K.A. Recoil force and spray angle of a plane jet of superheated water // Interfacial phenomena and heat transfer. – 2017. – Vol. 5. – № S3. – Pp. 201–206.

A.A. Akashev^{*}, A.V. Reshetnikov, V.G. Pastukhov

*Institute of Thermal Physics, Ural Branch, Russian Academy
of Sciences, 620016 Russian Federation, Ekaterinburg,*

Amundsena st., 107a,

**akashev.anton@gmail.com*

INTERACTION OF TWO PARALLEL SUPERHEATED WATER JETS UNDER CONDITIONS OF EXPLOSIVE BOILING

П.Д. Алексеев^{1}, И.А. Булатова¹, Ю.Л. Леухин¹*

*¹Северный Арктический федеральный университет
имени М.В. Ломоносова,
163002, Российская Федерация, г. Архангельск,
наб. Северной Двины, 17,
^{*}p.alekseev@narfu.ru*

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕКУПЕРАТИВНЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИМПАКТНЫХ СТРУЙ

Введение. В статье рассматривается повышение тепловой эффективности рекуперативных устройств на основе применения импактного натекания струй в кольцевых каналах с криволинейной поверхностью теплообмена, при котором формируются локальные зоны разрушения приграничного слоя и роста турбулентности, обеспечивающие существенное увеличение коэффициента теплоотдачи [1].

Интенсивность процесса определяется геометрией перфорированной вставки, числом и диаметром отверстий, шагом их расположения и параметром A_f , характеризующим относительную площадь выдува.

Использование импактных струй позволяет интенсифицировать теплообмен со стороны воздуха и дымовых газов [2], снижая металлоемкость аппаратов при сохранении требуемой мощности, однако неравномерность распределения давления и аэродинамическая структура струй требуют комплексного исследования для получения обобщенных зависимостей, пригодных для инженерного расчета.

Методика исследования. Экспериментальное исследование было выполнено на рабочем участке парового калориметра с коль-

цевым каналом и внутренней перфорированной трубой с отверстиями диаметром 2,5–4,5 мм, расположенными по коридорной схеме.

Число отверстий и их расположение варьировались, а результаты обобщались с использованием безразмерного параметра A_f , равного отношению суммарной площади выдувных отверстий к площади теплообменной поверхности. Коэффициент теплоотдачи определялся по тепловому балансу и измеренным температурам стенки и потока.

Численное моделирование выполнено в программном комплексе ANSYS Fluent в постановке RANS с использованием модели турбулентности k - ε Realizable. Расчеты проводились на неструктурированных тетраэдральных сетках с локальным сгущением в области отверстий и у теплообменной поверхности. Верификация осуществлялась сопоставлением средних по поверхности значений коэффициента теплоотдачи, полученных экспериментально и численно. Расхождение не превысило 10–12 %, что подтверждает корректность принятой расчетной схемы и граничных условий.

Результаты исследования. В результате экспериментальных и численных исследований установлено, что средний коэффициент теплоотдачи в кольцевом канале при импактном натекании струй определяется преимущественно безразмерным параметром A_f и числом Нуссельта:

$$A_f = \sum f_{\text{отв}} / F_{\text{пов}}, \quad (1)$$

где $f_{\text{отв}}$ – площадь выдувных отверстий; F – площадь поверхности теплообмена.

Безразмерный параметр A_f определяется как отношение суммарной площади выдувных отверстий $F_{\text{отв}}$ к площади теплообменной поверхности $F_{\text{пов}}$ и характеризует относительную степень перфорации струйной вставки.

Физический смысл параметра заключается в том, что при фиксированном массовом расходе уменьшение A_f приводит к росту ско-

рости истечения струй, интенсификации турбулентного перемешивания в зоне стагнации и, как следствие, к увеличению коэффициента теплоотдачи при одновременном возрастании аэродинамического сопротивления:

$$\text{Nu} = 1,285 \cdot A_f \cdot \text{Re}^{0,61 \cdot A_f^{-0,06}} \cdot \varepsilon_{A_f}, \quad (2)$$

где ε_{A_f} – поправочный множитель, учитывающий плотность расположения отверстий.

Уточненное число Нуссельта представляет собой обобщенный безразмерный критерий теплоотдачи, учитывающий не только число Рейнольдса струй, но и безразмерный параметр A_f , характеризующий относительную площадь выдува перфорированной трубы. В отличие от классической зависимости вида

$$\text{Nu} = A \text{Re}^n \quad (3)$$

коэффициенты A и n выражены через A_f , что позволяет отразить влияние плотности перфорации на структуру струйного течения, взаимодействие струй и перераспределение расхода по длине канала.

При уменьшении A_f возрастает скорость истечения струй, усиливается турбулентное перемешивание в зоне стагнации и наблюдается рост среднего коэффициента теплоотдачи до 40–60 % по сравнению с режимами с большей площадью выдува при одинаковом расходе воздуха. Одновременно фиксируется увеличение коэффициента аэродинамического сопротивления, причем его рост носит степенной характер по A_f . Численное моделирование в постановке RANS подтвердило экспериментальные закономерности. Расхождение расчетных и опытных данных по среднему коэффициенту теплоотдачи не превысило $\pm 12\%$ (рис. 1).

Данное уравнение справедливо в следующих диапазонах изменения режимных и геометрических параметров: $\text{Re} = 873 \dots 19,7 \cdot 10^3$; $A_f = (0,094 \dots 4,257) \cdot 10^{-2}$; $S/d_c = 3,49 \dots 24,92$; $h/d_c = 4,5 \dots 8,1$.

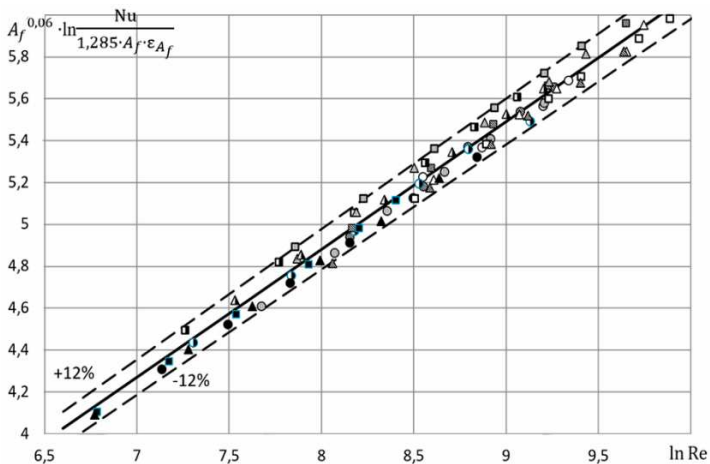


Рис. 1. Результаты обобщения опытных данных (сплошная линия – расчет по уравнению (2))

Разработанные в работе обобщенные зависимости для числа Нуссельта и коэффициента сопротивления позволяют сформировать инженерную методику расчета струйного рекуперативного элемента кольцевого типа на основе параметра A_f и числа Рейнольдса (рис. 2).

Методика предусматривает последовательное определение среднего коэффициента теплоотдачи по уточненной критериальной зависимости:

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, A_f). \quad (4)$$

Расчет требуемой площади теплообмена при заданной тепловой нагрузке и оценке перепада полного давления по полученным степенным соотношениям обеспечивает согласованный учет тепловых и аэродинамических характеристик. Экономическая эффективность ее применения обусловлена возможностью выбора рационального значения A_f , при котором достигается максимальный энергетический эффект при допустимом росте гидравлических потерь.

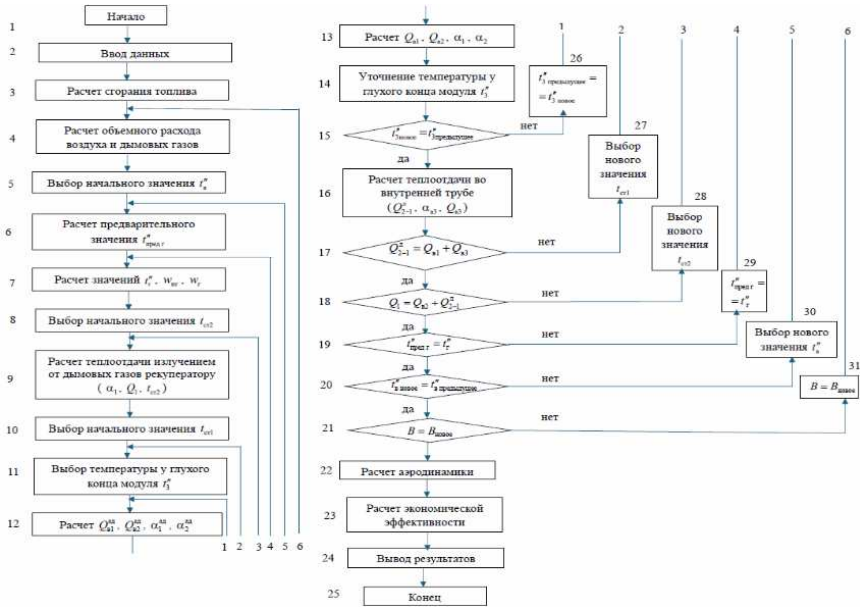


Рис. 2. Блок-схема алгоритма теплового расчета рекуператора

По сравнению с теплотехнологической установкой без рекуператора, где теплота уходящих газов безвозвратно теряется, внедрение струйного рекуператора позволяет повысить температуру подогрева воздуха, снизить удельный расход топлива и уменьшить эксплуатационные затраты, при этом оптимизация параметра A_f обеспечивает наилучшее соотношение прироста теплоотдачи и затрат на прокачку теплоносителя.

Заключение. В работе рассмотрено, что применение технологии импактных струй в кольцевых каналах позволяет существенно интенсифицировать теплообмен в рекуперативных устройствах при управляемом росте гидравлических потерь. Установлена определяющая роль параметра A_f в формировании уровня и равномерности теплоотдачи, а также получены обобщенные зависимости для расчета среднего коэффициента теплоотдачи и сопротивления в исследованных диапазонах режимных и геометрических параметров.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании модульных струйных рекуператоров с повышенной тепловой эффективностью и оптимизированным соотношением тепловой и аэродинамической характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дыбан, Е.П.* Конвективный теплообмен при струйном охлаждении тел / Е.П. Дыбан, А.И. Мазур. – Киев: Наукова думка, 1982. – 304 с.

2. *Терехов, В.И.* Структура течения, турбулентность и теплообмен в импактных струях // Динамика многофазных сред: Тр. 14-й Всерос. семинара, приуроч. к 75-летию акад. РАН Фомина В.М. – Новосибирск, 2015. – С. 88–91.

P.D. Alekseev^{1*}, I.A. Bulatova¹, Yu.L. Leuhin¹

*¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov,
17 Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian
Federation,*

**p.alekseev@narfu.ru*

EFFICIENCY OF RECUPERATIVE DEVICES BASED ON THE INVESTIGATION OF IMPINGING JET TECHNOLOGY APPLICATION

*К.Ю. Арефьев**, *М.А. Абрамов*

*Федеральное автономное учреждение «Центральный институт
авиационного моторостроения имени П.И. Баранова»,
111116, Москва, ул. Авиамоторная, 2,
kyarefev@ciam.ru

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ И ИСПАРЕНИЯ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ КАПЕЛЬ ВОДЫ В ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНОМ ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ

Работа посвящена изучению физического процесса фазового перехода диспергированной жидкости в пар, реализуемому в энергетических и силовых агрегатах, устройствах аэрокосмической техники и различных технологических установках. Важной научной задачей является повышение точности прогнозирования интенсивности фазового перехода диспергированной жидкости в несущем высокоэнтальпийном газовом потоке (при различных условиях течения) посредством математического моделирования.

В работе рассмотрены теоретические и эмпирические подходы при формировании математической модели нагрева и испарения полидисперсных капель воды с диаметрами 5 ... 100 мкм в потоке воздуха с начальной температурой до 600 К и скоростью до 100 м/с при числах Вебера, не превышающих критических значений. Разработанная математическая модель учитывает изменение температуры газа при расходе его начальной энтальпии на нагрев и испарение диспергированной жидкости, а также снижение уровня межфазного конвективного теплообмена при начале испарения жидкости и формировании вблизи капель слоя пара. На основе анализа полученной ранее базы экспериментальных данных установлены значения эмпирических коэффициентов для разработанной математической модели. С целью валидации математической модели проведено детальное сопоставление расчетных данных с ранее опубликованными

экспериментами авторского коллектива [1], а также других исследователей. Представленные уравнения и закономерности могут быть адаптированы для различных режимов теплообмена между диспергированными жидкостями и газами, применяемыми в энергетическом машиностроении.

В результате выполненной работы была разработана физико-математическая модель испарения капель воды в нагретом воздушном потоке, учитывающая полидисперсность капель инжестируемой жидкости, изменение температуры газа при расходе его начальной энтальпии на нагрев и испарение жидкости, а также снижение теплового потока в капле при начале поверхностного испарения. Предложенная математическая модель позволяет обеспечить различия между расчетами и экспериментами не более 7 % для скорости капель, не более 9 % для среднего счетного диаметра капель и не более 6 % для среднего объемно-поверхностного диаметра капель, а также дисперсии распределения. В результате подтверждена возможность дальнейшего применения и последующей адаптации математической модели для различных физических случаев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arefyev, K.Yu., Voronetskiy, A.V., Abramov, M.A., Saveliev, A.S., Nikoporenko, A.V., Pryadko, E.S., Yanovskiy, L.S., Ezhov, V.M. Physical modeling of motion and evaporation of polydisperse water droplets in a high-enthalpy air flow // *Physics of Fluids*. – 2025. – Vol 37. – № 1. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0249689>.

K.Y. Arefyev^{*}, M.A. Abramov

*Central Institute of Aviation Motors, 111116, Russian Federation,
Moscow, Aviamotornaya st., 2*

^{}kyarefev@ciam.ru*

MATHEMATICAL MODEL OF THE MOTION AND EVAPORATION OF POLYDISPERSE WATER DROPLETS IN A HIGH-ENTHALPY AIR FLOW

Д.Д. Артамонова^{1,2}, Ю.Б. Шмельков¹*

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1

²ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д.17,

**art.dashenka@yandex.ru*

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫХОДА И НАКОПЛЕНИЯ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ В ЗАЗОРЕ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА

Актуальной задачей для атомной энергетики является разработка комплексов мер по недопущению развития аварий и борьбе с их последствиями. Основную опасность для населения при авариях на АЭС представляет выброс радиоактивных продуктов деления (ПД), сдерживаемых барьерами безопасности. Первые два барьера – топливная матрица и оболочка тепловыделяющего элемента (ТВЭЛ) – являются критическими на начальных стадиях аварии. Существующие модели для расчета выхода ПД, такие как классическая модель Буса, часто демонстрируют значительные расхождения с экспериментальными данными в условиях высоких температур, характерных для запроектных аварий, что может приводить к некорректной оценке рисков.

В рамках данной работы проведен комплексный анализ процессов переноса ПД топливной таблетке и выхода ПД в зазор ТВЭЛ. Детально рассмотрены программы постоблучательных исследований RISO, Inter-Ramp и Super-Ramp [1], использовавших топливо типа ВВЭР. На основе анализа литературных данных сформированы зависимости для расчета коэффициентов диффузии ПД в широком диапазоне температур, включая условия запроектных аварий. Для оценки влияния различных физических допущений выполнено численное моделирование для трех вариантов модели: базовая модель Буса без учета накопления ПД в зазоре, базовая модель Буса с уче-

том накопления и расширенная модель в рамках сопряжения с тяжелоаварийным кодом МАВР-ТА [2].

Сравнение полученных расчетных результатов с экспериментальными данными показало выраженные различия между подходами. Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что существующие подходы к моделированию выхода ПД требуют дальнейшего развития для корректного описания поведения топлива и процессов деградации оболочек в аварийных условиях. Проведенная работа формирует основу для разработки усовершенствованной модели выхода и накопления ПД под оболочками твэлов, пригодной для применения к новым типам топлива и расширенным диапазонам тепловых нагрузок.

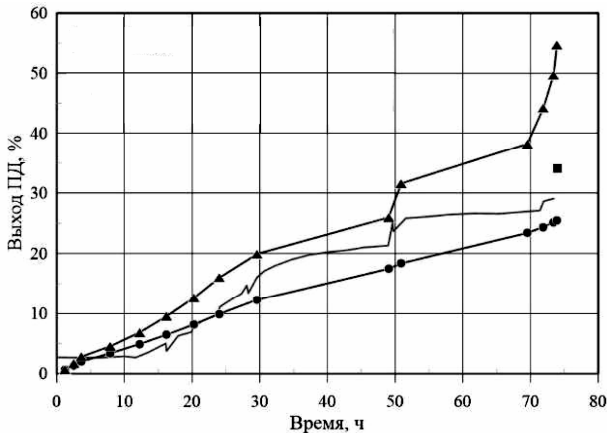


Рис. 1. Выход продуктов деления за время эксперимента AN3 программы RISO: — — моделирование TRANSURANUS; ■ — эксперимент; ● — моделирование

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pizzocria, D., Pastoreb, G., Barania, T., Bruschia, E., Luzzia, L., Van Uffelen, P. Modelling of Burst Release in Oxide Fuel and Application to the Transuranus Code, 2015.

2. *Shmelkov, Yu.B., Zvonarev, Yu.A., Shutov, N.V., Petrov, L.V.*
Development and validation of the MAVR-TA code for analyzing the release and transport of fission products during a severe accident at a nuclear power plant with VVER. Part 1 // Release of fission products from a fuel. NRC «Kurchatov institute», 1, Akademika Kurchatova pl., Moscow 123182, Russia, 2021.

D.D. Artamonova^{1,2*}, Yu.B. Shmelkov¹

¹National Research Center “Kurchatov Institute”,

Russia, 123182, Moscow, pl. Academician Kurchatov, 1

²National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,

Russia, 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya street, 17,

**art.dashenka@yandex.ru*

**NUMERICAL INVESTIGATION OF FISSION PRODUCT
RELEASE AND ACCUMULATION IN THE FUEL
ROD GAP**

Л.Н. Асрутдинова¹, М.А. Щелчкова^{2*}, Р.Р. Миннуллин^{1,2}

¹ВНИИР – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»
г. Казань, ул. 2-я Азинская, 7а

²Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.Н. Туполева-КАИ, 420111 г. Казань,
ул. К. Маркса, 10,

*ShchelchkovaMA@stud.kai.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА ВОДЫ В ОТКРЫТОМ КАНАЛЕ

Помимо реализации режимных и метрологических характеристик исходного эталона единицы объемного расхода сточных вод, важными с точки зрения его эксплуатации и технического обслуживания являются массогабаритные и технико-экономические характеристики. С одной стороны, чем компактнее эталон, тем меньше требуется площадь помещения для его размещения и соответственно меньше затрат у его владельца. С другой стороны, существуют рекомендации по обеспечению заданных гидродинамических характеристик потока воды в открытых каналах, которые указывают на соблюдение минимальных относительных длин прямолинейных участков в открытом канале $L/D_{\text{экр}}$.

В литературных источниках изложены рекомендации и конструкторские подходы к формированию развитого турбулентного профиля скорости при вынужденном течении потока воды в напорных каналах. Однако данные рекомендации и технические подходы не позволяют получить близкий к равномерному профиль скорости потока воды при его течении в открытом канале. Отчасти это обусловлено отсутствием успокоителей потока воды в конструкции бака-успокоителя и профилированного устройства на входе в открытый канал. Это в свою очередь приводит к возникновению в баке-

успокоителе флуктуаций потока воды и резкое его перестроение при истечении в открытый канал. Возникают активные (волновые) колебания с возникновением продольных вихрей на свободной поверхности воды. Колебания поверхности и продольные вихри не затухают на значительных расстояниях от входа в открытый канал, вызывая искажение профиля скорости потока воды даже при его значительных относительных длинах $L/D_{\text{экв}} \geq 100$.

Поэтому важным аспектом при проектировании макета эталона являлось обеспечение в открытом канале небурного изотермического потока воды ($Fr \leq 1$ при $Re = 2 \cdot 10^5$). Небурный изотермический поток воды в лотке характеризуется площадью живого сечения ω и смоченным периметром χ . Важными режимными характеристиками являются средняя расходная скорость w и объемный расход воды Q_v . Характерным признаком плоского живого сечения ω открытого канала является формирование такого профиля скорости, в котором локальные значения скорости w_i воды во всех точках живого сечения мало (на 5–10 %) отличаются от средней расходной скорости w .

Локальные значения скорости потока воды w_i определялись с использованием батареи из семи трубок Пито. Батарея трубок Пито располагалась поочередно в шести поперечных сечениях открытого канала с относительной длиной $L/D_{\text{экв}}$ от 3 до 100 и перемещалась в поперечном сечении открытого канала по координате x_i с шагом 0,01 м от минимального значения $x_1 = 0,0015$ м до максимального значения $x_{\text{max}} = h$ (где h – глубина потока воды в исследуемом сечении).

Результаты экспериментальных исследований локальных значений скорости потока воды в поперечном сечении $L/D_{\text{экв}} = 100$ открытого канала при максимальном значении объемного расхода воды $Q_v = 100 \text{ м}^3/\text{ч}$ подтвердили формирование развитого турбулентного профиля скорости потока воды (близкого к двумерному), который удовлетворительно описывается классическим степенным законом распределения $x_i/h = (w_i/w_{\text{max}})^{1/7}$. Экспериментально под-

тверждено, что практически в каждой точке поперечного сечения локальные значения скорости w_i потока воды примерно равны значению средней расходной скорости w потока воды.

Технические решения по минимизации флуктуаций потока в баке-успокоителе, установка хонейкомба и профилированного входного устройства в комплексе позволили сформировать на входе в открытый канал небурный поток воды с минимальным уровнем колебаний свободной поверхности и обеспечить оптимальные гидродинамические характеристики потока воды в исследованном сечении $L/D_{\text{экв}} = 100$ для установки поверяемого (калибруемого) средства измерений объемного расхода сточных вод.

L.N. Asrutdinova¹, M.A. Shchelchkova^{2*}, R.R. Minnullin^{1,2}

*¹VNIIR – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleyev Institute
for Metrology, Russian Federation, Tatarstan, 420088 Kazan,
2nd Azinskaya st., 7a*

*²Kazan National Research Technical University
named after A.N. Tupolev-KAI,
420111 Russian Federation, Tatarstan, Kazan, K. Marksa st., 10,
ShchelchkovaMA@stud.kai.ru

**INVESTIGATION OF HYDRODYNAMIC
CHARACTERISTICS OF WATER FLOW
IN AN OPEN CHANNEL**

А.К. Ахметзянов^{}, Н.Д. Пашкова, В.М. Молочников*

¹*Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН», 420111, Казань, ул. Лобачевского, 2/31, а/я 261*

²*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ,*

420111 г. Казань, ул. К. Маркса, 10,

^{}ahmetzianov.a.k@yandex.ru*

ВЛИЯНИЕ ЗАКРУТКИ ПОТОКА НА ТЕЧЕНИЕ В РАЗВЕТВЛЯЮЩЕМСЯ КАНАЛЕ

Исследование влияния закрутки потока на входе в разветвляющийся канал имеет широкую применимость. Это объясняется тем, что такие каналы распространены как в технических системах (например, в теплообменниках), так и в природе, в том числе в кровеносной системе. В связи с этим были проведены исследования влияния закрутки потока на характер течения жидкости, протекающей по таким каналам.

Сравнительные эксперименты проводились на различных ламинарных значениях числа Рейнольдса ($Re = 240 - 1640$) с наличием и отсутствием входной закрутки, создаваемой лопаточным завихрителем. Условные обозначения каналов и направления течения жидкости представлены на схеме (рис. 1). Диаметр трубок канала составлял $d = 17,4$ мм, в качестве жидкости использовался водный раствор глицерина с вязкостью $\nu = 7,85 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Распределение расходов по каналам разветвления задано равным.

Для начала рассмотрим течение при отсутствии входной закрутки (на входе профиль Пуазеля). В канале $Q1$ на стенке, противоположной от разветвления, формируется область отрыва потока 1 (рис. 2, *a*) с обратными или нулевыми скоростями. В канале $Q2$ формируется аналогичная отрывная зона 2 , имеющая свое начало у тупого угла. Эти области имеют трехмерную структуру, а на их грани-

цах формируются вихри, которые далее сносятся вниз по потоку. Размеры данных зон варьируются в зависимости от числа Рейнольдса, но характер течения остается неизменным.

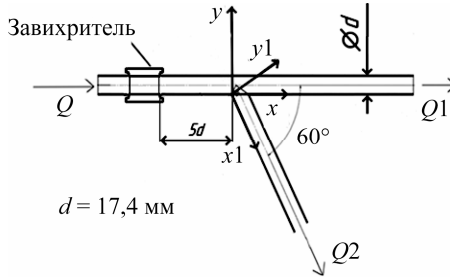


Рис. 1. Схема участка

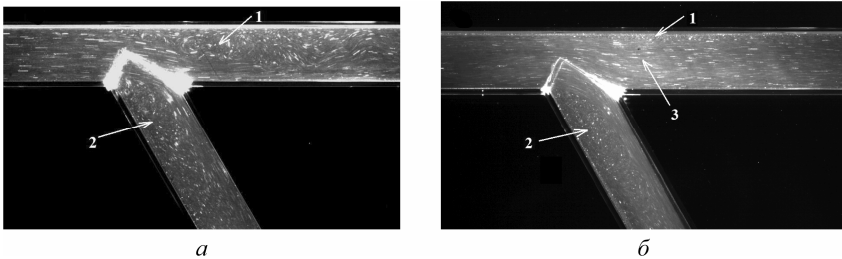


Рис. 2. Визуализация течения при $Re = 1200$: а – отсутствие входной закрутки; б – наличие входной закрутки

Далее проведем исследование течения при наличие входной закрутки. Параметры интенсивности закрутки для каждого из рассматриваемых чисел Рейнольдса были получены из более ранних исследований, результаты которых были опубликованы в работе [1]. При $Re < 1200$ (например рис. 3, а), характер течения аналогичен течению без закрутки: также имеются отрывные зоны 1 и 2 (канал Q_1 и Q_2). Однако размеры области 1 значительно снижаются при наличии входной закрутки, в то время как в канале Q_2 она увеличивается, что может являться негативным фактором при исследованиях сердечно-сосудистой системы (канал Q_2 в данном

случае будет имитировать шунт, в котором наличие застойной зоны может провоцировать нарастание внутренней поверхности сердечного канала и, следовательно, уменьшение его просвета). При более больших числах Рейнольдса ($Re > 1200$) (например, рис. 3, б) структура течения в канале $Q1$ существенно меняется. Отрывная зона на стенке полностью исчезает, а вместо нее в формируется так называемая зона «дефекта» скорости 3 – трехмерная застойная область, расположенная на оси канала или немного смещенная от нее, обтекаемая основным высокоскоростным потоком. Подробное исследование данного явления будет основной для дальнейших экспериментов, однако наиболее вероятное объяснение данного феномена – результат разрушения вихря, где наблюдаются схожие физические процессы [2].

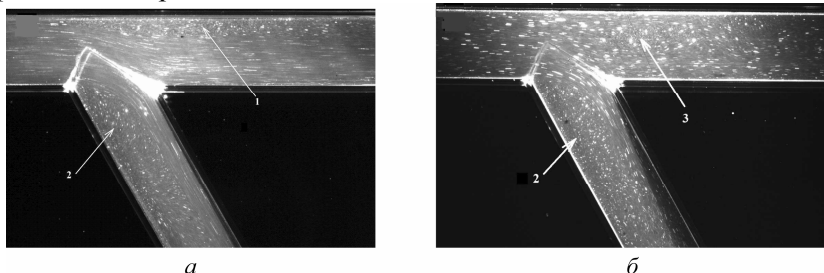


Рис. 3. Визуализация течения с наличием входной закрутки на разных числах Рейнольдса: *a* – $Re = 800$; *б* – $Re = 1640$

По результатам визуализации при $Re = 1200$ отрывная зона *1* практически полностью исчезает, а зона *3* еще не успевает сформироваться (см. рис. 2, б). Однако при более подробном изучении канала $Q1$ с помощью полевого оптического метода SIV были получены профили скорости (рис. 4, а), в которых на расстоянии $x/d \approx 1,5 \dots 2,75$ и высоте $y/d \approx 0,5 \dots 0,85$ от начала координат (тупого угла) можно увидеть зону с более низкими значениями скоростей, чем у основного течения. Для подтверждения корректности полученных данных было проведено повторное исследование данного течения в другой день и полученные данные совпали с высокой точностью (рис. 4, б).

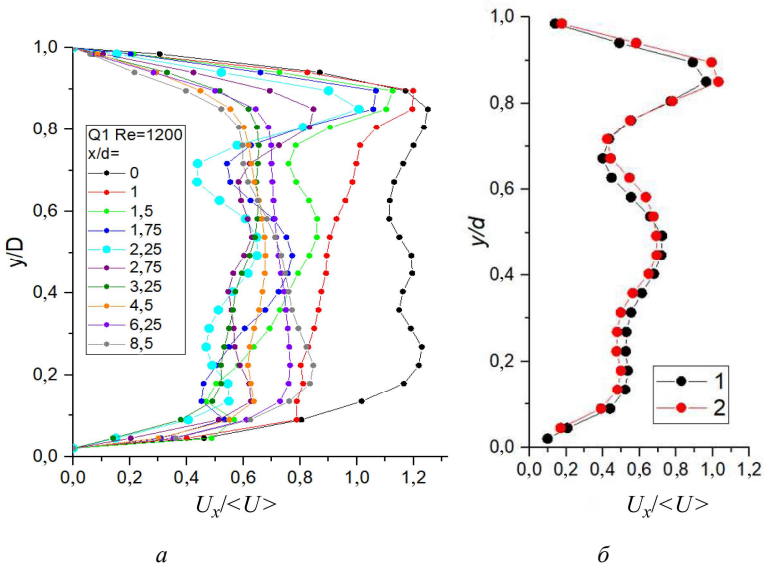


Рис. 4. Профили скорости в ответвлении $Q1$ при $Re = 1200$: a – на различном удалении от начала координат; b – в зоне «дефекта» скорости на расстоянии $x/d = 2$ в различные дни: 1 – первый и 2 – повторный эксперименты

В результате этого можно сделать вывод, что закрутка потока увеличивает размер отрывной области 2 в канале $Q2$, а в канале $Q1$ уменьшает ее 1 по мере увеличения числа Рейнольдса до $Re = 1200$, далее на этом числе Рейнольдса происходит одновременное существование зоны отрыва и зарождающейся зоны «дефекта» скорости 3, а при $1200 < Re < 1640$ остается только последняя область (3).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта № 25-19-00133.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Молочников, В.М. Пашкова, Н.Д. Паерелий, А.А. Эволюция закрученного потока в круглой трубе после лопаточного завихрителя при умеренных числах Рейнольдса // Теплофизика и аэромеханика. – 2025. – Т.32. – № 4. – С. 667–682.

2. *Lucca-Negro, O., O'Doherty, T. Vortex breakdown: a review // Progr. Energy Combust. Sci. – 2001. – Vol. 27. – Pp. 431–481.*

A.K. Ahmetzianov^{*}, N.D. Pashkova, V.M. Molochnikov

¹Federal State Budgetary Institution of Science «Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences», 420111 Russian Federation, Tatarstan, Kazan, Lobachevskogo st., 2/31

*²Kazan National Research Technical University
named after A.N. Tupolev-KAI,*

*420111 Russian Federation, Tatarstan, Kazan, K. Marksa st., 10,
^{*}ahmetzianov.a.k@yandex.ru*

**EFFECT OF INLET SWIRL ON THE FLOW
IN A BRANCHING CHANNEL**

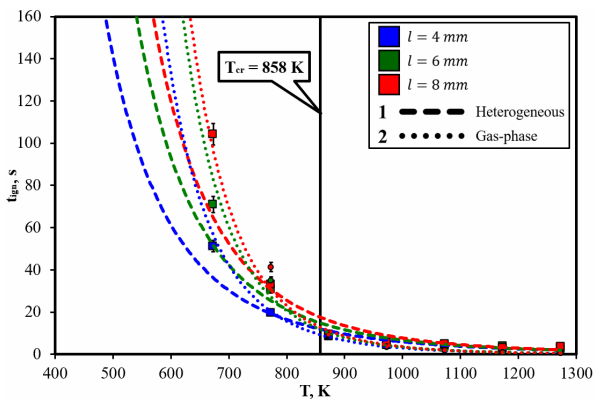
А.А. Баранова^{1}, С.В. Сыродой¹, Ж.А. Солодовникова¹,
Д.К. Сенчихин¹*

*¹Национальный исследовательский Томский политехнический
университет, 634050, Томск, проспект Ленина, 30,
nastia.kostoreva@yandex.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕТЕРОГЕННОГО И ГАЗОФАЗНОГО ЗАЖИГАНИЯ ЧАСТИЦ ТИПИЧНЫХ БИОТОПЛИВ

На рис. 1 приведены результаты экспериментального исследования в виде зависимостей времен задержек зажигания (газофазного и гетерогенного) частицы древесины (кедр) кубической формы от температуры окислителя при варьировании характерного размера. По результатам экспериментальных исследований определена граница раздела режимов зажигания по температуре окислителя для кедр: $T_{cr} < 858$ К – гетерогенный режим зажигания, при $T_{cr} > 858$ К – газофазный режим зажигания. При этом надо отметить, что такая тенденция сохраняется для всех исследуемых размеров древесных частиц, т.е. можно сделать обоснованный вывод о том, что размер частицы древесной биомассы в диапазоне характерных размеров $L = 4\div 8$ мм не влияет на границу режимов зажигания. Переходный процесс от гетерогенного режима зажигания в газофазный обусловлен следующим: в условиях относительно низких температур окислителя термическая подготовка частицы топлива к зажиганию протекает при относительно малых скоростях нагрева. В результате термическое разложение и, соответственно, выход летучих также протекают относительно медленно. Последнее приводит к тому, что газообразные продукты термического разложения не воспламеняются, а медленно накапливаются в малой окрестности топливной частицы в камере горения. В то же время термическое разложение приводит к формированию на поверхности топлива коксового остатка

с высоким содержанием углерода. При прогреве такой пиролизированной поверхности древесины до критических температур происходит зажигание кокса, что приводит к воспламенению горючей смеси «летучие – кислород воздуха». В период нагрева в условиях относительно высоких температур внешней среды процесс воспламенения частицы топлива протекает по противоположному сценарию. При высокотемпературном нагреве в частице быстро начинается процесс термического разложения, приводящий к интенсивному выходу летучих. Последние вдуваются в пристенную газовую область, где перемешиваются с нагретым до высоких температур окислителем. В результате происходит быстрое воспламенение газообразных продуктов пиролиза еще до полной пиролизации основного массива топлива. При этом горящий факел летучих приводит к интенсификации процесса нагрева поверхности частицы древесины, что способствует ускорению процесса термического разложения и, соответственно, к гетерогенному зажиганию топлива. Также на приведенных зависимостях (рисунок) хорошо видно, что кривые гетерогенного и газофазного режимов зажигания лежат эквидистантно относительно друг друга для трех исследуемых размеров частиц (4, 6 и 8 мм).



Зависимости времен задержек (газофазного и гетерогенного) зажигания частицы кедр от температуры окислителя для различных характерных размеров

По результатам проведенных экспериментов детально изучены оба режима зажигания частицы древесины. Впервые установлены два режима воспламенения (гетерогенный и газофазный) с условной границей раздела по температуре внешней среды $T_{cr} = 858$ К. Показано, что при высоких температурах (при $T > 858$ К) окислителя частицы древесины из кедра зажигаются, как правило, в газовой фазе. При меньших температурах ($553 < T < 858$ К) зажигание носит, как правило, гетерогенный характер. Результаты экспериментов показали, что характерный размер (от 4 до 8 мм) частиц кедра кубической формы не влияет на границу раздела режимов зажигания, которая составляет по температуре окислителя $T_{cr} = 858$ К.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 25-79-00127).

***A.A. Baranova^{1*}, S.V. Syrodoy¹, Zh.A. Solodovnikova¹,
D.K. Senchikhin¹***

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk Polytechnic University, TPU, 634050 Russian Federation, Tomsk, Lenin Avenue, 30,

**nastia.kostoreva@yandex.ru*

**EXPERIMENTAL STUDY OF HETEROGENEOUS
AND GAS-PHASE IGNITION OF PARTICLES
OF TYPICAL BIO-FUELS**

*Н.И. Батура**, *Г.Г. Гаджимагомедов*, *Ю.Н. Галанская*,
А.Я. Чудаков

*«Центральный аэрогидродинамический институт
им. проф. Н.Е. Жуковского», 140181, г. Жуковский, Россия,
nikolay.batura@tsagi.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА АЭРО- ДИНАМИЧЕСКИЕ И ТЕПЛООБМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУИ ВОЗДУХА

Один из существенных факторов, определяющих конструкцию аэродинамических труб (АДТ) с открытой рабочей частью, – наличие свободной затопленной струи рабочего потока, от которой в значительной степени зависит качество получаемых экспериментальных данных, а также решение сложной технической задачи охлаждения установки.

Турбулентные струи достаточно давно являются объектом пристального внимания исследователей, что определяется их широким практическим применением [1]. Как известно, на поверхности струи формируется область конечной толщины (слой смешения или струйный турбулентный слой), в котором возникают вихревые структуры, движущиеся вдоль потока. Вследствие этого в указанной области происходит интенсивный перенос массы, импульса, тепла. На практике часто возникает необходимость целенаправленного воздействия на структуры слоя смешения и его характеристики. Иногда это связано с необходимостью дополнительной турбулизации струи по сравнению с ее естественным уровнем, в частности, для интенсификации теплообмена или повышения эффективности смешения сред [2]. Иногда приходится решать противоположную задачу, например, когда необходимо получить рабочую струю в откры-

той рабочей части аэродинамической трубы с высокими требованиями по однородности и стабильности рабочего потока.

Значительное количество работ по исследованию свободных затопленных струй выполнено в 30–40-х годах прошлого века и было связано с интенсивным развитием экспериментальной базы дозвуковой аэродинамики. Актуальность этой темы не уменьшилась и в дальнейшем в связи с разработкой новых аэродинамических труб, а также модернизацией имеющихся для получения более высоких скоростей рабочего потока и его качества по сравнению с реализованными ранее [3,4].

В данной работе приводятся результаты исследования различных пассивных методов воздействия на структуру турбулентного слоя рабочей струи с целью разработки технологии создания однородного высокоскоростного потока в открытой рабочей части АДТ. Проведено комплексное исследование структуры течения струи с применением современных методов расчета и диагностики течений. Для проведения экспериментальных исследований в работе использовались следующие средства измерений: метод цифровой трассерной визуализации (PIV), термоанемометр постоянного сопротивления, микрофон. В результате PIV-измерений получены мгновенные поля скорости в центральном сечении трубы в плоскостях XY и XZ для различных модификаций конфигурации рабочей части.

Расчетные исследования проводились с использованием программного комплекса ANSYS Fluent, позволяющего решать уравнения Навье – Стокса, осредненные по методу Рейнольдса.

Экспериментальная часть работы проводилась в АДТ ЦАГИ замкнутого типа с открытой рабочей частью с соплом прямоугольного сечения размером 575×370 мм со скошенными углами, длиной струи $L = 1300$ мм. В рамках проводимого исследования скорость рабочего потока изменялась в диапазоне (10 ... 45) м/с.

Исследовались пульсации скорости в слое смешения начального участка рабочей струи АДТ с различными модификациями выходных кромок сопла:

- сопло без вихрегенераторов (базовая конфигурация);
- сопло с вихрегенераторами в виде пластинок треугольной формы, равномерно распределенными по периметру сопла; угол установки пластинок по отношению к направлению потока на выходе из сопла, а также глубина входа пластинок в поток варьировались;
- сопло с двумя плоскими прямоугольными пластинами, установленными симметрично по всей длине верхней и нижней кромок сопла; угол установки пластин по отношению к направлению потока на выходе из сопла, а также глубина входа пластин в поток варьировались.

В ходе проведенных исследований в рассмотренном диапазоне скоростей рабочего потока определен вариант оптимальной компоновки геометрии выходными кромками сопла и входного устройства диффузора, обеспечивающий возможность получения в ядре рабочей струи равномерного потока за счет снижения уровня пульсаций в слое смешения. Важным фактом при проектировании элементов рабочего тракта АДТ является то, что рассмотренная геометрия кромки сопла в виде равномерно распределенных треугольных пластинок практически не изменяет локализации слоя смешения струи, а также не приводит к росту ее сопротивления, а при определенных условиях несколько снижает его. Экспериментально показано, что указанное обстоятельство не приводит к заметному ухудшению теплообмена струи с окружающей средой, а также приводятся результаты обобщения полученных экспериментальных зависимостей.

На основе проведенного расчетного исследования предлагается способ организации течения в рабочей части перспективной дозвуковой АДТ с акустической камерой, который обеспечивает увеличение скорости рабочего потока на 10-20 % (без увеличения мощности привода) по сравнению с обычно используемыми компоновками

рабочих частей и возможность охлаждения рабочего газа в контуре трубы за счет воздухообмена с внешней средой, что представляет известную проблему для АДТ с акустической камерой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамович, Г.Н.* Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович – Москва: Физматгиз, 1960. – 715 с.

2. *Жданов, В.Г.* Влияние формы и размеров вихревых генераторов на смешение струйных ограниченных течений // ММФ – 2016: XV Минский междунар. форум по тепло- и массообмену: тез. докл. и сообщ. 23-26 мая 2016 г. – Минск: Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2016. – Т. 1. – С. 88–93.

3. *Стрелков, С.П., Бендриков, Г.А., Смирнов, Н.А.* Пульсации в аэродинамических трубах и способы демпфирования их // Труды ЦАГИ. – 1946. – № 593. – С. 36–45.

4. *Батура, Н.И., Вождаев, В.В., Гаджимагомедов, Г.Г., Липатов, И.И.* Структура слоя смешения струи в аэродинамической трубе с открытой рабочей частью // Ученые записки ЦАГИ. – 2017. – Т. XLVIII. – № 8. – С. 26–36.

***N.I. Batura^{*}, G.G. Gadzhimagomedov, Yu.N. Galanskaya,
A.Ya. Chudakov***

*Central Aerohydrodynamic Institute named after Prof. N.E. Zhukovsky,
140181, Zhukovsky, Russia,*

**nikolay.batura@tsagi.ru*

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF VARIOUS
METHODS ON AERODYNAMIC AND HEAT-EXCHANGE
CHARACTERISTICS OF A TURBULENT AIR JET**

В.С. Бердников¹, К.А. Митин^{1}, С.А. Кислицын¹,
В.А. Гришков¹*

*¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 1
mitin86@mei.ru

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ГРАВИТАЦИОННО-КАПИЛЛЯРНОЙ КОНВЕКЦИИ НА СОПРЯЖЕННЫЙ ТЕПЛООБМЕН ПРИ РОСТЕ КРИСТАЛЛОВ МЕТОДОМ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Метод горизонтальной направленной кристаллизации (ГНК) – один из основных методов выращивания многофункциональных монокристаллов из расплавов. Моделью технологического процесса ГНК является процесс кристаллизации расплава в прямоугольной полости с нагретыми до разных температур вертикальными стенками без или при наличии продольного градиента температуры на горизонтальных границах. В методе ГНК зарождение и рост кристалла происходят при охлаждении одной из стенок ниже температуры кристаллизации в условиях сопряженного конвективного теплообмена на фронте кристаллизации (ФК). В зависимости от условий на верхней границе слоя расплава процесс кристаллизации происходит в режимах нестационарной термогравитационной или тепловой гравитационно-капиллярной конвекции. От этого зависят характеристики потока нагретого расплава, натекающего на ФК, и особенности локального теплообмена на ФК. От этих особенностей зависят также формы ФК, поля температуры и градиентов температуры в кристалле. От условий формирования ФК зависит кристаллографическое качество монокристалла. Исследования гидродинамики и конвективного теплообмена в реальных технологических условиях сложны, поэтому для понимания физической сути процессов сложного со-

пряженного теплообмена при росте кристаллов используется физическое и численное моделирование. Экспериментальные исследования на физических моделях метода ГНК проводятся с использованием прозрачных жидкостей имитаторов расплавов, например расплава гептадекана и воды. Гептадекан кристаллизуется при 21,8 °С. Используя хорошо отработанные методы визуализации и цифровой видеосъемки, можно исследовать гидродинамику в режимах реальной кристаллизации и наблюдать влияние режимов течения на мгновенные формы ФК. При этом термопарными зондами контролируются характеристики поля температуры в расплаве и растущем кристалле.

Использование воды как жидкости – имитатора расплава при физическом и численном моделировании конвективного теплообмена при ГНК – обусловлено инверсной зависимостью ее плотности от температуры в окрестности 4 °С. Аналогичными зависимостями обладают расплавы, например, галлия и эвтектики кадмий-ртуть-теллур и некоторых других веществ и материалов. Инверсная зависимость плотности расплава от температуры вблизи температуры кристаллизации влияет на гидродинамику у фронта кристаллизации, локальные тепловые потоки и форму ФК.

Выполнено экспериментальное и численное моделирование нестационарного сопряженного конвективного теплообмена и его влияния на формы фронтов кристаллизации гептадекана и воды. Моделирование кристаллизации воды выполнено с учетом инверсной зависимости плотности от температуры. Результаты численного моделирования сопоставлены с данными физического эксперимента и существенно дополняют эксперимент данными о полях температуры в жидкости и твердом теле на разных этапах роста кристалла. Задачи решались в нестационарной двумерной сопряженной постановке в декартовых координатах с учетом теплоты кристаллизации. Использован метод конечных элементов с адаптивной треугольной сеткой, отслеживающей положение фронта кристаллизации на каждом временном шаге и со сгущением с обеих его сторон, а также

у других границ расчетной области. Геометрии расчетных областей подобны рабочим участкам экспериментальных стэндов. Конвективный теплообмен в жидкости описывается безразмерной системой уравнений Навье – Стокса и энергии в приближении Буссинеска, записанной в терминах температура, вихрь и функция тока. Кондуктивный теплообмен в кристалле описывается уравнением теплопроводности. При свободной верхней границе расплава расчеты проводились без и с учетом термокапиллярного эффекта (ТКЭ). Изучена относительная роль сил плавучести и ТКЭ в формировании пространственной формы течения и на процессы ламинарно-турбулентных переходов. Исследовано влияние высот слоев расплавов, нестационарных полей температуры в нижней стенке различной толщины, конвективного теплообмена в слое газа над свободной поверхностью расплава. Полученные численные результаты качественно совпадают с данными физического эксперимента, проведенного параллельно с численным моделированием. Полученные данные могут быть полезны при анализе процессов роста кристаллов методом горизонтально направленной кристаллизации веществ.

V.S. Berdnikov¹, K.A. Mitin^{1*}, S.A. Kislitsyn¹, V.A. Grishkov¹

*¹Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia
mitin86@mpei.ru

**INFLUENCE OF GRAVITATIONAL-CAPILLARY
CONVECTION REGIMES ON CONJUGATE HEAT
TRANSFER DURING CRYSTAL GROWTH
BY THE HDC METHOD**

Н.О. Борцев¹, А.В. Кочегарова^{1,2*}, Р.Ф. Рахимов¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

111250 г. Москва, ул. Красноказарменная, 14, стр. 1,

²Объединенный институт высоких температур РАН,

125412 Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2,

*a-kochegarova1289@mail.ru

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ АКСИАЛЬНОЙ ТЕПЛОВОЙ ТРУБЫ И ОЦЕНКА ЕЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

В современных системах терморегулирования промышленных аппаратов все чаще используются двухфазные системы обеспечения теплового режима, в частности аксиальные тепловые трубы (АТТ) [1, 2]. Устройство представляет собой герметичную трубу, частично заполненную рабочей жидкостью, и работает по принципу «испарение-конденсация». Они используются для термостатирования и отвода тепла от электронных компонентов и энергетических установок. Применение АТТ позволяет эффективно решать проблемы неравномерности температурного поля и повышать энергоэффективность процессов [3].

В данной работе разработана теплогидравлическая физико-математическая модель АТТ на жидкометаллическом теплоносителе. Модель учитывает пространственное распределение параметров по длине трубы – поле температур, давление и скорость.

Для проверки точности разработанной модели была проведена валидация на основе классического эксперимента М.Н. Ивановского, задачей которого было экспериментально определить предельные энергетические характеристики и критические режимы работы АТТ [4]. Результаты эксперимента М.Н. Ивановского сопоставля-

лись с экспериментальными данными распределения температурного поля по длине трубы при подводимой мощности 315 Вт при длине зоны конденсации 200 мм и при подводимой мощности 560 Вт при длине зоны конденсации 350 мм. Максимальное отклонение расчетных данных от экспериментальных составило $\sim 7^\circ\text{C}$ ($\sim 3\%$).

Была проведена нестационарная экспериментальная тепловая отработка натриевой аксиальной тепловой трубы в зависимости от ориентации вектора силы тяжести при задании ступенчатой циклограммы, подводимого теплового потока к испарительной зоне. Нагрев испарительной зоны осуществлялся с помощью намотанной нихромовой ленты, на которую подавалось напряжение.

На основе валидированной модели был проведен полный анализ максимальной теплопередающей способности АТТ с целью оценки ее эксплуатационных характеристик в зависимости от ориентации относительно вектора силы тяжести [5], а также решена оптимизационная задача в экстремальной постановке по выбору проектных параметров АТТ при ограничениях на изотермичность и массогабаритные параметры трубы методом генетической эволюции на основании отвалидированной модели АТТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chen, Q., Zhou, J., Zhou, G., et al.* A Comprehensive Review of Thermal Performance Improvement of High-Temperature Heat Pipes // *Journal of Thermal Science.* – 2024. – Vol. 33. – No. 2. – Pp. 625–647.

2. *Lee, Seungjae, Sukkyung, Kang, et al.* Thermal design framework of heat pipe heat exchanger for efficient waste heat recovery // *Energy.* – 2025. – Vol. 318. – P. 134731.

3. *Yun, M., et al.* Design and fabrication of heat pipes using additive manufacturing for thermal management // *Applied Thermal Engineering.* – 2024. – Vol. 236. – P. 121561.

4. Pan, R., Zhang, K., Wang, W., et al. Heat transfer characteristics analysis of heat pipe based on COMSOL // Annals of Nuclear Energy. – 2024. – Vol. 204. – Pp. 110 – 549.

5. Maydanik, Y.F., Vershinin, S.V. Development and tests of ammonia miniature loop heat pipes with cylindrical evaporators // Applied Thermal Engineering. – 2009. – Vol. 29. – № 11-12. – Pp. 2297–2301.

N.O. Borshchev¹, A.V. Kochegarova^{1,2*}, R.F. Rakhimov¹

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Krasnokazarmennaya st., 14, b. 1, Moscow, 111250, Russia

²Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Izhorskaya st., 13, b. 2, Moscow, 125412, Russia,

**a-kochegarova1289@mail.ru*

**DEVELOPMENT OF AN AXIAL HEAT PIPE MODEL
AND ASSESSMENT OF ITS OPERATIONAL
CHARACTERISTICS**

В.В. Бухмиров^{*}, И.И. Светушков

Ивановский государственный энергетический университет

им. В.И. Ленина,

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34,

**baob6095@mail.ru*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОКЛИМАТА ГЛАВНОГО КОРПУСА ТЭС В ППК ANSYS

Введение. Главный корпус тепловых электрических станций (ТЭС) характеризуется значительными тепловыделениями, сложной геометрией и неравномерной организацией воздухообмена. Микроклимат главного корпуса станции оказывает влияние на условия труда персонала, величину тепловых потерь здания и эффективность работы энергетического оборудования. Проведение натурных измерений дает информацию о фактическом состоянии микроклимата [1], но не позволяет прогнозировать изменение температурных и влажностных режимов при изменении электрической нагрузки и погодных условий. В этой связи математическое моделирование тепловоздушного режима является практически единственным инструментом анализа и совершенствования микроклимата главного корпуса тепловой станции.

Методы исследования. Цель работы – построение и верификация трехмерной нестационарной математической модели тепловоздушного режима главного корпуса ТЭС. Объектом исследования является главный корпус Ивановской ТЭЦ-2. Здание представляет собой крупногабаритное промышленное сооружение, микроклимат которого определяется тепловыделениями работающего оборудования, забором воздуха на горение, притоками наружного воздуха, теплопередачей через ограждающие конструкции, гравитационной

конвекцией, радиационным теплообменом и выделением летучих органических веществ.

Реализация математической модели выполнена в программном вычислительном комплексе ANSYS Fluent. Расчет параметров микроклимата исполнен численным методом (метод конечных объемов) решения системы дифференциальных уравнений переноса энергии, массы и импульса для вязкого сжимаемого газа, в результате которого были определены температурное поле, поле скорости и влажности воздуха, а также распределение концентрации водорода в объеме главного корпуса тепловой станции при заданных условиях однозначности, найденных экспериментально для условий работы Ивановской ТЭЦ-2. Предварительно была разработана геометрическая модель главного корпуса также в ПБК ANSYS согласно проекту станции [2]. Массовый расход воздуха на процесс горения котлоагрегатов определяется по фактической паровой нагрузке котла и режимным картам. Физические свойства материалов и газов были заданы по справочным материалам теплофизических свойств. Для описания турбулентных свойств внутренней среды в результате методических расчетов была выбрана SST $k-\omega$ модель турбулентности, а для описания излучения – модель радиационного теплообмена P1.

Результаты моделирования. В результате методических расчетов была выбрана сетка, состоящая из 6,1 миллионов узлов. При этом в области больших градиентов параметров сетка была принята неравномерной. Адекватность математической модели микроклимата главного корпуса Ивановской ТЭЦ-2 была проверена сравнением с данными экспериментального исследования тепловоздушного режима, выполненными в период с апреля 2023 года по февраль 2026 года при изменении температуры окружающей среды в диапазоне от $-24,0$ до $+24,0$ °С. В результате сравнения расчетных и экспериментальных значений температуры, влажности и концен-

трации летучих примесей в 30 контрольных точках на четырех отметках (0,00; 8,00; 16,00; 25,60 м) около котлоагрегатов по высоте корпуса было получено удовлетворительное совпадение данных параметров, которое можно оценить погрешностью от 1 до 12 %. При этом среднее отклонение результатов расчета и эксперимента составило 3,7 %. На отметке 8,00 м (место расположения долгосрочного пребывания персонала станции) абсолютное отличие температуры и влажности в контрольных точках составляет не более 3,4 °С и 3,7 % соответственно, а на отметке 16,00 м экспериментальное и расчетное значения концентрации летучих органических веществ (водорода) составили 2,613 и 2,429 мг/м³, что свидетельствует об адекватности разработанной математической модели микроклимата.

Выводы. 1. Разработана трехмерная нестационарная математическая модель микроклимата главного корпуса тепловой электрической станции, которая верифицирована для условий работы Ивановской ТЭЦ-2. Максимальная погрешность расчетных и экспериментальных параметров микроклимата не превышает 12 %.

2. Математическая модель тепловоздушного режима в главном корпусе тепловой электрической станции может быть использована для разработки мероприятий по совершенствованию микроклимата и энергосберегающих мероприятий с целью уменьшения затрат на собственные нужды станции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бухмиров, В.В., Светушков, И.И., Бушуев, Е.Н., Темлянцева, Е.Н., Родионова, М.В. Экспериментальное исследования микроклимата на ТЭЦ // Вестник ИГЭУ. – 2023. – № 6. – С. 13 – 22.

2. Бухмиров, В.В., Бушев, Е.Н., Светушков, И.И., Темлянцева, Е.Н., Долинин, Д.А. Геометрическая модель главного корпуса Ивановской ТЭЦ-2 в ПВК Ansys // Вестник ИГЭУ. – 2024. – № 4. – С.15 – 21.

V.V. Bukhmirov^{*}, I.I. Svetushkov

*Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin,
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya Street, 34,
^{*}ba06095@mail.ru*

**MATHEMATICAL MODELING
OF THE MICROCLIMATE OF THE MAIN BUILDING
OF THE TPP IN ANSYS PVK**

А.А. Валеев^{}, Н.С. Душин, И.В. Никифоров*

*Федеральный исследовательский центр Казанский научный центр
РАН, 420111, Казань, ул. Лобачевского, 2/31, а/я 261,
^{*}valei93@mail.ru*

УСКОРЕНИЕ ТУРБУЛИЗАЦИИ ТЕЧЕНИЯ В УСТРОЙСТВАХ ПОДГОТОВКИ ПОТОКА

Интерес к методам управления гидродинамическими характеристиками течения в различных областях науки и техники существует давно. В расходомерии первые высказывания о необходимости коррекции течения появились в 70-х годах прошлого века и были мотивированы проблемой сокращения дистанции между местными сопротивлениями и расходомером. Тогда же были разработаны первые устройства подготовки потока (устройства формирования потока с необходимыми характеристиками (УПП)).

Сегодня основной мотивацией для совершенствования УПП является повышение точности измерения энергоносителей и технологических сред. Для этого необходимо, чтобы УПП формировали условия течения, близкие к условиям при градуировке расходомера на эталонной установке.

В работе проводится усовершенствование УПП, разработанного ранее, с множеством продольных перфорированных обечаек в надкалиберном пространстве трубопровода, за которыми располагается камера смешения.

Численным моделированием установлено, что по мере снижения числа Рейнольдса на периферии камеры смешения формируется застойная зона, практически достигающая выходного сечения цилиндрического картриджа. При минимальных значениях исследованных чисел Рейнольдса высота застойной зоны соответствует разнице диаметров расширенной части корпуса УПП и трубопровода. В результате в поперечном сечении камеры смешения формируется

значительный градиент скорости и в окрестности выходного сечения центральной (ближней к продольной оси УПП) проточной полости создается широкая область разрежения. Для исследованных модификаций УПП это приводит к увеличению протока через полости, предназначенные для глушения шума. Газ попадает в эти полости через перфорации в последней трети длины цилиндрической вставки. Соответственно, нарушаются базовые гидродинамические принципы, заложенные в работу УПП цилиндрического типа.

Установка выступов вблизи выходного сечения цилиндрической вставки изменяет картину течения по сечению цилиндрической вставки незначительно, однако в выходной части вставки увеличивается скорость потока в «периферийных» проточных полостях. Это способствует большему наполнению профилей скорости в пост-включенном участке трубопровода, так как одна из таких полостей расположена на радиусе, соответствующем пристеночной области в трубе.

Для выполнения экспериментальных исследований был изготовлен разборный образец цилиндрического УПП, варьируемая часть которого представляла собой набор колец с турбулизаторами (цилиндрическими выступами) переменной высоты. Для решения выявленной проблемы перетока газа были установлены перегородки в выходных сечениях полостей для глушения шума. В следе за перегородками, в том числе при малых числах Рейнольдса, формируется область разрежения, которая способствует смешению потока. В результате уже в камере смешения увеличивается равномерность скорости по поперечному сечению ядра течения. Измерения проводились на воздухе с использованием планарного оптического метода *Smoke Image Velocimetry* и камеры Эйфеля.

При добавлении выступов в УПП с перегородками увеличивается гидравлическое сопротивление цилиндрической вставки (несмотря на то, что в большинстве случаев площадь проходного сечения превышает площадь поперечного сечения трубы). Давление в попе-

речном сечении УПП выравнивается, и точка начала формирования ядра течения смещается к выходному сечению УПП. Профили скорости в центральной части на выходе из УПП при наличии выступов более равномерные. При приближении к стенке трубы «наполненность» профилей скорости во входном сечении поствключенного участка трубопровода снижается из-за уменьшения градиента скорости на границе с застойной зоной в камере смешения УПП.

Принимая во внимание потенциал использования наполнителей в шумоглушащих полостях, перспективными следует считать две конструкции с перегородками: без выступов и с выступами высотой 2,7 толщины вытеснения, шаг между выступами равен двум диаметрам выступов, отношение диаметра выступов к высоте 0,83. Большую привлекательность конструкции без выступов придает априори меньшее гидравлическое сопротивление и меньшая загрязняемость.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 25-29-00873.

A.A. Valeev**, *N.S. Dushin*, *I.V. Nikiforov

Federal State Budgetary Institution of Science «Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences»,

**vlei93@mail.ru*

ACCELERATION OF FLOW TURBULIZATION IN FLOW CONDITIONERS

Д.А. Генералов^{1}*

*¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет»,
432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32,
dmgeneralov@mail.ru

РАЗВИТИЕ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

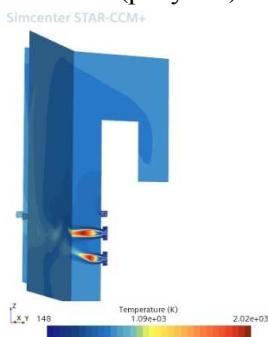
Мультидисциплинарный и разномасштабный характер задач моделирования газодинамических и тепломассообменных процессов в энергетических установках для повышения надежности и экономичности ТЭС обуславливает необходимость разработки эффективных численных методов моделирования.

Разномасштабное моделирование газодинамических и теплообменных процессов в энергетическом оборудовании позволяет осуществлять учет детальной физики без чрезмерных вычислительных затрат, повышая точность вычислений. Предложено выполнять математическое моделирование указанных процессов закрученной топливовоздушной смеси в камере сгорания, основываясь на сопряженном решении системы дифференциальных уравнений тепломассопереноса в закрученных струях с учетом влияния турбулентности и химической кинетики, используя уточненное число Pr_T и массовой диффузии J_j . Детальный учет химической кинетики обусловлен решением уравнений аномальной диффузии и модели типа SIR (Susceptible – Infected – Recovered). Поскольку процессы сжигания топлив в энергоустановках характеризуются наличием явлений с существенно различающимися временными масштабами, предложены пары Рунге – Кутты – Нюстрема порядков 6(4), 8(6). Для замыкания

системы уравнений используется модель турбулентности $k-\omega$, обеспечивающая приемлемую точность при минимальных вычислительных затратах.

Разработан комплекс алгоритмов, включающий применение автоматической надстройки геометрических параметров горелочного устройства (крутка, амбразура), автоматического уточнения радиационных характеристик предварительно перемешанной турбулентной топливно-воздушной смеси, автоматического уточнения динамических характеристик потока, автоматического задания плотности расчетной сетки в исследуемых областях, что позволяет сократить вычислительные затраты на процесс расчета горения в использовании цифрового двойника до 30 % и обеспечить требуемую точность и достоверность.

На основе разработанных цифровых двойников энергетического оборудования ТЭС с библиотекой моделей серийных и горелочных устройств, адаптированных для использования в пакетах вычислительной газодинамики STAR-CCM+ с реализованными оригинальными программными надстройками выполнены исследования способов повышения надежности, экономичности и экологической эффективности сжигания топлив (рисунок).



Исследование влияния третичного дутья на процесс сжигания метано-воздушной смеси с помощью цифрового двойника энергетического котла типа ТГМЕ-464 с горелочными устройствами типа ГМУ-45

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Generalov, D.A., Fedorov, R.V., Sherkunov, V.V., Sapunov, V.V., Busygin, S.V.* Improving the efficiency of fuel combustion with the use of various designs of embrasures // *Energies*. – 2023. – Vol. 16. – № 11. – P. 4452.

2. *Kovalnogov, V., Fedorov, R., Klyachkin, V., Generalov, D., Kuvayskova, Y., Busygin, S.* Applying the Random Forest Method to Improve Burner Efficiency // *Mathematics*. – 2022. – Vol. 10. – P. 2143. <https://doi.org/10.3390/math10122143>.

3. *Генералов, Д.А., Федоров, Р.В., Шеркунов, В.В., Гладиллин, Н.Д.* Разработка гибридного подхода оптимизации энергетических установок с использованием методов машинного обучения // *Автоматизация процессов управления*. – 2025. – № 1 (79). – С. 40–46.

D.A. Generalov^{1*}

^{1*}*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
"Ulyanovsk State Technical University" (UlSTU),
432027, Ulyanovsk, Severny Venets St., 32,
dmgeneralov@mail.ru

**DEVELOPMENT OF MODELS AND METHODS
FOR SIMULATING GAS-DYNAMIC AND HEAT AND
MASS TRANSFER PROCESSES IN POWER PLANTS**

Н.С. Гибанов*

*Научно-исследовательская лаборатория моделирования процессов конвективного теплопереноса, Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050, Томск, пр. Ленина, 36, *fire9n@mail.ru*

УВЕЛИЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АКТИВНЫХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПОРИСТЫХ ТЕПЛОТВОДЯЩИХ РЕБЕР И ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В настоящей работе проведены численные исследования сопряженной смешанной конвекции в пространственном канале с теплогенерирующим элементом и реберной системой охлаждения и с развитой поверхностью нагревательного элемента в виде пористого слоя, находящегося над ним (рис. 1).

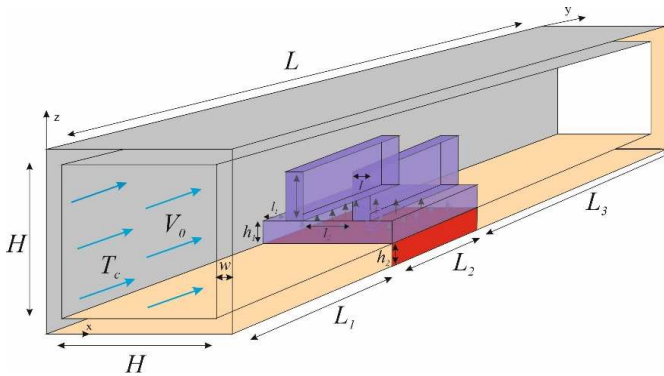


Рис. 1. Область решения задачи

Система безразмерных преобразованных уравнений, описывающая ламинарные режимы течения в представленной области

в совокупности с сопряженным конвективным теплопереносом, может быть записана в следующем виде [1, 2]:

- внутри текучей среды:

$$\frac{\partial \bar{\Omega}}{\partial \tau} + (\bar{V} \cdot \nabla) \bar{\Omega} - (\bar{\Omega} \cdot \nabla) \bar{V} = \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 \bar{\Omega} + \frac{Ra}{\text{Pr} \cdot \text{Re}^2} \bar{\Xi}, \quad \bar{\Xi} = \left\{ \frac{\partial \Theta}{\partial Y}, -\frac{\partial \Theta}{\partial X}, 0 \right\},$$

$$\text{rot}(\bar{\Omega}) = -\nabla^2 \bar{V},$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + (\bar{V} \cdot \nabla) \Theta = \frac{1}{\text{Pr} \cdot \text{Re}} \nabla^2 \Theta;$$

- внутри пористой среды:

$$\varepsilon \frac{\partial \bar{\Omega}}{\partial \tau} + (\bar{V} \cdot \nabla) \bar{\Omega} - (\bar{\Omega} \cdot \nabla) \bar{V} = \frac{\varepsilon}{\text{Re}} \nabla^2 \bar{\Omega} - \frac{\varepsilon^2}{\text{Re} Da} \bar{\Omega} + \frac{\varepsilon^2 Ra}{\text{Pr} \cdot \text{Re}^2} \bar{\Xi},$$

$$\bar{\Xi} = \left\{ \frac{\partial \Theta}{\partial Y}, -\frac{\partial \Theta}{\partial X}, 0 \right\}, \quad \text{rot}(\bar{\Omega}) = -\nabla^2 \bar{V},$$

$$\eta \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + (\bar{V} \cdot \nabla) \Theta = \frac{a_{pm} / a_f}{\text{Pr} \cdot \text{Re}} \nabla^2 \Theta;$$

- внутри теплопроводных стенок:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \frac{a_w / a_f}{\text{Pr} \cdot \text{Re}} \nabla^2 \Theta;$$

- внутри источника энергии:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \frac{a_{hs} / a_f}{\text{Pr} \cdot \text{Re}} (\nabla^2 \Theta + Os).$$

Работа выполнена в рамках реализации проекта Российского научного фонда (соглашение № 24-71-00082).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gibanov, N.S., Sheremet, M.A.* Numerical simulation of conjugate mixed convection in 3D channel with heat-generating flat element and symmetrical solid two-fin system // *Symmetry*. – 2023. – Vol. 15. – No. 7. – Article No. 1467.

2. *Astanina, M., Buonomo, B., Manca, O., Sheremet, M.* Three-dimensional natural convection of fluid with temperature-dependent viscosity within a porous cube having local heater // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. – 2022. – Vol. 139. – Article No. 106510.

N.S. Gibanov*

*Laboratory on Convective Heat and Mass Transfer, National Research
Tomsk State University, 634050 Russian Federation, Tomsk,
Lenin avenue, 36,
fire9n@mail.ru

**INCREASING THE EFFICIENCY OF ACTIVE COOLING
SYSTEMS USING POROUS HEAT-SINKING RIBS
AND HEATING ELEMENT SURFACES**

**А.С. Гриненко^{1*}, А.В. Ненарокомов¹, Д.Л. Ревизников¹,
И.А. Николичев¹**

¹*Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет),
Москва, 125993, Волоколамское шоссе, 4,
Grinenko-aleksandr@mail.ru

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АБЛЯЦИОННОЙ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДЛЯ МАНЕВРИРОВАНИЯ В АТМОСФЕРЕ ВЕНЕРЫ

Цель настоящего исследования – разработать методику расчета оптимальной (по критерию минимума массы) многослойной тепловой защиты с разрушаемым внешним слоем, необходимой для движения автоматического космического аппарата в атмосфере Венеры.

Поставленная цель требует совместного подхода к решению комплекса задач в следующих областях: аэродинамика, аэротермодинамика, оптимальное управление движением космического аппарата в атмосфере и тепловое проектирование, т.е. ставится задача междисциплинарного оптимального проектирования.

Для оценки аэродинамических характеристик космического аппарата был применен численный метод расчета с использованием теории обтекания Ньютона [1]. Обработка экспериментальных данных показывает, что точность данной теории вполне приемлема для инженерных расчетов аэродинамических характеристик широкого класса тел на этапе предварительного проектирования [1].

Для определения величин удельных тепловых потоков в характерных точках поверхности аппарата на стадии проектных исследований можно использовать приближенные зависимости, получен-

ные из точных решений, дающие удовлетворительные по точности качественные результаты [1].

Использование аппроксимационных методик, в отличие от прямого численного моделирования полной системы уравнений газовой динамики и радиационного переноса, позволяет с приемлемой для предпроектных исследований точностью и при умеренных вычислительных затратах охватить широкий диапазон варьируемых параметров и выявить общие закономерности, что делает работу актуальной для этапа концептуального проектирования миссий к Венере.

Для расчета конвективных и радиационных удельных тепловых потоков аппроксимационные зависимости обычно строятся в мультипликативном виде относительно величин плотности атмосферы, радиуса скругления корпуса космического аппарата и скорости аппарата [1, 2].

Движение центра масс космического аппарата на атмосферном участке описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений. Для определения оптимальной траектории движения космического аппарата при осуществлении аэродинамического маневра воспользуемся принципом максимума Понтрягина [3]. Критерием оптимальности в данном случае является максимальное рассеяние избыточной планетоцентрической скорости.

В исследовании рассматривается двухслойная тепловая защита с внешним абляционным и внутренним теплоизоляционным слоями. Предполагается, что процесс распространения тепла в теплозащите является одномерным по пространственной координате и описывается уравнением теплопроводности. На границах внутренней и внешней заданы граничные условия 2-го рода. Условие теплообмена на внешней границе учитывает тепловой поток, излучаемый нагретой поверхностью. Контактный теплообмен между слоями характеризуется контактным термическим сопротивлением, являющимся функцией температуры. Для определения проектных параметров тепло-

защиты использовалась вычислительная схема, сочетающая в себе метод штрафных функций и метод спроектированного лагранжиана [4]. Первый из них, характеризуемый большой областью сходимости, применяется в качестве средства поиска близкого к оптимальному начального приближения для метода спроектированного лагранжиана, обладающего высокой скоростью локальной сходимости. Задаются ограничения типа неравенства на предельно допустимую температуру на внутренней стенке и на границе между слоев [4].

При реализации описанного алгоритма проектирования многослойной (в данном исследовании двухслойной) теплозащиты на каждой итерации возникает необходимость решения численными методами прямой краевой задачи и краевой задачи для приращений температуры. В основу алгоритма решения краевых задач положена конечно-разностная схема Самарского [4], аппроксимирующая исходное нелинейное параболическое уравнение второго порядка в одномерной по пространственной переменной многослойной области разностными аналогами со вторым порядком точности по пространственной координате. Схема относится к классу монотонных и абсолютно устойчивых, что предопределяет целесообразность ее использования [4].

Рассмотрим сублимирующий абляционный материал. Уравнение теплового баланса на поверхности материала для данного режима разрушения, а также аппроксимационные зависимости массовой скорости уноса материала с поверхности приведены в работе [5].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 25-19-00131.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Косенкова, А.В.* Методика проектирования маневренного посадочного аппарата на поверхность Венеры 05.07.02 «Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов»: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Москва, 2021. – 24 с.

2. *Мирский, В.Н.* Лучистый нагрев тел при входе в атмосферу Венеры // Механика жидкости и газа. – 1992. – № 4. – С. 135–139.

3. *Дикусар, В.В.* Качественные и численные методы в принципе максимума / В.В. Дикусар, А.А. Милютин. – Москва: Наука, 1989. 144 с.

4. *Салосина, М.О.* Методы исследования и проектирования тепловой защиты солнечного зонда с учетом параметров структуры теплозащитных материалов 05.07.02 «Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов», 05.07.03 «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов»: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Москва, 2019. – 24 с.

5. *Алифанов, О.М.* Обратные задачи в исследовании сложного теплообмена / О.М. Алифанов, Е.А. Артюхин, А.В. Ненарокомов. – Москва: Янус-К, 2009. – 300 с.

***A.S. Grinenko^{1*}, A.V. Nenarokomov¹, D.L. Reviznikov¹,
I.A. Nikolichev¹***

*¹Moscow Aviation Institute (National Research University),
Moscow, 125993, Volokolamskoe highway, 4,*

**Grinenko-aleksandr@mail.ru*

**DESIGN OF AN ABLATIVE THERMAL PROTECTION
FOR AN ROBOTIC SPACECRAFT MANEUVERING
IN THE VENUSIAN ATMOSPHERE**

*Д.А. Губайдуллин^{*1}, Л.Р. Шайдуллин¹, С.А. Фадеев¹*

*¹Институт механики и машиностроения ФИЦ «Казанский
научный центр РАН», 420111, Казань, Лобачевского, 2/31,*

^{}gubaidullin-imm@yandex.ru*

ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ ГАЗА И ОСАЖДЕНИЕ АЭРОЗОЛЯ В РЕЗОНАТОРАХ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ

В технических устройствах с различной геометрией при колебаниях могут возникают резонансные явления. В резонаторах с переменным поперечным сечением наблюдаются сильные нелинейности, искажение формы волны и дисперсия частоты [1–4]. При интенсивных волновых полях возникают акустические течения, влияющие на тепло- и массоперенос и усиливающие улавливание и осаждение аэрозоля, что важно для развития волновых технологий осаждения частиц [5].

Эксперименты проводились на установке с виброгенератором, создающим вынужденные колебания газа в резонаторах разной геометрии; избыточное давление измеряли у поршня. Рассматривались цилиндрические открытые и закрытые трубы, резонаторы со скачком сечения и канал квадратного сечения. Рабочая среда аэрозоль DEHS, диаметр частиц $d = 0,896$ мкм, начальная концентрация $N_0 = 10^6$ см⁻³; изменение концентрации регистрировали оптическим методом, вводили нормированную концентрацию. Амплитудно-частотные характеристики показали безударно-волновой режим колебаний, в котором максимальная амплитуда давления наблюдается в канале, где площадь поршня в 160 раз больше, чем в трубе с наименьшим диаметром. Проведена оценка добротностей резонаторов с максимальным значением для труб.

Ускоренное осаждение аэрозоля наблюдалось во всех резонаторах. Без колебаний время осаждения было существенно больше

(от 1000 с, в зависимости от объема). Наименьшее время выявлено в широкой трубе, наибольшее – в канале. Время осаждения коррелирует с добротностью и амплитудой давления. Для труб их рост ускоряет осаждение, тогда как в канале большие поперечные размеры и акустические течения замедляют осаждение на боковых стенках, несмотря на высокие давления и добротность.

Исследованы вынужденные колебания газа и аэрозоля в резонаторах разной геометрии. Показано, что амплитуда давления растет с площадью колеблющейся границы (максимум в канале). Измерены добротности (максимум в трубе с наибольшим радиусом, минимум в трубе с наименьшим радиусом). Во всех резонаторах наблюдается ускоренное осаждение аэрозоля. Наименьшее время осаждения в широкой трубе, несмотря на ее среднюю добротность и низкое отношение объема и резонансной частоты к амплитуде давления.

Работа выполнена за счет предоставленного в 2025 году Фондом науки и технологий Республики Татарстан гранта на осуществление фундаментальных и поисковых исследований в научных и образовательных организациях, предприятиях и организациях реального сектора экономики Республики Татарстан.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Feng, H., Peng, Y., Zhang, X., Li, X.* Influence of tube geometry on the performance of standing-wave acoustic resonators // *J. Acoust. Soc. Am.* 144, 1443 (2018).
2. *Min, Q.* Generation of extremely nonlinear standing-wave field using loudspeaker-driven dissonant tube // *The Journal of the Acoustical Society of America.* 143. – Pp. 1472–1476 (2018).
3. *Cervenka, M., Soltés, M., Bednarik, M.* Optimal shaping of acoustic resonators for the generation of high-amplitude standing waves // *The Journal of the Acoustical Society of America.* 136. 1003 (2014).

4. *Lawrenson, C.C., Lipkens, B., Lucas, T.S., Perkins, D.K., Van-Doren, T.W.* Measurements of macrosonic standing waves in oscillating closed cavities // *J. Acoust. Soc. Am.* 104. (1998). – Pp. 623–636.

5. *Yuen, W.T., Fu, S.C., Kwan, J.K.C., Chao, C.Y.H.* The use of nonlinear acoustics as an energy-efficient technique for aerosol removal // *Aerosol Sci. Technol.* 48:9. – 2014. – Pp. 907–915.

D.A. Gubaidullin^{*}, L.R. Shaidullin¹, S.A. Fadeev¹

*¹Institute of Mechanics and Engineering, FRC Kazan Scientific Center,
Russian Academy of Sciences, 420111 Russian Federation, Tatarstan,
Kazan, ul. Lobachevskogo, 2/31,*

^{}gubaidullin-imm@yandex.ru*

**FORCED GAS OSCILLATIONS AND AEROSOL
DEPOSITION IN RESONATORS OF VARIOUS
GEOMETRIES**

А.П. Дмитрачкова^{1,2}, С.А. Пантелеев^{1,2}, Д.И. Зарипов^{1,2}*

*¹Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН», 420111, Казань, ул. Лобачевского, 2/31, а/я 261,
dmitra4ckova.alina@yandex.ru

*²Казанский федеральный университет, Институт математики и механики им. Н.И. Лобачевского – (ИММ КФУ),
420008, Казань, ул. Кремлевская, 35*

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ РЕЖИМА ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В КРУГЛОЙ ТРУБЕ

На сегодняшний день понятие турбулентности до сих пор не имеет общепринятого определения. При исследовании течений жидкости и газа наличие турбулентных структур часто определяется по косвенным признакам, таким, например, как вид линий тока, профиль средней скорости, величина пульсаций скорости. Задача разработки методов автоматической идентификации локальной степени турбулентности особенно актуальна при исследовании ламинарно-турбулентного перехода. В данной работе для решения этой задачи предложено использование нейронных сетей. Это современный инструмент, показавший свою эффективность как в задачах классификации режимов течения двухфазных сред по значениям характеризующих его физических величин [1], так и в задачах распознавания особенностей течения на основании изображений двумерных полей скорости [2].

В рамках настоящей работы построены полносвязная нейронная сеть прямого распространения и сверточная нейронная сеть (Convolutional Neural Networks – CNN) [3]. Проведена оценка точности классификации, а также скорости обучения при различных параметрах нейронных сетей. Особенность CNN заключается в сохранении пространственной структуры исследуемых полей, что позволяет

идентифицировать турбулентные структуры, используя не только значение в классифицируемом узле, но и в соседних узлах в пределах локальной окрестности. В качестве обучающих и тестовых данных взяты двумерные поля скорости установившего течения в круглой трубе. Эти данные получены в результате экспериментальных измерений методом PIV, выполненных в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = 500 - 10000$. В качестве входных признаков используются две компоненты скорости и их пространственные производные, вычисленные с помощью метода Grid-Free [4]. Также, рассмотрена эффективность применения Q-критерия в качестве дополнительного входного параметра. Обучение и валидация результатов классификации проведены с использованием экспериментальных данных, к которым была применена специальная процедура фильтрации [5], а также с использованием исходных полей скорости. Это позволило оценить устойчивость классификатора к присутствию шума во входных данных. Выходными данными являются вероятности принадлежности режима течения в каждой точке исследуемой области потока к ламинарному и турбулентному режиму.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 25-29-01702.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Uribe-Tarazona, D.Y., Ruiz-Diaz, C.M., González-Estrada, O.A.* (2025) Machine learning technique for the identification of two-phase (oil-water) flow patterns through pipelines // *Front. Mech. Eng.* 11: 1522120.
2. *Brown, J., Zimny, J., Radko, T.* Identifying the Origin of Turbulence Using Convolutional Neural Networks // *Fluids.* – 2022, 7, 239.
3. *LeCun, Y., Boser, B., Denker, J.S., Henderson, D., Howard, R.E., Hubbard, W., Jackel, L.D.* Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition // *Neural Computation.* 1(4). – Pp. 541 – 551. Winter 1989.

4. *Дмитрачкова, А.П., Пантелеев, С.А., Зарипов, Д.И.* Бессточный метод интерполяции двумерных векторных полей скорости // XXIV Зимняя школа по механике сплошных сред Пермь, 24–28 февраля 2025 г. Тез. докл. – Пермь: ПФИЦ УрО РАН, 2025. – С. 108.

5. *Zaripov, D., Li, R., Dushin, N.* Dissipation rate estimation in the turbulent boundary layer using high-speed planar particle image velocimetry // *Exp Fluids* 60, 18 (2019).

A.P. Dmitrachkova^{1,2*}, S.A. Panteleev^{1,2}, D.I. Zaripov^{1,2}

¹Federal Research Center Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 420111 Russian Federation, Tatarstan, Kazan, Lobachevsky st., 2/31

*²Kazan Federal University, Institute of Mathematics and Mechanics named after N.I. Lobachevsky – IMM KFU, 420008 Russian Federation, Tatarstan, Kazan, Kremlevskaya st., 35,
dmitra4ckova.alina@yandex.ru

APPLICATION OF NEURAL NETWORKS FOR FLOW REGIME IDENTIFICATION IN A CIRCULAR PIPE

К.К. Ермакова, М.А. Засимова*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул. 29,

**KarinaK77777@mail.ru*

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР, СФОРМИРОВАННЫХ ИМПУЛЬСНОЙ СТРУЕЙ, НА ОСНОВЕ URANS- И LES-ПОДХОДОВ

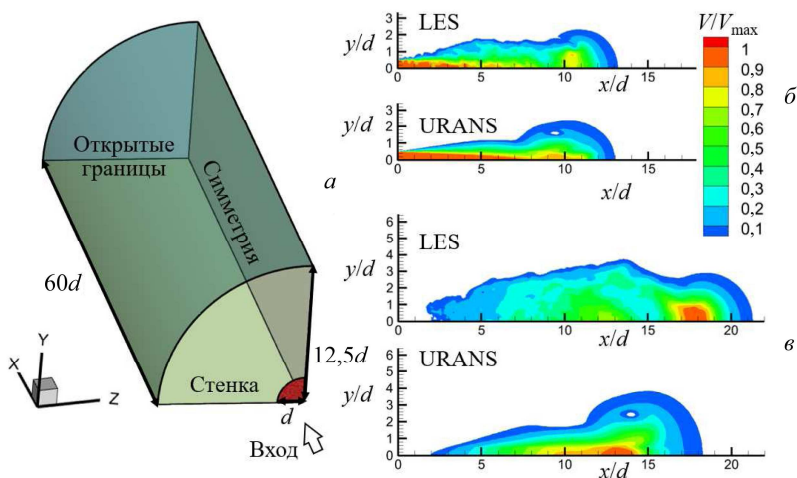
Вихревые структуры, формирующиеся при импульсной подаче струи, встречаются в различных областях жизнедеятельности человека, природы и техники. Согласно данным работы [1], они характеризуются двумя безразмерными параметрами: числом Рейнольдса $Re = V_0 d / \nu$ и параметром $P = V_0 T_0 / d^{1/3}$, где T_0 и V_0 – время выдува струи и средняя за это время скорость подачи среды через отверстие диаметра d . Считается, что вихревые кольца образуются, когда данный параметр принимает значения меньше 1,6. Если P находится в диапазоне $1,6 < P < 8$, то наблюдается образование вихревых облаков, а при больших значениях – нестационарных струй. В работе [2] на основе данных URANS расчетов (решение осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса) для заданных значений $Re = 1,5 \cdot 10^4$ и $P = 3,6$ проведена оценка влияния на формируемое течение направления подачи струи относительно силы тяжести.

В докладе представляются данные изотермических расчетов, в которых в неподвижное окружающее пространство импульсно подается одиночная струя. Проводится исследование, направленное на оценку применимости метода URANS для моделирования такого течения на основе сопоставления результатов с данными вихререшающего LES-моделирования.

Расчеты проведены в 3D-постановке, на рисунке *a* показана геометрия расчетной области. Воздух поступает в неподвижное про-

странство через входное отверстие круглой формы диаметром $d = 20$ см. Рассматриваемое течение характеризуется числом Рейнольдса $Re = 1,3 \cdot 10^5$ и параметром P , значение которого варьировалось от 1,7 до 6,3 (что соответствует формированию вихревого облака).

Моделирование течения осуществлялось с помощью URANS-подхода с использованием стандартной k - ϵ модели турбулентности и LES-подхода (при фиксированном $P = 2,9$). Была проведена серия расчетов с использованием LES подхода, в которой на входной границе с помощью генератора синтетической турбулентности были заданы разные неоднородные распределения пульсаций скорости. При анализе LES данных проводилось осреднение полей по ансамблю реализаций, осредненные таким образом значения сопоставлялись с данными URANS расчета. Расчеты проводились в пакете ANSYS Fluent на ресурсах суперкомпьютерного центра «Политехнический» (scc.spbstu.ru).



Моделирование вихревых структур: a – геометрия расчетной области; b и v – безразмерные поля модуля скорости $t' = 25$; $t' = 50$; $P = 2,9$

На рисунке *б* и *в* в два момента времени $t' = V_0 t/d = 25$ и $t' = 50$ представлены поля модуля скорости, отнесенные к максимальному значению в рассматриваемый момент времени V_{\max} , полученные с использованием двух рассматриваемых подходов. В начальные моменты времени результаты URANS расчета схожи с осредненными данными LES расчетов, с увеличением времени наблюдаются различия.

Проведен анализ характеристик вихревых структур при изменении параметра P . Получено, что вдали от источника распространения струи изменение во времени скорости структур и их пространственного положения подчиняется степенной зависимости с показателями $t'^{-0,75}$ и $t'^{0,25}$ соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ghaem-Maghami, E., Johari, H.* Concentration field measurements within isolated turbulent puffs // ASME. J. Fluids Eng. – 2007. – Vol. 129. – Pp. 194–199.

2. *Ермакова, К.К., Засимова, М.А., Иванов, Н.Г.* Исследование вихревых течений, сформированных импульсной турбулентной плавающей струей // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – Т. 19. – № 2. – 2026.

К.К. Ermakova^{*}, М.А. Zasimova

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 195251, Russian Federation, St. Petersburg, ul. Polytechnicheskaya, 29,

**KarinaK77777@mail.ru*

NUMERICAL SIMULATION OF THE EVOLUTION OF VORTEX STRUCTURES FORMED BY A PULSED JET BASED ON URANS AND LES APPROACHES

В.А. Жигарев^{1*}, А.В. Минаков¹, А.Д. Скоробогатова¹

*¹Сибирский федеральный университет,
660041, Красноярск, пр. Свободный, 79,*

**VZhgarev@sfu-kras.ru*

ПОВЫШЕНИЕ НЕФТЕОТДАЧИ ПЛАСТА НАНОЭМУЛЬСИЯМИ НА ОСНОВЕ РАСТИТЕЛЬНОГО МАСЛА

В современных условиях глобальной энергетики проблема повышения нефтеотдачи пластов приобретает исключительную значимость в связи с исчерпанием легкодоступных запасов и ухудшением качества запасов. Большая часть традиционных месторождений с высокодебетными скважинами находится на поздней стадии разработки, характеризующейся высокой обводненностью и низким коэффициентом извлечения нефти. В активную разработку вовлекаются трудноизвлекаемые запасы, включая высоковязкие нефти и остаточные нефти в обводненных пластах, извлечение которых стандартными методами нерентабельно или технически невозможно. В связи с этим перед добывающими компаниями возникает ряд трудностей, связанных с экологическими и экономическими аспектами при использовании существующих химических методов повышения нефтеотдачи.

Широко применяемые поверхностно-активные вещества (ПАВ) и полимеры на синтетической, нефтехимической основе часто обладают высокой токсичностью, низкой биоразлагаемостью и могут наносить долгосрочный ущерб экосистемам в случае утечек. Стоимость синтетических химических реагентов напрямую зависит от цен на нефть и газ, что делает процессы повышения нефтеотдачи экономически уязвимыми. Поэтому возникает задача повышения нефтеотдачи пласта при помощи альтернативных вытесняющих агентов. Одним из таких вытесняющих агентов являются наноэмульсии на растительных маслах.

Наноэмульсии (с размером капель 20–200 нм) обладают уникальными свойствами, они способны резко снизить натяжение на границе «нефть-вода» и «нефть-порода», что является ключевым фактором для мобилизации капиллярно-уловленной остаточной нефти. Они способны изменять смачиваемость породы с нефтесмачиваемой на водосмачиваемую, облегчая вытеснение нефти водой. Эффективность малых доз наноэмульсий (ввиду высокой поверхностной активности) может сделать технологию рентабельной. Составы на основе растительных масел можно адаптировать под конкретные пластовые условия и совмещать с другими методами (термическими, щелочными). Растительные масла и их производные являются возобновляемыми, биоразлагаемыми и малотоксичными материалами.

В работе проведены исследования по созданию, исследованию свойств и определения эффективности использования разработанных наноэмульсий для повышения нефтеотдачи. Фильтрационные испытания по определению эффективности заводнения горной породы наноэмульсией проведены на фильтрационной установке UFS-200. Методика проведения фильтрационных экспериментов с наноэмульсиями основана на ОСТ 39-195-86. В экспериментах использовался керн с проницаемостью 45 мД, пористостью 18 %, и нефть с вязкостью 67 мПа·с и плотностью 864 кг/м³. Для фильтрации использовались эмульсии, приготовленные на основе воды с добавлением растительных масел с различным содержанием масел и эмульгатора.

Получены результаты экспериментальных исследований по изучению эффективности применения эмульсии на основе растительных масел с различной концентрацией эмульгатора для довытеснения после заводнения базовым агентом (водой).

Было показано, что дозачка наноэмульсий с растительными маслами позволяет значительно (до 15,7 %) повысить коэффициент вытеснения нефти из кернов. При этом установлено, что увеличение концентрации масла в эмульсии позволяет дополнительно увели-

чить $K_{\text{выт}}$. С увеличением концентрации происходит монотонный рост коэффициента вытеснения нефти. Так, повышение концентрации масла с 0,5 до 1 масс. % в эмульсии на основе льняного масла позволило увеличить прирост коэффициента вытеснения с 10,4 до 15,7 % соответственно.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSRZ-2020-0012).

V.A. Zhigarev^{1*}, A.V. Minakov¹, A.D. Skorobogatova¹

*¹Siberian Federal University, 660041 Russian Federation,
Krasnoyarsk, ave. Svobodny, 79,*

**VZhigarev@sfu-kras.ru*

ENHANCING OIL RECOVERY USING VEGETABLE OIL-BASED NANOEMULSIONS

И.А. Заграй^{1}, В.А. Кузьмин², Н.А. Шмакова¹*

¹Вятский государственный университет,

610000, Киров, ул. Московская, 36,

**ZagrayIA@yandex.ru*

²Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН», 420111, Казань, ул. Лобачевского, 2/31, а/я 261

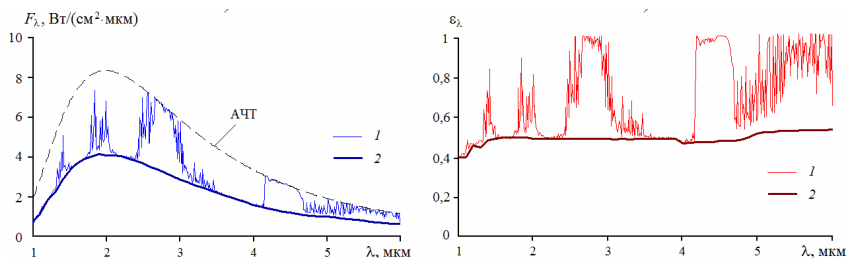
СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННОЙ СРЕДЫ ПРИ ФАКЕЛЬНОМ СЖИГАНИИ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ

Эффективность и экологичность процессов факельного сжигания пылевидного твердого топлива в значительной степени определяются температурой и излучательными свойствами формирующейся в топке гетерогенной среды. Эта среда состоит из газовой фазы (ГФ) и частиц конденсированной фазы (КФ) различной дисперсности и химического состава.

Авторами статьи разработана опытно-расчетная методика пирометрического контроля топки [1, 2], которая обеспечивает измерение температуры многокомпонентной ГФ по полосе излучения CO_2 и определение температуры КФ (коксовых остатков и золы) в спектральных окнах прозрачности газовой среды с помощью пирометров Optris CTlaser F2H (4,24 мкм) и Raynger (1,6 мкм) соответственно. Измерения проводились на разных высотах топки котла БКЗ-210-140Ф при факельном сжигании кузнецкого угля и торфа. В результате проведенных экспериментально-расчетных исследований величина температурной неравновесности $\Delta T = T_{\text{КФ}} - T_{\text{ГФ}}$ составила 216–291 К при сжигании угля и 250–303 К при сжигании торфа.

Для определения спектральных характеристик излучения – плотности потока энергии излучения (F_λ) и излучательной способности (ϵ_λ) – использовалась разработанная нами программа «Spektр»

[3–5], основанная на решении уравнения переноса энергии излучения методом сферических гармоник в РЗ-приближении для многокомпонентной излучающей, поглощающей и рассеивающей среды. В расчетной модели учтены степень выгорания топлива по высоте топки и температурная неравновесность между ГФ и частицами КФ. Расчетные значения F_{λ} , ε_{λ} позволяют оценить вклад каждого компонента (ГФ и КФ) в различных спектральных интервалах (рисунок), а интегральные F и ε – радиационную теплонапряженность топочной камеры.



Спектральные характеристики теплового излучения при сжигании торфа, $T_{\text{КФ}} = 1453 \text{ К}$, $T_{\text{ГФ}} = 1182 \text{ К}$: a – плотность потока энергии излучения; b – излучательная способность (1 – расчет для гетерогенной среды; 2 – расчет для конденсированной фазы)

Проведенное исследование позволяет количественно оценить температурную неравновесность и спектральные характеристики излучения гетерогенной среды. Полученные данные важны для решения практических задач, таких как прогнозирование шлакования и оптимизация контроля выбросов оксидов азота. Разработанный подход также формирует основу для совершенствования методов пирометрического контроля гетерогенных сред по спектру их теплового излучения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-01339, <https://rscf.ru/project/25-29-01339/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмин, В.А., Заграй, И.А., Шмакова, Н.А. Определение температуры и излучательной способности топочных газов парового котла при факельном сжигании торфа // Теплоэнергетика. – 2023. – № 1. – С. 66–74.

2. Заграй, И.А., Кузьмин, В.А., Лоншаков, А.С. Определение температуры и излучательной способности частиц конденсированной фазы парового котла при факельном сжигании торфа // Теплоэнергетика. – 2025. – № 10. – С. 52–61.

3. Кузьмин, В.А., Заграй, И.А., Рукавишникова, Р.В. Тепловое излучение гетерогенных продуктов сгорания при сжигании торфа // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2015. – № 3, 4. – С. 58–67.

4. Кузьмин, В.А., Заграй, И.А., Маратканова, Е.И., Десятков, И.А. Исследование теплового излучения топочных газов в паровом котле при сжигании твердых топлив // Теплофизика и аэромеханика. – 2019. – Т. 26. – № 2. – С. 301–315.

5. Кузьмин, В.А., Заграй, И.А., Десятков, И.А. Исследование характеристик излучения и температуры топочных газов парового котла БКЗ-210-140Ф при факельном сжигании фрезерного торфа с подсветкой природным газом // Теплофизика и аэромеханика. – 2021. – Т. 28. – № 2. – С. 303–313.

I.A. Zagrai^{1*}, V.A. Kuzmin², N.A. Shmakova¹

*¹Vyatka State University, 610000 Russian Federation,
Kirov, Moscovskaya, 36*

*²Federal State Budgetary Institution of Science «Kazan Scientific
Center of Russian Academy of Sciences», 420111 Russian Federation,
Tatarstan, Kazan, ul. Lobachevskogo, 2/31,*

**ZagrayIA@yandex.ru*

SPECTRAL CHARACTERISTICS OF THERMAL RADIATION FROM A HETEROGENEOUS MEDIUM DURING FLAME COMBUSTION OF SOLID FUELS

Д.А. Зайнутдинова^{1}, Г.И. Павлов²*

*^{1,2}Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ,
420111 г. Казань, ул. К. Маркса, 10,
zajnutdinova-dinara@mail.ru

О ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧЕСКОМ МЕТОДЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ СКОРОСТИ В НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ СТРУЕ, СОЗДАВАЕМЫХ РЕЗОНАТОРОМ ГЕЛЬМГОЛЬЦА

Резонатор Гельмгольца – классическое акустическое устройство, представляющее собой полость относительно небольшого объема, связанную с внешним пространством через узкое горлышко. При возбуждении резонатора возникают переменные поля давления и скорости воздуха, среди которых существенное значение имеют продольные пульсации скорости в устье горла [1]. В данной работе резонатор Гельмгольца применялся для формирования газового потока с пульсационной составляющей с широким диапазоном изменения частоты и амплитуды пульсаций с разными скоростями движения: 1,2, 1,5 1,8 м/с (для нормальных условий). В дальнейшем этот поток использовался при исследованиях сушки твердой увлажненной частицы. Экспериментальная установка приведена на рис. 1.

Для количественного изучения динамических характеристик потокового поля внутри рабочего участка необходима высокая точность измерения параметров пульсаций скорости. Для этих целей широко используется термоанемометрический метод, основанный на принципе охлаждения нагретого тонкого проводимого элемента потоком газа. Термоанемометрический датчик б (рис. 1) представляет собой тонкую вольфрамовую нить, через которую пропускается электрический ток, нагревающий ее до заданной температуры. Воздушный поток, изменяющийся во времени в результате акустических колебаний, вызывает локальное охлаждение нити, что приводит

к изменениям ее электрического сопротивления. На основе измерения колебаний напряжения с высокой временной разрешающей способностью можно определить мгновенные значения продольной скорости пульсаций в области установки датчика [2].



Рис. 1. Общий вид лабораторного стенда: 1 – источник питания; 2 – генератор сигналов; 3 – термоанемометр VENETECH GM8903; 4 – термометр; 5 – источник нагретого воздуха; 6 – датчик термоанемометра ИРВИС; 7 – рабочий участок; 8 – микрофон; 9 – термоанемометр ИРВИС; 10 – персональный компьютер; 11 – измерительный комплекс Экофизика; 12 – резонатор Гельмгольца

На рабочем участке установки датчик располагался вдоль направления распространения акустических волн. Регистрацию продольных компонент пульсаций скорости обеспечивала трубка длиной около 5 калибров, внутри которой перпендикулярно потоку располагалась нить датчика. Записанные сигналы в дальнейшем подвергались цифровой обработке. Калибровка термоанемометрического датчика является одним из ключевых этапов обеспечения достоверности измерений и заключается в установлении зависимости выходного сигнала (напряжения) от известной скорости потока. При калибровке использовался газовый поток с выровненным полем скоростей, сформированный аэродинамической трубой.

Исследования турбулентности газового потока проводились термоанемометром ИРВИС-ТА5.2. Согласно паспорту, данный прибор измеряет характеристики газового потока температурой не более 100 °С. При решении научных задач часто возникает необходимость использования пульсаций скорости газов, имеющих более высокие температуры. Для решения этой проблемы авторами статьи предложен генератор пульсирующих газов, основанный на резонаторе Гельмгольца. Схема данного резонатора несколько отличалась от классической схемы резонатора Гельмгольца: в полости резонатора переменное давление создавалось не массой газа в горле, а электродинамиком, который являлся днищем цилиндрической полости резонатора. При совпадении частоты колебания мембраны динамика с собственной частотой резонатора возникал резонанс. При этом на выходе горла резонатора формировался пульсирующий газовый поток с нулевой средней скоростью. Значения амплитуды пульсаций скорости определялись экспериментально-теоретическим методом. Суть метода заключается в следующем: в полости резонатора акустическим датчиком измеряется уровень звукового давления в паскалях (Па). В горле резонатора контактным термометром измеряется температура газов. Нагрев газов до необходимой температуры обеспечивается электрофеном. Далее, по известным методикам, в горле резонатора определяется скорость звука и плотность газов. Рассчитывается значение акустического сопротивления ρc . Искомое значение пульсаций скорости определяется по формуле:

$$\Delta v = \frac{\Delta P}{\rho c},$$

где Δv – амплитуда пульсаций скорости, м/с; ΔP – уровень звукового давления в полости резонатора на заданной частоте, Па; ρ – плотность воздуха, кг/м³; c – скорость звука, м/с.

Работоспособность предложенной методики проверялась экспериментально. Для этого с использованием термоанемометра ИРВИС-ТА5.2 измерялись пульсации скорости, определялась ее амплитуда и сравнивалась с расчетной амплитудой пульсаций, вычисленной по приведенной формуле. При этом температура газов в гор-

ле резонатора не превышала допустимого значения, указанного в паспорте на прибор.

Результаты измеренных значений: частота резонансных колебаний и уровень звукового давления в резонаторе равнялись 102 Гц и 35,98 Па соответственно; температура воздуха в резонаторе соответствовала 22 °С; плотность воздуха – 1,29 кг/м³; расчетное значение амплитуды пульсаций $\Delta v = \frac{35,98}{340 \cdot 1,29} = 0,082$ м/с; измеренное

значение – 0,076 м/с. Расхождение результатов не превышает 7,8 %. Амплитуду пульсаций скорости можно регулировать изменением подаваемого на динамик электрического напряжения. Частотные спектры сигналов с микрофона и датчика термоанемометра приведены на рис. 2.

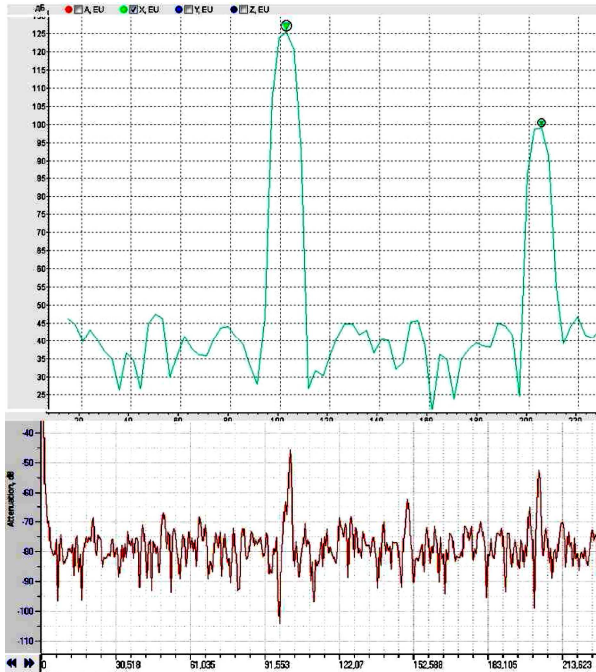


Рис. 2. Частотные спектры сигналов с микрофона и датчика термоанемометра на резонансной частоте 102 Гц

По сравнительным результатам спектров этих сигналов можно сделать вывод, что предложенное устройство не противоречит принципам работы резонатора Гельмгольца. При использовании неизотермических газовых сред амплитуду пульсаций скорости у горла резонатора с достаточной точностью можно определить косвенными измерениями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федотов, Е.С., Пальчиковский, В.В. Исследование работы резонатора Гельмгольца в волноводе прямоугольного сечения // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2014. – № 38. – С. 107–126.

2. Лебига, В.А., Пак, А.Ю. Применение термоанемометра для измерений пульсаций параметров газового потока в наружном контуре авиационного двигателя // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2016. – № 45. – С. 71–87.

*D.A. Zaynutdinova^{*1}, G.I. Pavlov²*

*^{1,2}Kazan National Research Technical University
named after A.N. Tupolev-KAI,
420111 Russian Federation, Tatarstan, Kazan, K. Marks st., 10,
^{*}zajjnutdinova-dinara@mail.ru*

**ON A THERMOANEMOMETRIC METHOD
FOR DETERMINING VELOCITY PULSATIONS
IN A NONISOTHERMAL JET GENERATED
BY A HELMHOLTZ RESONATOR**

М.Д. Знамеровский^{1,2}, Л.В. Петров¹

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1

²ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 17

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПАРОГАЗОВОЙ СРЕДЫ В ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКЕ АЭС НА ПРИМЕРЕ ЭКСПЕРИМЕНТА НУКА

Основными источниками водорода при тяжелых авариях на АЭС с ВВЭР являются термохимические реакции пара с цирконием (пароциркониевая реакция), сталью, топливом, взаимодействие расплава топлива с бетоном [1]. Формирование горючих парогазовых смесей в помещениях защитной оболочки (ЗО) создает угрозу дефлаграции и детонации, которые способны привести к разрушению последнего барьера безопасности и выходу радиоактивных веществ в окружающую среду.

Обеспечение водородной взрывобезопасности является одной из ключевых задач при проектировании технических систем и разработке мер по предотвращению и контролю аварийных процессов. На экспериментальной установке НУКА [2] была проведена серия экспериментов с целью моделирования различных режимов распространения пламени в стратифицированной водородно-воздушной атмосфере.

В рамках данной работы проведено моделирование эксперимента НУКА с использованием программного средства АНГАР [2], предназначенного для расчетного моделирования изменения теплотехнических параметров и фракционного состава парогазовой среды в объеме защитной оболочки.

Основой моделирования является составление расчетной схемы, учитывающей геометрические параметры и элементы модели-

руемого объема. Для моделирования эксперимента НУКА исходная установка была условно разделена на четыре уровня (рис. 1). Три нижних уровня были разделены на пять расчетных областей. Четвертый уровень представляет собой верхний отсек установки цилиндрической формы, имеющий диаметр 2 м. В нижних трех слоях разделение проводилось следующим образом: центральное помещение имеет диаметр верхнего отсека, а остальная область в слое разделена на четыре равные части.

В результате расчетов были получены кривые изменения давления и температуры на различных высотах экспериментального стенда, которые сравнивались с экспериментальными данными. При сопоставлении результатов моделирования расчетные кривые показали качественную и количественную сходимость с экспериментальными данными (рис. 2).

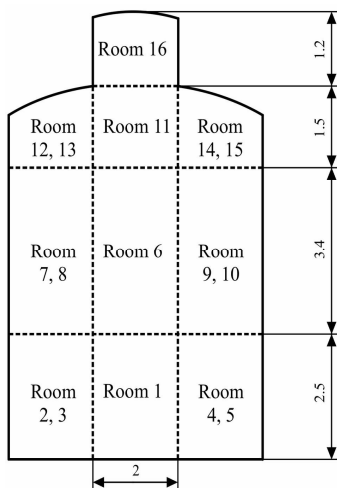


Рис. 1. Разбиение установки НУКА А2 на расчетные зоны

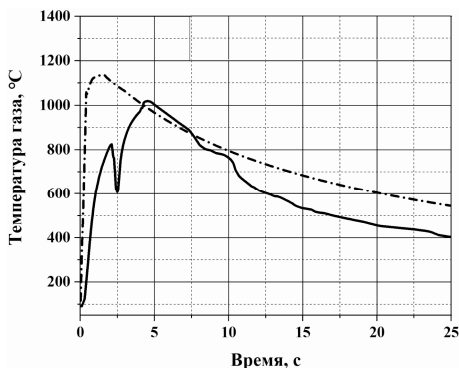


Рис. 2. Температура среды на высоте 1,5 м от дна вдоль вертикальной оси:
 - · - · - расчетные данные;
 — — экспериментальные данные

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. International Atomic Energy Agency (IAEA). Hydrogen Phenomena during Severe Accidents in Water Cooled Reactors.” TRAINING COURSE SERIES No. 72, VIENNA, 2021 IAEA-TCS-72 ISSN 1018–5518.

2. Kljenak, I., Kuznetsov, M., Kostka, P., Kubišova, L., Maltsev, M., Manzini, G., Povilaitis, M. Simulation of hydrogen deflagration experiment – Benchmark exercise with lumped-parameter codes // Nuclear Engineering and Design. 283 (2015).– Pp. 51–59.

M.D. Znamerovsky^{1,2}, L.V. Petrov¹

¹National Research Center “Kurchatov Institute”,

Russia, 123182, Moscow, pl. Academician Kurchatov, 1

²National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,

Russia, 111250 Moscow, Krasnokazarmennaya street, 14

**NUMERICAL SIMULATION OF PARAMETERS
OF VAPOR-GAS ENVIRONMENT IN THE
CONTAINMENT OF NUCLEAR POWER PLANT
USING EXAMPLE OF HYKA EXPERIMENT**

Н.Н. Золоторёв^{}, К.В. Костюшин, Д.О. Ларкин*

Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050, Томск, пр. Ленина, 36,

^{}nikzolotorev@mail.ru*

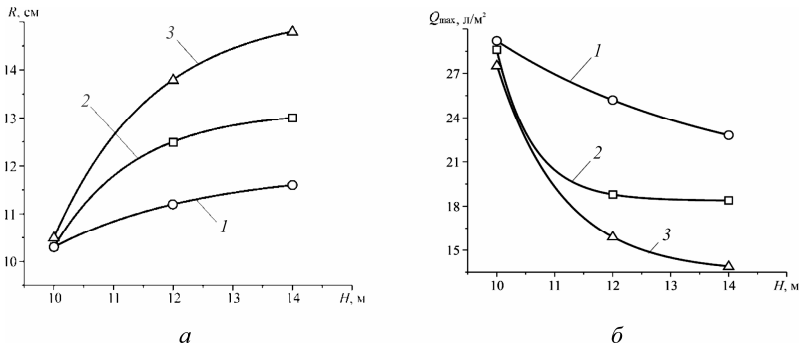
МЕТОД И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ОРОШЕНИЯ ПРИ СБРОСЕ ЖИДКОСТИ С БОРТА БПЛА

Исследование пространственного распределения плотности и интенсивности орошения при сбросе жидкости с борта беспилотного летательного аппарата (БПЛА) является актуальной задачей, обладающей значимой прикладной ценностью [1]. Вопросы точности дозирования и равномерности покрытия поверхности жидкостью представляет интерес при выполнении агрохимических работ, санитарной обработке территорий и критически важны при авиационном тушении лесных пожаров. Определение закономерностей формирования оптимального профиля пространственного распределения плотности орошения жидкости позволяет существенно повысить точность и обеспечить максимальную эффективность покрытия поверхности, что позволяет снизить временные и экономические затраты на ликвидацию очагов возгорания [2].

В настоящем сообщении представлен метод и результаты экспериментов, направленных на установление закономерностей изменения пространственного распределения плотности орошения при варьировании высоты сброса и коэффициента поверхностного натяжения жидкого хладагента. Для проведения экспериментального исследования использовалось модельное сливное устройство в виде цилиндрического резервуара объемом 2,5 литра, закрепленное на БПЛА. В качестве исследуемой жидкости использовали дистиллиро-

ванную воду без ПАВ и с добавлением ПАВ, в качестве которого был выбран сульфэтоксилат (SLES-72 %).

Для определения пространственного распределения плотности орошения подстилающей поверхности при сбросе жидкости из сливного устройства разработаны метод и устройство [3]. Устройство состоит из приемной емкости прямоугольной формы, внутри которой установлено 25 идентичных мерных ячеек. Каждая из ячеек отделена пластиковой водонепроницаемой перегородкой для недопущения попадания жидкости из соседних ячеек при сбросе жидкости из сливного устройства. Для максимально полного сбора поступающей в ячейку жидкости на дне каждой из них размещался слой пористого вкладыша, верхняя поверхность которого покрыта многослойной марлевой сеткой. На рис. 1 представлены результаты определения эффективного радиуса зоны орошения R и максимальной плотности орошения Q_{\max} (плотность орошения при $r = 0$) в зависимости от высоты сброса H и коэффициента поверхностного натяжения σ жидкости. Величина R соответствует точке перегиба в зависимости $Q(r)$, характеризующей радиальное распределение плотности орошения.



Зависимости: a – эффективного радиуса зоны орошения; b – максимальной плотности орошения от высоты сброса и коэффициента поверхностного натяжения:

$$1 - \sigma = 71,2 \text{ мН/м}; 2 - \sigma = 55,0 \text{ мН/м}; 3 - \sigma = 31,0 \text{ мН/м}$$

Анализ приведенных зависимостей на рисунке *a* показывает, что увеличение H от 10 до 14 м приводит к росту R на $\sim (14 \div 41) \%$. Введение ПАВ также способствует увеличению R , причем данный эффект наиболее выражен при больших высотах сброса. Из графиков (рисунок *b*) следует, что Q_{\max} при увеличении H монотонно снижается на $\sim (22 \div 50) \%$.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00307-П, <https://rscf.ru/project/22-19-00307/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Москвилин, Е.А.* Применение авиации для тушения лесных пожаров // Пожарная безопасность. – 2009. – № 1. – С. 89–92.

2. *Волков, Р.С., Кузнецов, Г.В., Осипов, К.Ю., Хасанов, И.Р.* Определение плотности и интенсивности орошения лесного горючего материала перед фронтом горения при создании эффективной заградительной полосы // ЖТФ. – 2020. – Т. 90. – № 4. – С. 581–585.

3. Пат. 2848924 РФ Российская Федерация, МПК G01N5/02 (2006.01). Способ определения пространственного распределения плотности и интенсивности орошения при сбросе жидкости / Архипов В.А., Басалаев С.А., Бондарчук И.С., Золоторев Н.Н., Перфильева К.Г., Романдин В.И.; заявитель и патентообладатель ФГА ОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет»; заявл. 20.06.2025; опубл.: 21.10.2025. Бюл. № 30.

N.N. Zolotorev, K.V. Kostyushin, D. Larkin

National Research Tomsk State University, 36 Lenin Ave.,

Tomsk, 634050,

** nikzolotorev@mail.ru*

**METHOD AND RESULTS OF MEASURING THE
SPATIAL DISTRIBUTION OF IRRIGATION DENSITY
WHEN LIQUID IS DISCHARGED FROM AN UAV BOARD**

***А.В. Ильинков¹, А.В. Стародумов², В.В. Такмовцев¹,
А.В. Шукин^{1*}, А.А. Киселев¹***

¹ *Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10,*

** a.v.shchukin@rambler.ru*

² *ОКБ им. А. Ляльки филиал ПАО «ОДК-УМПО», 129301, г. Москва, ул. Касаткина, 13*

ОСОБЕННОСТИ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ КОНВЕКТИВНО-ПЛЕНОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК

Вводные замечания. В докладе изложены результаты оптимизации теплового состояния участка профиля сопловой турбинной лопатки при использовании внутреннего конвективного охлаждения с интенсификацией теплоотдачи и внешнего конвективно-плёночного охлаждения.

Комбинированная система охлаждения турбинных лопаток необходима, если температура газа перед турбиной превышает 1400-1500 К, в зависимости от жаропрочности, жаростойкости материала лопаток и назначенного ресурса их эксплуатации. Эта комбинированная система имеет две области с принципиально разными механизмами охлаждения стенки лопатки, что необходимо учитывать при оптимизации рабочих процессов в системах конвективно-плёночного охлаждения в турбинных лопатках [1-5].

Снаружи стенка лопатки обтекается потоком горячего газа с температурой $T^*_г$ и скоростью $W_г$. Охлаждающий воздух с температурой $T^*_{охл}$ и скоростью $W_{охл}$ подходит к расчетному участку и разделяется на два потока (рис. 1).

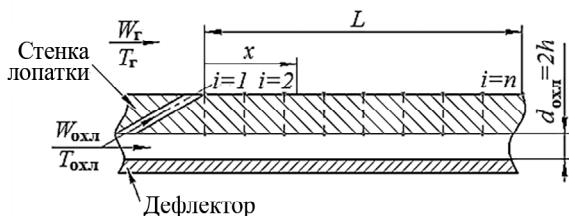


Рис. 1. Схема расчетной модели

Первый поток течет между теплопроводной стенкой лопатки и адиабатной стенкой дефлектора в направлении движения газа. Второй, пройдя через ряд отверстий для вдува, расположенных под углом 30° , образует на внешней поверхности лопатки защитную пленку.

Для расширения возможностей оптимизационной модели конвективная и пленочная составляющие системы охлаждения приняты независимыми друг от друга. Поэтому скорость вдува в поток газа определяется параметром вдува m и не зависит от скорости воздуха $W_{\text{внут}}$ во внутренней конвективной части системы охлаждения. Расчетная область длиной L поделена на 10 участков, в каждом из которых происходит процесс теплопередачи.

Оптимизация геометрических и режимных параметров участка охлаждаемой турбинной лопатки производилась методом Нелдера – Мида. Разработанная программа позволяла использовать до 100 варьируемых параметров, в том числе задаваемых дискретно, и до 100 функций цели. Кроме того, на варьируемые параметры и функционально зависящие от них величины можно было накладывать ограничения первого и второго рода. Работоспособность программы и ее настройка проверены поиском минимума тестовых функций Розенброка, Экли и Бута.

После этого формулировалась и решалась задача оптимизации режимов течения в канале внутреннего конвективного охла-

ждения и эффективности внешнего пленочного охлаждения турбинной лопатки. Для результатов, имеющих практическую значимость, необходимо правильно сформулировать условия задачи. Варьируемыми параметрами, определяющими режимы течения и процесс формирования защитной пленки, были: параметр вдува m , скорость $W_{пл}$ и коэффициент интенсификации конвективного теплообмена Ψ в канале внутреннего конвективного охлаждения. На них во всех рассматриваемых задачах накладывались ограничения первого рода: $0,25 < m < 2,5$; $10 < W_{пл} < 200$ и $1 < \Psi < 2$.

На выборе функции цели следует остановиться особо. Поскольку основной задачей расчета и проектирования системы охлаждения является снижение температуры лопатки при минимальном расходе охлаждающего воздуха, то может показаться логичным в качестве функций цели выбрать именно температуру внешней стенки лопатки $T_{ст.g.i}$ на всех рассчитываемых участках охлаждаемой стенки. Однако такой подход будет ошибочным по многим причинам:

- во-первых, поскольку функция цели будет комплексом множества локальных температур, то алгоритм оптимизации, как это неоднократно получалось, легко пропустит их единичные забросы, если их влияние на среднюю температуру незначительно;
- во-вторых, в рассматриваемом случае не учитывается требование экономичности.

Однако если к функциям цели в виде $T_{ст.g.i}$ добавить расход охлаждающего воздуха, то проблем станет еще больше. Так, поскольку расход охлаждающего воздуха имеет другую размерность и порядок значений, нежели температура, его единичное значение потеряет свою значимость на фоне множества $T_{ст.g.i}$ и введение коэффициента влияния этому не поможет. Таким образом, можно сделать однозначный вывод: температура лопатки не должна быть функцией цели. Следовательно, на температуры внешней поверх-

ности стенки лопатки $T_{ст.г.i}$ на всех рассчитываемых участках следует наложить ограничения второго рода, а для функции цели использовать другие параметры.

Для убедительности принятых решений расчет с такими условиями был выполнен и принят в качестве базового. Получено, что интенсификацию теплоотдачи в каналах системы охлаждения следует использовать по максимуму $\Psi = 2$, а для параметра вдува рекомендуется значение $m = 1$, расположенное в середине заданного диапазона варьирования режимного параметра. В используемой модели значение параметра вдува однозначно определяет расход воздуха на образование защитной пленки $G_{пл}$, следовательно, его базовое значение можно считать известным. Значение же расхода воздуха во внутренних каналах системы охлаждения $G_{внут}$ определяется скоростью в этих каналах $W_{внут}$, но поскольку в результате расчета скорость $W_{охл}$ принимает максимальное значение в заданном диапазоне, то можно полагать, что для большего снижения значения $T_{ст.г}$ программа будет все более увеличивать $W_{внут}$, а следовательно, и $G_{внут}$. Поскольку в используемой модели не реализована процедура проверки, то на случай запираания канала было принято решение не расширять допустимый диапазон $W_{внут}$ и считать полученные значения $T_{ст.г}$ и $G_{внут}$ базовыми.

Вторая серия расчетов была направлена на достижение минимального значения суммарного расхода охлаждающего воздуха $G_{\Sigma} = G_{внут} + G_{пл}$ при условии ограничения температуры стенки лопатки $T_{ст.г}$. Получено, что интенсификацию конвективного теплообмена также следует использовать по максимуму $\Psi = 2$, а вот параметр вдува следует снизить до значения $m = 0,5$. Максимальное значение $T_{ст.г}$ достигало заданного ограничения и было на 80 К выше, чем в базовом расчете. Значения расхода воздуха составили 50% по $G_{внут}$ и 44% по $G_{пл}$, т.е. налицо экономия охладителя.

Качественная высокоэффективная система охлаждения должна не только ограничивать температуру лопатки, но и обеспечивать равномерное температурное поле. В противном случае повышенные термические напряжения будут снижать ресурс лопатки.

Для выполнения этого требования в расчетную модель третьей серии был добавлен ограничительный параметр – максимальный температурный перепад по имеющимся участкам стенки $\Delta T_{y \max} = (T_{ст.г.i} - T_{ст.х.i})$ при условии ограничения температуры стенки лопатки $T_{ст.г.}$. Было получено, что интенсификацию теплоотдачи в охлаждающих каналах лопатки следует исключить, назначив значение $\Psi = 1$, а параметр вдува нужно увеличить до значения $m = 2$. В этом случае расход охлаждающего воздуха существенно возрастает по сравнению с предыдущим вариантом и составляет 203% по $G_{пл}$ и 65% по $G_{внут.}$. При этом максимальный температурный градиент снизился на 18К по сравнению с предыдущим вариантом и на 23 К – с базовым.

Таким образом, установлено, что для обеспечения экономичности системы охлаждения и получения равномерного температурного поля лопатки требуются противоположные конструктивные решения. Поэтому для использования методов оптимизации в этой задаче необходимо ввести дополнительный параметр, связывающий работоспособность лопатки с ее температурой и температурным градиентом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фаворский, О.Н., Копелев, С.З.* Охлаждаемые воздухом лопатки газовых турбин // Теплоэнергетика. – 1981. – № 8. – С. 7-11.
2. *Виноградов, К.А.* Повышение эффективности газовой турбины путем структурно-параметрической оптимизации обводов переходного канала и формы отверстий пленочного охлаждения / Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Рыбинск, 2015. – 16 с.

3. Горелов, Ю.Г., Тюльков, К.В. 3D-Сопряженные исследования эффективности пленочного охлаждения сопловых лопаток с «меридиональным поджатием» и профилированными отверстиями / Изв. вузов. Авиационная техника. – 2018. – № 1. – С. 51-56.

4. Кортиков, Н.Н. Оптимизация системы охлаждения сопловой лопатки энергетической газовой турбины // Материаловедение. Энергетика. – 2021. – Т. 27. – № 4. – С. 85-95.

5. Лапшин, К.Л. Компьютерная оптимизация паровых и газовых турбин / К.Л. Лапшин. – Санкт-Петербург: Изд-во СПбПУ, 2018. – 200 с.

***A.V. Il'inkov¹, A.V. Starodumov², V.V. Takmoltsev¹,
A.V. Shchukin^{1*}, A.A. Kiselev¹***

*¹ Kazan National Research Technical University named after
A.N. Tupolev–KAI, 420111, Russian Federation, Tatarstan, Kazan,
K. Marksa st., 10*

*² Lulka UEC – subsidiary company of UEC-UMPO,
129301, Russian Federation, Moscow, Kasatkina st. 13*

** a.v.shchukin@rambler.ru*

**OPTIMIZATION OF OPERATING PROCESSES
IN CONVECTIVE FILM COOLING SYSTEMS
OF TURBINE BLADES**

***Н.А. Кашанов^{1,2}, А.В. Птахин¹, В.С. Крылов¹,
О.О. Мильман¹***

*¹ ЗАО НПВП «Турбокон»,
248010, г. Калуга, Комсомольская Роцца, 43
² Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана,
248002, г. Калуга, ул. Университетский Городок, 1*

ОБЗОР ЗАРУБЕЖНЫХ И ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МЕТОДИК ИСПЫТАНИЙ ВОЗДУШНО-КОНДЕНСАЦИОННЫХ УСТАНОВОК

Воздушно-конденсационные установки (ВКУ) – поверхностные теплообменники, в которых конденсация отработавшего пара паровой турбины осуществляется за счет обдува оребренных труб атмосферным воздухом [1,2]. Эффективность ВКУ влияет на давление конденсации и энергетические показатели энергоблока. Корректная оценка их тепловой производительности необходима на этапах проектирования, гарантийного подтверждения характеристик и эксплуатации.

В практике испытаний ВКУ сложились два основных подхода: натурные испытания с конденсацией пара и лабораторные/стендовые испытания без фазового перехода.

Натурные испытания проводятся на полноразмерной установке в условиях, близких к эксплуатационным. Тепловая мощность определяется по массовому расходу конденсата и изменению энтальпии пара с учетом скрытой теплоты парообразования [1]. Метод требует измерения расхода конденсата, параметров конденсации и воздуха. Он обеспечивает наиболее достоверную оценку реальной производительности ВКУ и применяется преимущественно для гарантийных (приемочных) испытаний. В зарубежной практике это регламентируется стандартами STI ATC-107 (США) и

ASME PTC 30.1 [4]. Расчет выполняется через тепловой баланс с использованием модели ε -NTU и приведением результатов к гарантийным условиям. Итоговым критерием служит Condenser Capability (C) – процент соответствия гарантии ($C \geq 100\%$ – установка держит или превышает заявленные параметры). Особое внимание уделяется оценке неопределенности измерений и поправкам на отклонения от гарантийных условий (температура воздуха, ветер и др.) [3,4].

Лабораторные методы ориентированы на исследование отдельных элементов ВКУ (орбренных труб, секций, модулей). В качестве горячего теплоносителя используется вода (или другой жидкий носитель), что исключает фазовый переход. Тепловая мощность рассчитывается по изменению температуры теплоносителя и воздуха с обязательной проверкой теплового баланса (невязка обычно $\leq 3-5\%$). По результатам определяются коэффициент теплопередачи k , аэродинамическое сопротивление $\Delta p_{\text{рв}}$, зависимости $k = f(Gv)$ и безразмерные критерии подобия (Re , Nu , Eu). Эти характеристики служат базой для проектирования и масштабирования на полноразмерную установку. В зарубежной практике такой подход наиболее детально регламентирован китайским стандартом GB/T 27698 (серия стандартов), который устанавливает требования к лабораторным испытаниям теплообменных элементов воздушного охлаждения [5].

Отечественные стендовые методики (МУ 34-70-010-82, СО 34.30.738 и отраслевые инструкции) сочетают элементы обоих подходов: испытания проводятся на макетах с реальным паром \rightarrow конденсатом, тепловая мощность определяется преимущественно по стороне пара (как более точной), а по воздуху – контроль баланса (невязка $\leq 5\%$) [1, 2]. Результаты представляются в размерном и безразмерном виде для применения теории подобия при масштабировании характеристик на полную ВКУ.

Сравнительный анализ показывает, что выбор методики зависит от цели и стадии жизненного цикла установки. Натурные

испытания с конденсацией пара оптимальны для подтверждения гарантийных характеристик полноразмерной ВКУ (СТИ/ASME) [3, 4]. Лабораторные и стендовые методы (GB/T 27698, отечественные) предпочтительны на этапах НИОКР, проектирования и обработки элементов [2,5]. Наиболее эффективна комбинированная стратегия: лабораторная верификация теплообменных поверхностей с последующим гарантийным подтверждением параметров всей установки в натуральных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шкловер, Г.Г. Исследование и расчет конденсационных устройств паровых турбин / Г.Г. Шкловер, О.О. Мильман. – Москва: Энергоатомиздат, 1985. – 240 с.
2. Мильман, О.О. Воздушно-конденсационные установки / О.О. Мильман, В.А. Федоров. – Москва: Изд-во МЭИ, 2002. – 208 с.
3. STI ATC-107. Acceptance Test Code for Air Cooled Condensers. Cooling Technology Institute, 2011.
4. ASME PTC 30.1-2007. Air-Cooled Steam Condensers. ASME, 2007.
5. GB/T 27698.1-2023. Performance test methods for heat exchangers. Part 1: General requirements. Standard of the People's Republic of China, 2023.

N.A. Kashanov^{1,2}, A.V. Ptakhin¹, V.S. Krylov¹, O.O. Milman¹

*¹ ZAO NPVP «Turbocon», 248010, Kaluga,
st. Komsomolskaya Grove, 43*

*² Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University,
248002, Kaluga, Universitetskiy Gorodok, str. 1*

REVIEW OF FOREIGN AND DOMESTIC METHODS OF TESTING AIR CONDENSATION INSTALLATIONS

***Л.Р. Каюмова^{1,2*}, Е.И. Калинин^{1,2},
В.М. Молочников¹, Н.Д. Пашкова¹***

¹ Федеральный исследовательский центр, Казанский научный центр РАН, 420111, г. Казань, ул. Лобачевского, 2/31, а/я 261,

** kayumova.lian@yandex.ru*

² Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18, корп.1

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАКРУЧЕННОГО ТЕЧЕНИЯ В ГЛАДКОЙ ТРУБЕ ПРИ УМЕРЕННЫХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА

Закрученные потоки нашли широкое применение практически во всех отраслях современной техники: от медицинских приборов до металлургии, энергетики и ракетно-космических устройств. В основу исследования легла статья о численном моделировании, посвященная поиску оптимальной формы направляющих лопаток [1]. Однако вопросы структуры течения в публикации изучались не так подробно, рассматривалось только одно число Рейнольдса. В результате этого было решено провести исследования при входном ламинарном режиме течения на большем количестве чисел Рейнольдса: 240, 500, 800, 1200 и 1640 соответственно. Численное моделирование является незаменимым инструментом в данной задаче, так как позволяет получить непрерывную картину трехмерных структур. Расчетная область включает в себя завихритель с углом лопаток 0° на входе и 23° на выходе и участок гладкой трубы 20 калибров (диаметр канала $d = 17,4$ мм). Граничные условия: на входе единичный безразмерный профиль скорости и давление 1 атмосфера, на выходе Flow Rate Weighting = 1 (весь поток, который проходит входное сечение, должен пройти через выходное сечение) и нулевой градиент давления. Для численного ре-

шения использовался стационарный решатель, схема SIMPLE – для согласования полей скорости и давления, метод решения – метод конечных объемов 2-го порядка точности.

Непосредственно за завихрителем образуются 4 высокоскоростных зоны, так как использовался четырехлопастной завихритель. При $Re = 240$ можно наблюдать четко выраженные следы без смещения максимума скорости внутри области. С увеличением числа Рейнольдса происходит отклонение наибольшего значения рассматриваемого параметра относительно центра зоны в сторону закрутки потока (рис. 1, *а*). Далее эти 4 следа начинают вращение относительно оси канала. На определенном удалении от завихрителя (в зависимости от числа Рейнольдса) эти зоны начинают сливаться в единый вихрь. Стоит отметить, что полное выравнивание профиля относительно оси канала происходит только на $Re = 240$, а по мере увеличения числа Рейнольдса форма «скоса» максимума скорости, который наблюдался в высокоскоростных зонах непосредственно за лопаткам, переходит на границу вихря (рис. 1, *б*).

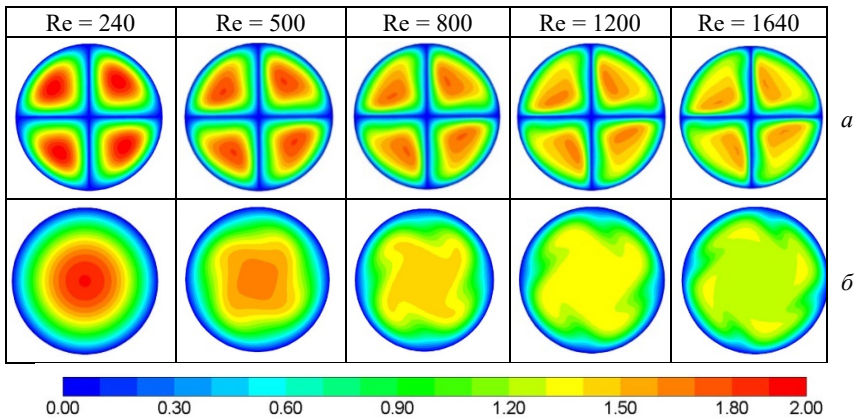


Рис. 1. Поля продольной компоненты скорости (локальная скорость, отнесенная к средней скорости потока на входе в завихритель): *а* – в выходном сечении завихрителя; *б* – на расстоянии 10 калибров от завихрителя

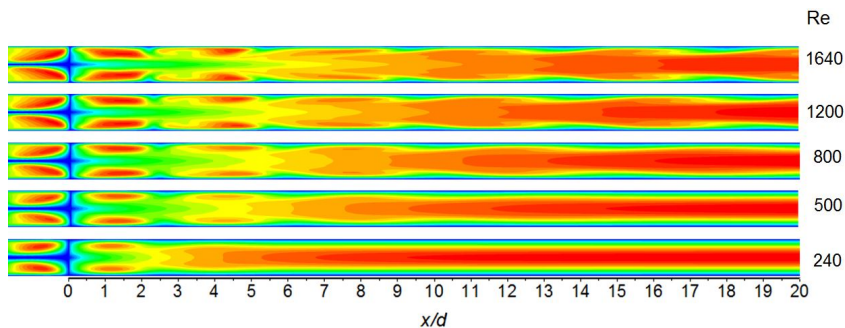


Рис. 2. Профили продольной компоненты скорости

Рассмотрим поле продольной компоненты скорости при продольном разрезе канала. На рис. 2 можно наблюдать, что на всех числах Рейнольдса область высокой скорости за завихрителем составляет порядка двух калибров по длине канала. При $Re = 240$ следы от лопаток быстро размываются ($x/d \approx 3$) и на расстоянии $x/d \approx 8$ профиль скорости приобретает классический ламинарный профиль. При $Re = 500$ профиль на рассматриваемой области еще не принимает профиль Пуазейля, но имеет явную тенденцию, так как при больших числах Рейнольдса можно наблюдать явную периодичность, связанную с частотой вращения вихря, который при $Re = 500$, по-видимому, по мере удаления от завихрителя затухает.

Для оценки интенсивности закрутки (критерий подобия закрученного течения) [2] результаты, полученные в данной работе (методом численного моделирования), сравнивались с экспериментальными данными, опубликованными в работе [3].

За завихрителем степень закрутки практически одинаковая, а по мере удаления на малых числах Рейнольдса ($Re = 240$ и 500) закрутка быстро затухает. Тогда как $Re = 800$ и выше она сохраняется на одном уровне. Результаты эксперимента и численного моделирования хорошо согласуются между собой, а отличия вблизи завихрителя объясняются тем, что экспериментальное исследова-

ние проводилось путем смещения плоскости лазерного ножа, которое не позволяет полноценно измерить сложное трехмерное течение.

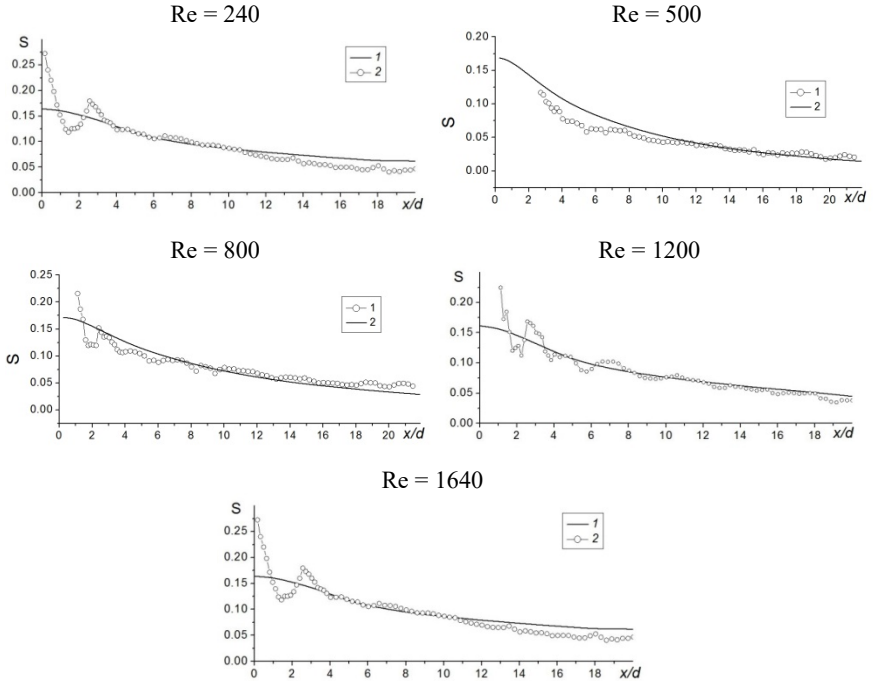


Рис. 3. Изменение степени закрутки потока по длине трубы за завихрителем 23:
 1 – по результатам численного моделирования; 2 – по экспериментальным
 данным [3]

В результате можно сделать вывод о том, что созданная модель хорошо и достаточно полно описывает характер течения за лопаточным завихрителем с углом закрутки 23 градуса на умеренных числах Рейнольдса.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ №25-19-00133.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Helgadóttir Á. et al.* Mesh twisting technique for swirl induced laminar flow used to determine a desired blade shape // *Applied Sciences*. – 2018. – Vol. 8. – № 10. – P. 1865.

2. *Щукин, В.К.* Теплообмен, массообмен и гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах / В.К. Щукин, А.А. Халатов. – Москва: Машиностроение – 1982. – 200 с.

3. *Молочников, В.М.* Эволюция закрученного потока в круглой трубе после лопаточного завихрителя при умеренных числах Рейнольдса / В.М. Молочников, Н.Д. Пашкова, А.А. Паерелий // *Теплофизика и аэромеханика*. – Т. 32. – № 4. – 2025. – С. 667-682.

***L.R. Kayumova*^{1,2*}, *E.I. Kalinin*^{1,2}, *N.D. Pashkova*¹,
*V.M. Molochnikov*¹**

¹ *Federal State Budgetary Institution of Science «Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences», 420111, Russian Federation, Tatarstan, Kazan, ul. Lobachevskogo, 2/31,*

** kayumova.lian@yandex.ru*

² *Kazan Federal University, 420008, Russian Federation, Tatarstan, Kazan, ul. Kremlyovskaya 18/1*

NUMERICAL SIMULATION OF SWIRLING FLOW IN A SMOOTH PIPE AT MODERATE REYNOLDS NUMBERS

*А. Клименко *, С.А. Шуляев, С.С. Кропотова*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634034, Томск, просп. Ленина, 30,

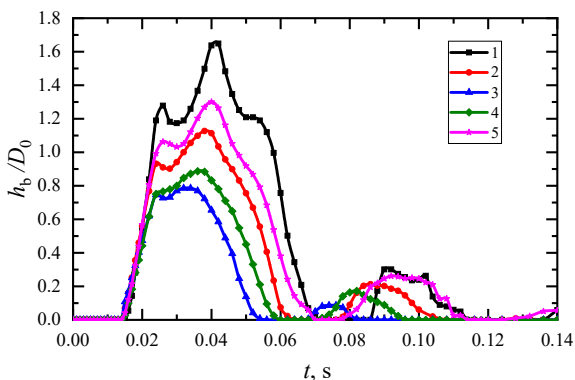
** ayk40@tpu.ru*

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КАПЕЛЬ С ПОРИСТЫМ СЛОЕМ УГОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ

Столкновение капель жидкостей с пористыми средами представляет собой фундаментальную задачу в области гидродинамики, материаловедения и инженерии поверхностей. Закономерности взаимодействия определяют эффективность таких процессов, как впитывание, растекание и испарение [1,2]. Столкновение капель воды с твердыми пористыми поверхностями хорошо изучены [3]. Однако влияние поверхностно-активных веществ (ПАВ) на процессы соударения с пористыми поверхностями остается недостаточно исследованным. Целью настоящей работы являлось установление влияния ПАВ на соударения капель растворов с пористым слоем угольных частиц.

При проведении экспериментальных исследований в качестве жидкостей использовались вода и 4 водных раствора ПАВ с концентрацией в 0,01 %: АФФФ, ОП-10, сульфонол, СМАРТ. Выбор ПАВ обусловлен их широким применением при тушении горючих жидкостей, в горнорудной промышленности, а также в составе моющих средств для очистки различных поверхностей. В качестве пористой поверхности использовался измельченный уголь марки А. Для обеспечения равномерного пористого слоя использовался гидравлический пресс с усилием 0,5 Н. Подробная методика проведения экспериментальных исследований и экспериментальный стенд приведены в работе [4].

На рисунке представлены зависимости высоты отскока капли от времени для различных растворов ПАВ при скорости столкновения капли $U = 0,8$ м/с. Определено, что для воды максимальное значение отношения высоты отскока h_b к начальному диаметру капли D_0 достигает 1,65. Введение ПАВ существенно снижает максимальное значение h_b/D_0 . Например, для растворов ОП-10 и сульфанола значения h_b/D_0 составляют 0,79 и 0,88 соответственно, для АФФФ и СМАРТ максимальные значения h_b/D_0 достигают 1,13 и 1,3 соответственно. Это объясняется тем, что жидкости с большей вязкостью препятствуют сильной деформации капли, а также такие растворы (ОП-10, сульфанол) обладают большей смачиваемостью по сравнению с водой, что приводит к увеличению площади контакта с прессованной поверхностью и способствует захвату большего количества угольных частиц, а это увеличивает эффективную массу капли и дополнительно демпфирует ее отскок.



Зависимости высоты отскока капли от времени при варьировании ПАВ ($U \approx 0,8$ м/с;

$D_0 \approx 2,6$ мм): 1 – вода; 2 – АФФФ; 3 – ОП-10; 4 – сульфанол; 5 – СМАРТ

Таким образом, эффективность подавления отскока капли на прессованной угольной поверхности определяется снижением по-

верхностного натяжения и увеличением вязкости, а также ускорением растекания и усиления адгезионного взаимодействия с твердой фазой.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-71-10040, <https://rscf.ru/project/23-71-10040/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Katarkar, A.S. et al.* A review on the effects of porous coating surfaces on boiling heat transfer // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – Vol. 44. – Pp. 362–367.

2. *Espin, L., Kumar, S.* Droplet spreading and absorption on rough, permeable substrates // *Journal of Fluid Mechanics*. 2015. – Vol. 784. – Pp. 465–486.

3. *Reis, Jr N.C., Griffiths, R.F., Santos, J.M.* Numerical simulation of the impact of liquid droplets on porous surfaces // *Journal of computational physics*. – 2004. – Vol. 198. – № 2. – Pp. 747–770.

4. *Antonov, D.V. et al.* Individual and combined effects of roughness and wettability of surface on the collision dynamics // *Physics of Fluids*. – 2025. – Vol. 37. – № 9. – P. 093352.

A. Klimenko*, C.A. Shulyaev, C.C. Kropotova

*National Research Tomsk Polytechnic University,
634034, Russian Federation, Tomsk, ave. Lenin Street, 30,*

**ayk40@tpu.ru*

THE EFFECT OF SURFACTANTS ON THE CHARACTERISTICS OF DROPLET INTERACTION WITH A POROUS LAYER OF COAL PARTICLES

К.Д. Клочков^{1,2*}, П.В. Козлов², Ю.В. Левашов²

¹ *Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5 стр. 1,*

** klochkov_kd@mail.ru*

² *Научно-исследовательский институт механики МГУ
им. М.В. Ломоносова, 119192, г. Москва, Мичуринский пр. 1*

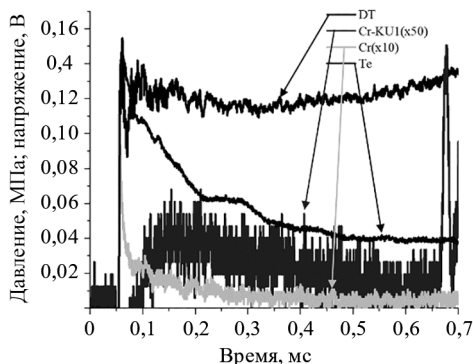
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ОТ УДАРНО НАГРЕТЫХ ГАЗОВ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ДЕТЕКТОРОМ

Задача измерения тепловых потоков в быстропротекающих процессах, характерных для ударных труб, представляет особый практический интерес. Предлагаемая в работе методика экспериментального определения теплового потока может быть применена в таких областях, как испытания двигателей, исследования фазовых переходов, физика плазмы, разработка систем термозащиты. Однако использование традиционных методов – классических термопар, калориметров – оказывается малоэффективным в процессах, характерные времена протекания которых составляют доли микросекунд [1].

В качестве перспективного решения для измерения быстроменяющихся тепловых потоков предлагается использовать специализированные термоэлектрические детекторы. Ключевая особенность этих устройств – уникальная наклонная столбчатая структура, выполненная из хрома, или теллура толщиной 0,3–0,4 мкм, которая генерирует сигнал термоЭДС в ответ на мгновенное тепловое воздействие [2].

Для верификации работоспособности и динамических характеристик термоэлектрического детектора в условиях высоких температур была проведена серия экспериментов на ударной трубе

НИИ механики МГУ. Исследованы три типа детекторов: открытые структуры на основе хрома (Cr) и теллура (Te), а также детектор Cr-KU1 с защитным стеклом КУ-1. Диапазон температур газа за отраженной ударной волной составлял от 1000 до 5800 К, давлений – от 0,05 до 1,80 МПа. Характерная осциллограмма сигналов представлена на рисунке.



Зависимость сигналов термоэлектрических детекторов и датчика давления от времени: DT – датчик давления; Cr-KU1 – ТД из хрома, закрытый стеклом; Cr – ТД из хрома; Te – ТД из теллура

Детектор Cr-KU1, изолированный от прямого контакта с газом, регистрирует радиационную составляющую теплового потока: его сигнал после скачка выходит на стационарный уровень. Контактные детекторы Cr и Te фиксируют суммарный конвективно-радиационный поток; спад сигнала во времени соответствует классической модели развития теплового пограничного слоя на торцевой стенке трубы [3].

Время нарастания сигнала детектора на основе хрома составляет 0,2 мкс, что на два порядка превосходит быстродействие традиционных калориметрических датчиков.

Термоэлектрические детекторы на основе Cr и Te, успешно апробированные в условиях ударной трубы, обладают быстродей-

ствием (0,2 мкс), термостойкостью до 5800 К, стабильностью характеристик и способностью разделять конвективную и радиационную составляющие теплового потока. Полученные результаты позволяют рекомендовать их в качестве штатного средства для прямых измерений тепловых нагрузок в импульсных газодинамических установках.

В настоящей работе представлены результаты серии экспериментов и их детальная обработка, верификация работоспособности датчиков при разных начальных условиях, оценка быстродействия датчика на основе C_r .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Альмяшев, В.И. и др.* Комплексный термический анализ / В.И. Альмяшев и др. – Санкт-Петербург.: Изд-во «Лема», 2017. – 193 с.

2. *Kotov, M.* The analysis of applicability of thermoelectric radiation detectors for heat flux measurements behind a reflected shock wave // *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, doi:10.1088/1742-6596/2103/1/012218.

3. *Лыков, А.В.* Теория теплопроводности: учебное пособие / А.В. Лыков. – Москва: Высшая школа, 1967. – 600 с.

K.D. Klochkov^{1,2*}, P.V. Kozlov², Yu.V. Levashov²

¹ *Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Baumanskaya Street, 5, Building 1,*

** klochkov_kd@mail.ru*

² *Research Institute of Mechanics at Lomonosov Moscow State University, 119192, Moscow, Michurinsky Prospekt 1*

INVESTIGATION OF HEAT FLOW FROM IMPACT-HEATED GASES USING A THERMOELECTRIC DETECTOR

*А.В. Кравченко**, *А.В. Рудинский*, *К.Ю. Арефьев*,
М.В. Ананян, *А.А. Остроухов*

ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Москва

* avkravchenko@ciam.ru

АНАЛИЗ ВИНТОВЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В ТРУБКАХ

Одним из распространенных видов теплообменных аппаратов являются кожухотрубные (рис. 1) [1]. «Горячий» газ обтекает трубки с внешней стороны, проходя через трубный пучок. «Холодный» газ течет в трубках. При такой схеме течения гидравлические потери внутри трубок значительно меньше, чем снаружи. При этом для увеличения мощности теплообменника необходимо увеличить либо количество труб, либо общую длину трубок. В обоих случаях возрастают потери в контуре горячего газа, что приводит к необходимости увеличения давления, что в свою очередь увеличивает нагрузку на корпус. Соответственно для решения данных проблем необходимо увеличивать коэффициент теплоотдачи внутри трубок.

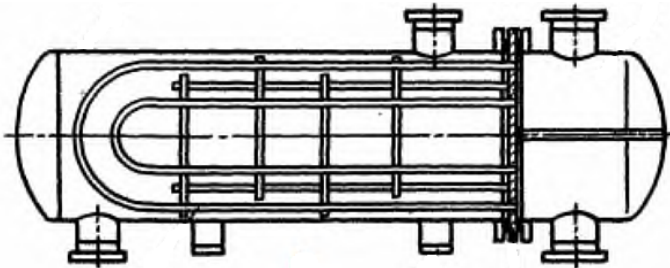


Рис. 1. Общий вид кожухотрубного теплообменного аппарата с U-образными трубками

В работе рассматриваются результаты численного моделирования теплообмена в трубках с использованием различных конструкций для интенсификации теплообмена, показанных на рис. 2.

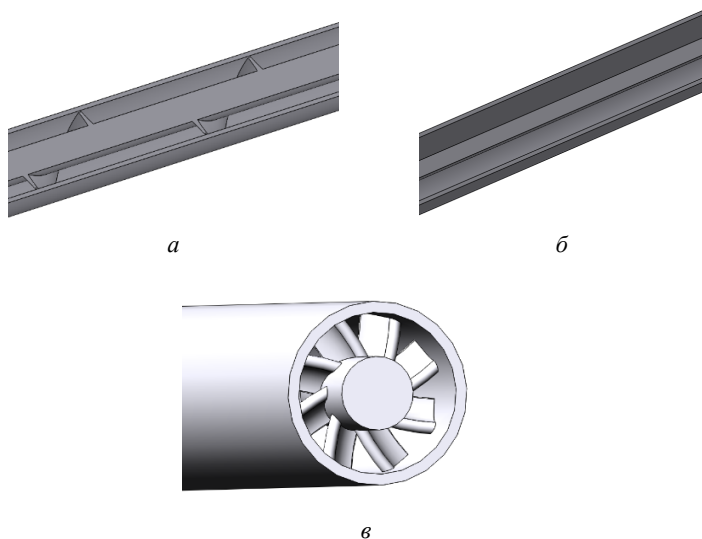


Рис. 2. Конструкций для интенсификации теплообмена: *а* – винтовая поверхность с различным шагом; *б* – центральное тело; *в* – лопастная решетка

Применение одно- и двухлопастного винтов повышает тепловой поток от 1,8 до 5,2 раз в зависимости от шага витков. При этом значительной разницы в повышении теплопередачи между однолопастным и двухлопастным винтом не наблюдается, но двухлопастной винт относительно однолопастного дает примерно на 25% больше потерь полного давления. Значительная часть повышения теплообмена при использовании винтовых поверхностей происходит из-за касания винта внутренней стенки трубки. Без данного касания повышение теплообмена снижается на 20%.

Также результаты показали, что повышение теплообмена в винтах связано с уменьшением проходного сечения и, как след-

ствии, повышением числа Рейнольдса, а не с эффектами закрутки. Такого же увеличения теплообмена можно добиться применением центрального тела.

Получена зависимость потерь полного давления от числа витков винтового аппарата. При ограничении полного располагаемого давления в системе получен максимум функции произведения разницы располагаемого и входного давлений на тепловую мощность трубки с винтовым аппаратом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Байгалиев, Б.Е.* Теплообменные аппараты: учебное пособие / Б.Е. Байгалиев, А.В. Щелчков, А.Б. Яковлев, П.Ю. Гортышов. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2012. – 180 с.

*A.V. Kravchenko**, *A.V. Rudinskiy*, *K.Y. Arefev*,
M.V. Anayan, *A.A. Ostroukhov*

Central Institute of Aviation Motors, 111116, Russian Federation,

* avkravchenko@ciam.ru

**SCREW DEVICES ANALYSIS FOR HEAT
TRANSFER INTENSIFICATION IN PIPES**

И.М. Курышев, А.Д. Худякова, Д.В. Сапронов

ЦИАМ им. П.И. Баранова, Москва

УЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ СВОЙСТВ ИЗДЕЛИЙ ИЗ НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ПРИ АНАЛИЗЕ ИХ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

В процессе изготовления деталей узлов газотурбинных двигателей свойства используемых материалов определяют при проведении различных испытаний. Образцы для них вырезают из той же заготовки, что и сама деталь, чтобы учесть все произведенные над ней технологические операции. Образцы вырезают не в одном, а в разных направлениях: осевом, радиальном и окружном, после чего испытывают и проводят статистическую обработку результатов испытаний для определения усредненных характеристик конструкционной прочности. В некоторых случаях наблюдается существенный разброс свойств, как показано, например, в работе [1], который может быть вызван, в том числе, технологическими причинами.

Авторы провели статистическую обработку результатов испытаний 89 образцов из трех заготовок детали из никелевого сплава на кратковременную прочность при комнатной температуре. Кривые деформирования были прорежены и сглажены методом скользящего среднего по трем точкам с наложением фильтра Савицкого – Голея. Таким образом, для каждой из 89 кривой деформирования были определены численные значения модуля упругости, предела пропорциональности, условного предела текучести, предела прочности, деформаций в пределе прочности, а также относительного удлинения.

Затем для каждой механической характеристики были сформированы 3 выборки (каждая из соответствующей заготовки), и были проверены гипотезы принадлежности выборок к единой генеральной совокупности. Для проверки гипотез использовали тесты Андерсона – Дарлинга и Краскела – Уоллиса. Результаты первичного анализа показали, что выборки неоднородны.

Далее был применен параметрический метод двухфакторного дисперсионного анализа (ANOVA). Исследовали возможное влияние со стороны отдельной заготовки и направления вырезки образца (осевое и радиальное) на средние значения характеристик кратковременной прочности. Уровень значимости принимали равным 0,01. Результаты анализа показали, что влияние направления вырезки образца более значимо, чем влияние номера заготовки для таких характеристик, как предел пропорциональности, предел текучести, предел прочности.

Были произведены расчеты напряженно-деформированного состояния модельного диска методом конечных элементов при поэтапном приложении нагрузки для двух случаев. В первом случае материал считали изотропным, во втором – учитывали различия упругопластических свойств вдоль осевого и радиального направлений. В обоих случаях использовали модель теории течения с изотропным упрочнением: в первом случае с потенциалом Мизеса, во втором – с потенциалом Хилла. Кривые деформирования строили в соответствии с алгоритмом [1]. Сделан вывод о необходимости учета технологической анизотропии при расчетной оценке прочностных характеристик некоторых видов изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Худякова А.Д., Сапронов Д.В., Курьшев И.М. Построение статистически обоснованных значений характеристик конструкционной прочности: кривые деформирования // *Авиационные двигатели*. – 2025. – № 4 (29). – С. 61–71.

2. *Ножницкий, Ю.А. и др.* Требования к порядку и процедурам оценки расчетных значений характеристик конструкционной прочности металлических материалов, основных и особо естественных деталей при сертификации газотурбинных двигателей // Вестник СГУ. – 2015. – Т.14. – № 3–1. – С. 37–48.

I.M. Kuryshev, A.D. Khudyakova, D.V. Sapronov

Central Institute of Aviation Motors (CIAM)

**TAKING INTO ACCOUNT TECHNOLOGICAL
ANISOTROPY OF THE PROPERTIES OF
NICKEL-ALLOY PRODUCTS WHEN ANALYZING
THEIR STRESS-STRAIN STATE**

*Арайгули Куомалибиекэ *, К.А. Андрианова, Л.М. Амирова*

*Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.Н. Туполева – КАИ,
420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10,*

** arai0415@mail.ru*

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОЛУЧЕНИЯ НОВЫХ ЭПОКСИДНЫХ ПЕНОПЛАСТОВ

Сэндвич-изделия с пенопластовыми сердечниками благодаря сочетанию жесткости, прочности и легкости находят широкое применение в авиационной, автомобильной и многих других областях промышленности. Эпоксидные пенопласты, особенно получаемые с использованием терморасширяющихся микросфер, являются наиболее перспективными. Вспенивание таких эпоксидных композиций можно проводить с одновременным формованием сэндвич-изделия, например, с углекомпонитной обшивкой. При этом обеспечивается высокая адгезия пенопласта к обшивке за счет формирования единой полимерной сетки, так как большинство углепластиков изготавливают на основе эпоксидных связующих. Однако сэндвич-изделия, изготавливаемые с эпоксидными пенопластовыми сердечниками, практически отсутствуют, а исследований крайне мало. Это можно объяснить тем, что при формировании таких материалов протекают сложные теплофизические процессы, требующие проведения сложных измерений с применением современных теплофизических методов. Поэтому данная работа, посвященная исследованию теплофизических процессов получения эпоксидных пенопластов с использованием терморасширяющихся микросфер, является весьма актуальной.

В работе были поставлены задачи изучения теплофизических и химических процессов, протекающих при изготовлении эпоксид-

ных пенопластов, а также теплофизических свойств исходных материалов и полученных пенопластов различной плотности и состава. В качестве исходных материалов для синтеза пенопластов были использованы ряд эпоксидных олигомеров и отвердителей различного химического строения, а также терморасширяющиеся полимерные микросферы. Для получения сэндвич-изделий применяли различные промышленные препреги на основе углетканей и эпоксидных связующих. Для исследования и контроля материалов и процессов в работе были использованы: дифференциальная сканирующая калориметрия (DSC 204, Netzsch), метод стационарного теплового потока (прибор HFM 446 Lambda Medium, Netzsch), термомеханический анализ (ТМА 402 F1 Hyperion, Netzsch), динамический механический анализ (DMA Q800, TA Instruments), реометрия (ротационный динамический реометр HAAKE RheoStress 6000), измерение давления вспенивания (система мониторинга процесса формирования композитов DiamonPlus, INASCO).

Для получения эпоксидных пенопластов в первую очередь должны быть согласованы температурно-временные режимы химической реакции эпоксидных олигомеров с отвердителями и терморасширения микросфер. Поэтому методами ДСК были изучены термокинетические параметры отверждения эпоксидных композиций и подобраны микросферы с наиболее подходящими ТМА кривыми расширения. На основании реокинетических исследований для подобранных пар микросфера/эпоксидная композиция оптимизированы температурно-временные режимы получения пенопласта, показана возможность одноступенчатого режима без перегрева даже для крупногабаритных сэндвич-изделий с подобранными по режиму отверждения углепластиками. Для разнотолщинных пенопластовых сэндвич-изделий в зонах утолщения пенопласта предложена технология фронтального вспенивания «из центра к обшивке» за счет выкладки эпоксидных композиций раз-

личного состава с изменяющейся температурой вспенивания. Такая технология исключает снижение теплоподвода, так как пенопласт образуется вначале в глубине изделия и затем фронт вспенивания распространяется к наружным слоям сэндвич-изделия. Для одновременного формования безпористой высокопрочной углепластиковой обшивки сэндвич-изделий создавалось необходимое давление при вспенивании микросфер путем оптимизации концентрации микросфер в пенопластах различной плотности. Проведены исследования зависимости теплопроводности и других свойств пенопластов от плотности и содержания микросфер, продемонстрировано отклонение от уравнения Гибсона – Эшби для пенопластов с плотностью менее 100 кг/м^3 . Предложены составы эпоксидных композиций для одновременного формования сэндвич-изделий с пенопластовым сердечником с регулируемой плотностью в различных частях изделия, что позволяет управлять теплофизическими и прочностными свойствами пенопласта.

Таким образом, на основании проведенных теплофизических исследований были разработаны составы и оптимизированы температурно-временные параметры получения эпоксидных пенопластов на основе терморасширяющихся микросфер, а также предложена технология интенсивного формования сэндвич-изделий с одновременным вспениванием эпоксидных композиций.

Aeraiguli Kuomalibieke*, K.A. Andrianova, L.M. Amirova

*Kazan National Research Technical University
named after A.N. Tupolev–KAI, 420111, Russian Federation,
Tatarstan, Kazan, K. Marksa st., 10,*

** arai0415@mail.ru*

THERMOPHYSICAL ASPECTS OF PRODUCING NEW EPOXY FOAMS

**М.Р. Кучкарова^{1*}, С.А. Пантелеев^{1,2},
Р.Р. Шакиров¹, Н.И. Михеев¹**

¹ *Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН», 420111, Казань, ул. Лобачевского 2/31, а/я 261,*

** maluma2507@mail.ru*

² *Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Казань, ул. Кремлевская, 35*

ТУРБУЛИЗАЦИЯ И ЛАМИНАРИЗАЦИЯ В СТАЦИОНАРНОМ И ПУЛЬСИРУЮЩЕМ ПОТОКЕ

Описание поведения потока в переходном режиме течения остается в настоящее время актуальной темой для исследования, поскольку в литературе до сих пор нет емкого представления и объяснения механизмов формирования ламинарно-турбулентного перехода. Для пульсирующего течения ситуация значительно усложняется из-за наличия нескольких управляющих параметров (рис. 1).

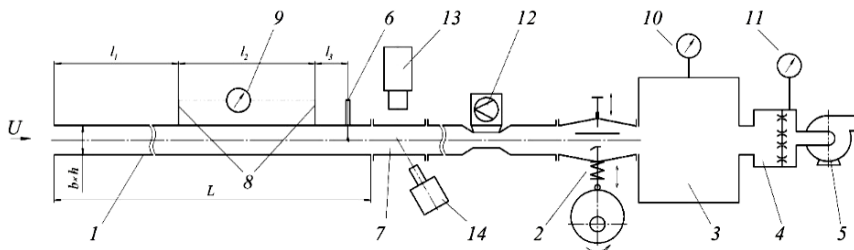


Рис. 1. Схема рабочей установки: 1 – рабочий участок; 2 – пульсатор потока; 3 – ресивер; 4 – критические сопла с задвижками; 5 – воздушный компрессор; 6 – термоанемометр; 7 – рабочий участок; 8 – датчик давления; 9, 10, 11 – вакуумметр; 12 – расходомер; 13 – камера; 14 – расходомер

При переходных числах Рейнольдса в стационарном потоке турбулентность появляется в виде локализованных в пространстве

структур, так называемых турбулентных порывов (в англоязычной литературе puff) (рис. 2).

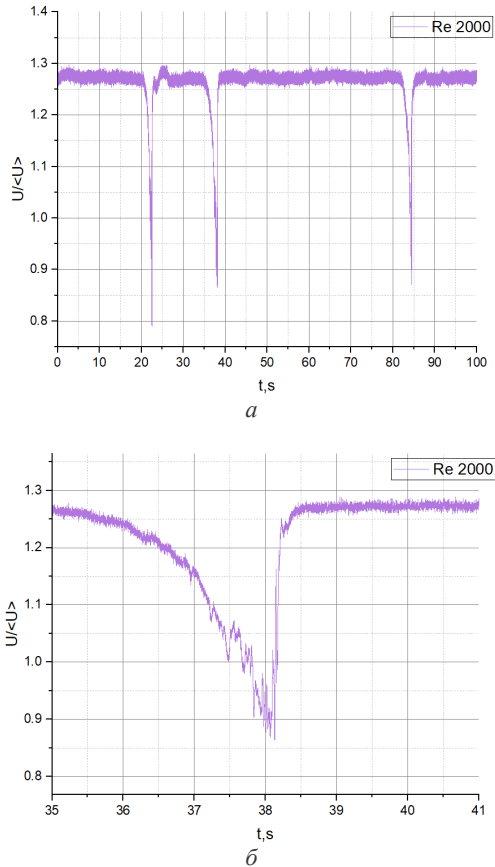


Рис. 2. Возникновение турбулентных пятен в стационарном режиме:
a – на осциллограмме скорости; *b* – в увеличенном виде

Турбулентный порыв представляет собой интересный гидродинамический объект, который в некотором отношении можно рассматривать как структурную единицу турбулентности. Течение в определенный момент времени может турбулизоваться и через

некоторый промежуток времени ламинаризоваться, вернуться в первоначальное состояние. Причем этот процесс является периодическим и при увеличении числа Рейнольдса временной промежуток между двумя фазами турбулизации сокращается.

Для пульсирующего режима установлено, что при плавном увеличении среднего за период колебаний числа Рейнольдса при фиксированной амплитуде и частоте вынужденных колебаний потока первые турбулентные пятна (порывы) возникают в начале фазы торможения потока, когда текущая скорость еще близка к максимальной за период, но уже появился положительный градиент давления. Пример осциллограмм скорости на различных расстояниях от оси канала со сформированными периодическими турбулентными пятнами представлен на рис. 3.

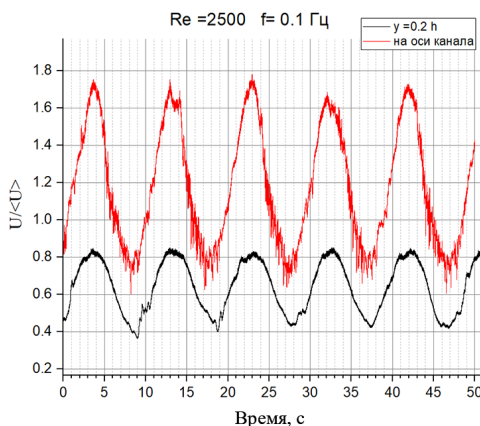


Рис. 3. Возникновение турбулентных пятен при пульсирующем режиме

В пульсирующем потоке механизм перехода к турбулентности такой же, как и в стационарном случае (рис. 3). Однако этот переход при пульсациях потока нельзя характеризовать только числом Рейнольдса, поскольку он зависит еще и от изменяющегося по времени продольного градиента давления.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ
№ 22-19-00507-П.*

M.R. Kuchkarova^{1*}, S.A. Pantelev^{1,2}

R.R. Shakirov¹, N.I. Mikheev¹

*¹ Federal State Budgetary Institution of Science «Kazan Scientific
Center of Russian Academy of Sciences», 420111 Russian Federation,
Tatarstan, Kazan, ul. Lobachevskogo, 2/31,*

** maluma2507@mail.ru*

²Kazan Federal University. 420 008, Kazan, Kremlevskaya St., 35,

**TURBULIZATION AND LAMINARIZATION
IN STATIONARY AND PULSATING FLOW**

**М.Р. Кучкарова^{1*}, С.А. Пантелеев^{1,2},
Р.Р. Шакиров¹, Н.И. Михеев¹**

¹ *Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН», 420111, Казань, ул. Лобачевского 2/31, а/я 261,*

** maluma2507@mail.ru*

² *Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Казань, ул. Кремлевская, 35*

ИЗМЕНЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ТЕЧЕНИЯ В КАНАЛЕ

Для определения коэффициента гидравлического сопротивления в условиях пульсирующего течения проведена серия экспериментов в прямом канале круглого поперечного сечения (рис. 1). Диаметр канала составляет $d = 47$ мм, длина рабочего участка $L = 9650$ мм, что соответствует относительной длине $L/d \approx 148$. В экспериментах поддерживалось турбулентное течение воздуха.

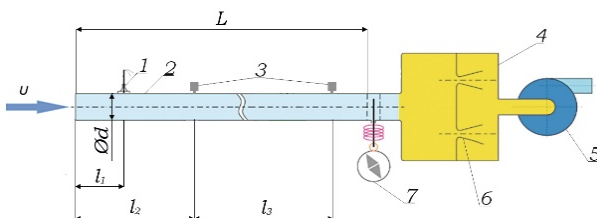


Рис. 1. Схема рабочей установки: 1 – расположение термоанемометра; 2 – рабочий участок потока; 3 – штуцеры для датчика перепада давления; 4 – ресивер; 5 – воздушный компрессор; 6 – критические сопла с задвижками; 7 – пульсатор, - - - - экспоненциальная аппроксимация экспериментальных точек

Для двух чисел Рейнольдса $Re = 17\,000$ и $Re = 30\,000$ были проведены эксперименты с записью величин ΔP и U при варьировании частоты пульсаций в диапазоне частот $f = 0,05 - 6,5$ Гц

($Wo = 3,4 - 38$). Для определения коэффициента сопротивления λ измеряемые величины были осреднены по большому целому числу периодов. Величина среднерасходной скорости определялась при помощи калиброванных расходных сопел с учетом создаваемого в ресивере разряжения. Итоговое значение коэффициента λ определялось из формулы Дарси – Вейсбаха:

$$\langle \Delta P \rangle = \lambda \frac{L \rho \langle U \rangle^2}{d}$$

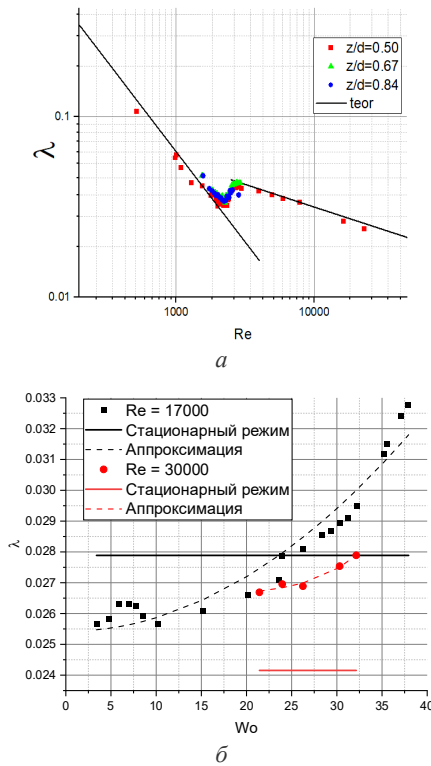


Рис. 2. Зависимость коэффициента сопротивления: *а* – от числа Рейнольдса в стационарном потоке; *б* – от числа Вомерсли при двух значениях числа Рейнольдса; — — соответствует коэффициенту сопротивления в стационарном режиме

Эксперименты по исследованию коэффициента гидравлического сопротивления в пульсирующем потоке показали, что до определённого значения числа Вомерсли коэффициент гидравлического сопротивления ниже стационарного значения. Это разница составляет около 10%. При дальнейшем увеличении числа Вомерсли коэффициент сопротивления начинает превышать стационарное значение.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 22-19-00507-П.

***M.R. Kuchkarova^{1*}, S.A. Panteleev^{1,2},
R.R. Shakirov¹, N.I. Mikheev¹***

¹ Federal State Budgetary Institution of Science «Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences», 420111, Russian Federation, Tatarstan, Kazan, ul. Lobachevskogo, 2/31,

** maluma2507@mail.ru*

² Kazan Federal University, 420 008, Kazan, Kremlevskaya St., 35

**CHANGES IN HYDRAULIC RESISTANCE UNDER
CONDITIONS OF PULSIVE FLOW IN A CHANNEL**

*И.С. Лазарев**

Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН», 420111, Казань, ул. Лобачевского, 2/31, а/я 26,

** Lazarevigor.2001@mail.ru*

О ВЫПАДЕНИИ ПАРАФИНА ПРИ ЗАВОДНЕНИИ НЕФТЯНЫХ ПЛАСТОВ

При разработке нефтегазовых месторождений температурные изменения, вызванные технологическими воздействиями, могут существенно влиять на физико-химические свойства пластовых флюидов. Особенно актуальной проблемой становится выделение из нефти парафина, который выпадает в осадок, образуя дисперсные частицы, оседающие на поверхности пор, что приводит к ухудшению фильтрационно-емкостных характеристик коллектора. В частности, кольматация пор парафином уменьшает пористость и проницаемость, а также увеличивает скин-фактор, что снижает продуктивность скважин. На это указывают многие исследования, связанные с анализом керна методом компьютерной томографии [1]. Таким образом, учет тепловых и химических факторов является неотъемлемой частью проектирования разработки месторождений.

Рассматривается задача двухфазной неизотермической многокомпонентной фильтрации нефти. Расчетная область является элементом симметрии пятиточечной системы заводнения и содержит две вертикальные, совершенные по степени вскрытия скважины – нагнетательную и добывающую. Нефтяная фаза представлена как бинарная смесь нефти и растворенного в ней парафина. Пласт нетеплоизолированный, потери тепла через кровлю и подошву пласта моделировались по схеме Ловерье [2]. Учтены процессы фазовых переходов, связанные с кристаллизацией парафина при сни-

жении температуры, и последующее отложение твердых частиц в пористой среде. Процесс осаждения парафина предполагается равновесным и моделируется на основе теории идеального раствора для двухкомпонентной системы «нефть-парафин». Механизм блокировки пор описан с использованием функции распределения пор по размерам [3]. Полученная система дифференциальных уравнений дискретизировалась методом конечных объемов. Для совместного решения уравнений давления и насыщенности был использован метод IMPES (Implicit Pressure Explicit Saturation).

Разработанная математическая модель демонстрирует возможность прогнозирования изменений ФЕС пористой среды при изменении термобарических условий фильтрации. Численные эксперименты подтверждают, что наличие растворенных парафинов в нефти при заводнении пластов холодной водой приводит к замедлению разработки месторождения и снижению коэффициента извлечения нефти, что обусловлено коагуляцией порового пространства частицами парафина. Анализ дебитов показывает, что снижение продуктивности добывающих скважин в присутствии парафинов усиливается комбинированным воздействием роста вязкости флюидов при низких температурах и деградацией проницаемости пласта. Температурные поля указывают зависимость между зонами сниженной температуры и ухудшением фильтрационных характеристик, проявляющуюся в замедлении продвижения температурного фронта. Результаты подтверждают двойной негативный эффект низкотемпературного заводнения: термовязкостное сопротивление и механическая блокировка поровых каналов, что требует применения соответствующих методов интенсификации добычи. Перспективы развития модели связаны с интеграцией механизмов суффозии парафиновых частиц, более детальным учетом состава нефти и адаптацией параметров модели на основе промысловых данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sh. W., F.C.* Model-Assisted Analysis of Simultaneous Paraffin and Asphaltene Deposition in Laboratory Core Tests // *J. Energy Resour. Technol.* – 2005. – Vol. 127. – № 4. – Pp. 318–322.

2. *Алишаев, М.Г.* Расчет температурного поля пласта при инъекции жидкости для плоского фильтрационного течения // *Известия Академии наук СССР. Механика жидкости и газа.* – 1979. – № 1. – С. 67.

3. *Nikiforov, A.I. S.R., G.A.N.* Modeling of Paraffin Deposition During Oil Production by Cold Water Injection // *Lobachevskii J. Math.* – 2022. – Vol. 43. – № 5. – Pp. 1178–1183.

I.S. Lazarev*

Federal State Budgetary Institution of Science «Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences», 420111, Russian Federation, Tatarstan, Kazan, ul. Lobachevskogo, 2/31,

* Lazarevigor.2001@mail.ru, т/в 261

ABOUT THE PROCESS OF PARAFFIN DEPOSITION DURING OIL FORMATION FLOODING

*Д. Ларкин *, К.В. Костюшин*

*Национальный исследовательский
Томский государственный университет,
634050, г. Томск, проспект Ленина, д. 36,*

** d.m.i.t.r.y.l.a.r.k.i.n@mail.ru*

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ С ПОДВИЖНЫМ ЦЕНТРАЛЬНЫМ ТЕЛОМ

При эксплуатации ракетных двигателей в ряде случаев возникает необходимость корректировать величину и направление вектора тяги, например, для вывода космических аппаратов на заданные орбиты или при разъединении блоков ракеты. Для этих целей разработаны различные системы управления вектором тяги, одной из которых является использование центрального тела для изменения площади минимального сечения сопла [1, 2].

В настоящей работе рассматривается задача газовой динамики для моделирования течения продуктов сгорания при регулировании тяги осесимметричного двигателя с подвижным центральным телом. Математическое моделирование основано на решении нестационарной системы уравнений Эйлера в осесимметричной постановке. Для дискретизации и численного решения системы уравнений используется метод контрольного объема и схема С.К. Годунова, адаптированная для расчетов на подвижных сетках. Для моделирования перемещения центрального тела использовался гибридный алгоритм, сочетающий сглаживание сетки [3] и локальную перестройку расчетной области с последующей интерполяцией газодинамических параметров [4]. На основе разработанной методики расчета реализована программа

расчета для исследования осесимметричных нестационарных газодинамических процессов в камере сгорания и сопловом блоке, регулируемом по модулю тяги двигателя при изменяющейся геометрии расчетной области.

Исследовано влияние свободного объема и конфигурации камеры сгорания на параметры регулирования при неизменной площади подвода рабочего тела. В расчетах рассмотрены два рабочих тела, отличающихся термодинамическими характеристиками. В качестве граничных условий на проницаемой стенке задавался локальный газоприход и температура рабочего тела, на непроницаемых твердых стенках ставились условия непротекания, на оси симметрии – условия симметрии. Начальные условия соответствовали установившемуся течению при фиксированном начальном положении центрального тела, обеспечивающего регулирование расхода.

Проведено численное исследование процесса регулирования тяги при различных скоростях перемещения центрального тела на режимах увеличения и уменьшения тяги. Проанализирована динамика изменения поля скорости, давления и плотности в камере сгорания и сопловом блоке, а также нестационарные распределения осредненных по объему газодинамических параметров. Проанализированы переходные процессы при изменении площади критического сечения сопла, включая возникновение кратковременных отклонений тяги, связанных с запаздыванием отклика между соответствием текущего давления в камере и расходом рабочего тела через минимальное сечение сопла при его регулировании. Выполнено сравнение характеристик переходных процессов для различных конфигураций двигателей, параметров рабочего тела и скоростей регулирования.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2025-0004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Губертов, А.М.* Газодинамические и теплофизические процессы в ракетных двигателях твердого топлива / А.М. Губертов, В.В. Миронов, Д.М. Борисов и др.; под ред. А.С. Коротева. – Москва: Машиностроение, 2004. – 511 с.

2. *Липанов, А.М.* Проектирование ракетных двигателей твердого топлива / А.М. Липанов, А.В. Алиев. – Москва: Машиностроение, 1995. – 400 с.

3. *Lloyd, E.* On triangulation of a set of points in the plain // MIT Lab. Comp. Sc. Tech. Memo. – 1977. – № 88. – Pp. 1–56.

4. *Shamos, M.I., Hoey, D.* Geometric intersection problems // Foundations of Computer Science. – 1976. – Pp. 208–215.

D. Larkin*, K.V. Kostushin

National Research Tomsk State University, 634050,

Russian Federation, Tomsk, 36 Lenin Avenue,

** d.m.i.t.r.y.l.a.r.k.i.n@mail.ru*

INVESTIGATION OF UNSTEADY GAS-DYNAMIC PROCESSES IN AXISYMMETRIC ENGINES WITH A MOVABLE CENTRAL BODY

*Д. Ларкин *, И.В. Ерёмин*

*Национальный исследовательский
Томский государственный университет, 634050,
г. Томск, проспект Ленина, 36*

** d.m.i.t.r.y.l.a.r.k.i.n@mail.ru*

ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОЙ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНДЕНСИРОВАННОЙ ФАЗЫ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ СОПЛАХ

Задачи оптимизации и повышения энерготяговых характеристик энергетических установок требуют детального анализа двухфазных газодинамических процессов, протекающих в газодинамическом тракте. Одним из ключевых факторов, определяющих уровень двухфазных потерь удельного импульса, является вид функции плотности распределения конденсированной фазы (к-фазы) во входном сечении соплового блока. В настоящее время при численном моделировании многофазных течений используется одномодальный логарифмически нормальный закон распределения. Однако, как показывают результаты [1–3], фактическое распределение к-фазы на входе в сопло может существенно отличаться от него, в частности иметь многомодальную форму. Это обуславливает необходимость анализа влияния формы начальной функции распределения к-фазы на газодинамические характеристик сопла, включая двухфазные потери.

В данной работе выполнено математическое моделирование стационарного квазиодномерного полидисперсного двухфазного течения в осесимметричном сопле. Модель учитывает основные физические процессы взаимодействия газовой и дисперсной фаз, включая коагуляцию, дробление и вращение частиц к-фазы при их

столкновительном взаимодействии друг с другом. Методика расчета основана на методе квазиустановления для газовой фазы [4], в рамках которого стационарное решение формируется путем итерационного интегрирования уравнений газовой фазы в нестационарной постановке. Интегрирование полученной системы уравнений для газовой фазы выполнено с использованием схемы Годунова второго порядка точности. Уравнения для фракций частиц решаются в стационарной постановке с использованием неявной разностной схемы второго порядка типа предиктор-корректор для жестких систем уравнений.

Выполнено исследование по оценке влияния вида закона распределения частиц к-фазы по размерам во входном сечении сопла на параметры двухфазного течения и двухфазные потери. Проведенные расчеты показали, что влияние формы начального распределения для ряда течений, характеризующихся малой весовой долей к-фазы, не вносит значительных отличий в интегральные характеристики потока. При высокой весовой доле влияние формы начального распределения оказывает заметный вклад на энергопотребительские характеристики установки. В этих условиях изменяется интенсивность межфазного импульсного и теплового обмена, что приводит к заметным различиям в структуре потока и изменению уровня двухфазных потерь. Установлено, что при использовании начальных функций распределения с высоким значением средне-массового диаметра область начала активного взаимодействия между фазами смещается в дозвуковую часть сопла.

Полученные результаты исследования позволяют сделать вывод: вид начального распределения частиц по размерам во входном сечении сопла и весовая доля к-фазы могут оказывать существенное влияние на величину энергопотребительских характеристик в газодинамическом тракте энергоустановок.

*Работа выполнена в рамках государственного задания
Минобрнауки России, проект № FSWM-2025-0004.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Najjar, F.M., Ferry, J.P., Haselbacher, A., Balachandar, S.* Simulations of Solid-Propellant Rockets: Effects of Aluminum Droplet Size Distribution // *Journal of spacecraft and rockets*. – 2006. – Vol. 43. – № 6. – Pp. 1258–1270.

2. *Бабук, В.А., Будный, Н.Л., Ку克林, Д.И., Низяев, А.А.* Модель эволюции многофазного потока продуктов сгорания в камере двигательной установки и результаты ее численного анализа // *Известия российской академии ракетных и артиллерийских наук*. – 2020. – № 1 (111). – С. 53–60.

3. *Jackson, T.L., Najjar, F.M., Buckmaster J.* New Aluminum Agglomeration Models and Their Use in Solid-Propellant-Rocket Simulations // *J. Propul. Power*. – 2005. – Vol. 21. – № 5. – Pp. 925–936.

4. *Васенин, И.М., Архипов, В.А., Бутов, В.Г., Глазунов, А.А., Трофимов, В.Ф.* Газовая динамика двухфазных течений в соплах. – Томск: Изд-во Томского университета, 1986. – 264 с.

D. Larkin*, I.V. Eremin

*National Research Tomsk State University, 634050,
Russian Federation, Tomsk, 36 Lenin Avenue,*

** d.m.i.t.r.y.l.a.r.k.i.n@mail.ru*

INFLUENCE OF THE INITIAL DISTRIBUTION FUNCTION OF THE CONDENSED PHASE ON THE DISTRIBUTION OF GAS-DYNAMIC PARAMETERS IN AXISYMMETRIC NOZZLES

Ю.Л. Леухин, С.А. Федотова, П.Д. Алексеев*

*Северный (Арктический) федеральный университет
им. М.В. Ломоносова, 163002, г. Архангельск,
набережная Северной Двины, 17,*

** fedotova.s@edu.narfu.ru*

ВЛИЯНИЕ СНОСЯЩЕГО ПОТОКА НА ТЕПЛОТДАЧУ ВОГНУТОЙ ПОВЕРХНОСТИ, ОБДУВАЕМОЙ ИМПАКТНЫМИ СТРУЯМИ

Преодоление негативного влияния сносящего потока, формирующегося за счет истечения импактных струй из отверстий, расположенных вверх по потоку, позволяет повысить равномерность и интенсивность теплоотдачи на рабочих поверхностях рекуперативных устройств [1].

Исследование влияния сносящего потока на теплоотдачу вогнутой цилиндрической поверхности струйного рекуператора методом физического моделирования было выполнено на экспериментальном стенде, основным элементом которого является паровой калориметр, представленный на рис. 1.

Паровой калориметр 2 со специальными элементами подвода струй – вставки 1 с перфорацией и ресивера 7 для подвода сносящего потока представляет собой модель участка струйного модульного рекуператора [2]. Рабочая поверхность калориметра, обдуваемая струями, с внутренним диаметром 100 мм и вставка с наружным диаметром 59,5 мм, образуют кольцевой канал. Выдувные отверстия с диаметром $d_c = 3,5$ мм располагаются в коридорном порядке. Продольный и поперечный шаги между отверстиями равны и составляют 31,1 мм, что позволяет равномерно расположить по периметру шесть отверстий в 11 рядов по длине.

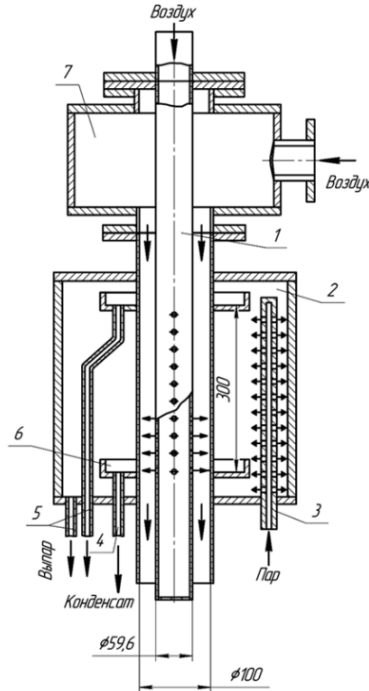


Рис. 1. Паровой калориметр

Данное устройство позволяет исследовать теплоотдачу от импульсных струй, вытекающих из внутренней вставки *1*, при наличии и отсутствии сносящего потока, а также теплоотдачу при продольном – осевом движении теплоносителя. Как и в работе [1], влияние сносящего потока учитывалось с помощью коэффициента вдува

$$M^* = (\rho_c V_c) / (\rho_n V_n),$$

где V_c и V_n – скорости струй и сносящего потока; ρ_c и ρ_n – плотности потока при температурах струй и сносящего потока.

Скорость струй в опытах изменялась от нуля до 40 м/с, скорость сносящего потока – от нуля до 29 м/с.

Математическое моделирование выполнялось с использованием программного комплекса ANSYS Fluent, стационарной RANS модели турбулентности Realizable k - ϵ и расчетной сетки с числом ячеек порядка 15 млн.

На рис. 2 показано изменение теплоотдачи поверхности в зависимости от скорости истечения импактных струй из отверстий и числа Рейнольдса ($Nu_{\Pi} = \bar{\alpha}d_3/\lambda_{\Pi}$ – число Нуссельта; $Re_{\Pi} = V_{\Pi} d_3/\nu_{\Pi}$ – число Рейнольдса; $\bar{\alpha}$ – средний по поверхности коэффициент теплоотдачи; V_{Π} – средняя скорость сносящего потока в кольцевом канале; d_3 – эквивалентный диаметр кольцевого канала; ν_{Π} и λ_{Π} – соответственно кинематический коэффициент вязкости и коэффициент теплопроводности воздуха при средней температуре потока в канале).

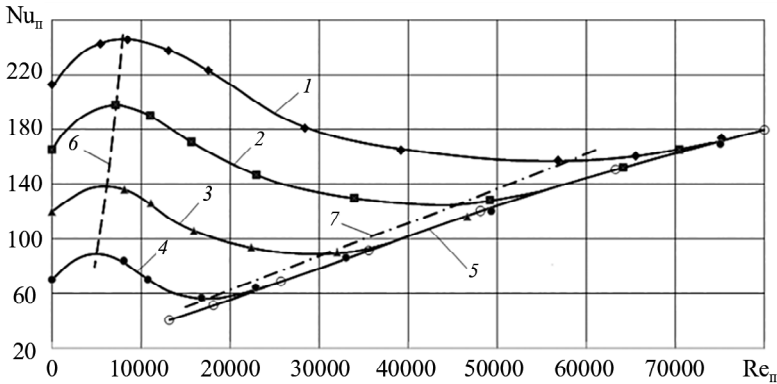


Рис. 2. Изменение теплоотдачи обдуваемой поверхности в зависимости от числа Рейнольдса и скорости истечения импактных струй:

1 – $V_c = 40$ м/с; 2 – 30 м/с; 3 – 20 м/с; 4 – 10 м/с; 5 – 0 м/с; линии 6 и 7 показывают изменение числа Nu_{Π} от скорости V_c , соответственно при $M^* = 10$ и 1,7

На вертикальной шкале опытные точки соответствуют теплоотдаче при отсутствии сносящего потока ($Re_{\Pi} = 0$). Анализ данных, приведенных на рис. 2, позволил установить неоднозначность влияния сносящего потока на теплоотдачу. Так, при

уменьшении коэффициента вдува M^* от ∞ ($V_{II} = 0$) до его значений, примерно равных 10...15, наблюдается увеличение теплоотдачи на 15...20%. Граница зоны увеличения теплоотдачи отделена штриховой линией b на рис. 2, которая проходит через максимальные значения числа Nu_{II} . Такое повышение можно объяснить влиянием вторичных течений в виде парных спиралевидных вихрей, образующихся в кольцевом канале между струями, направленными в сторону выходного сечения [3].

На рис. 3 приведены проекции вектора полной скорости между струями на поперечное сечение кольцевого канала. При слабоинтенсивном сносящем потоке ($M^* > 15$) кинетической энергии импактных струй достаточно для вовлечения его в закрученные вторичные вихри, интенсифицирующие теплообмен (рис. 3, *a*).

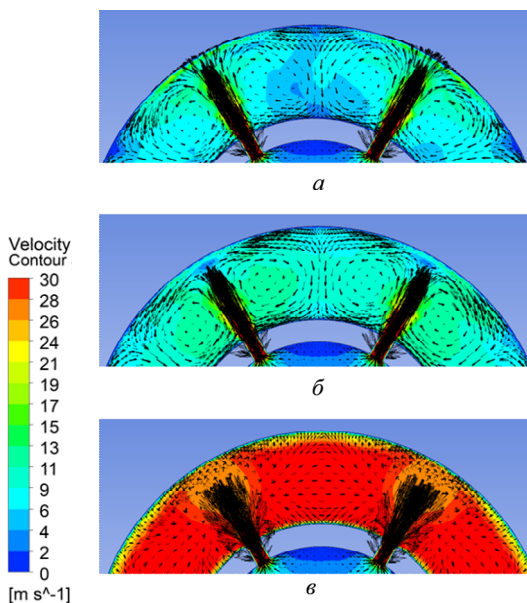


Рис. 3. Проекция вектора полной скорости потока на поперечное сечение кольцевого канала при различных значениях параметра M^* :
a – $M^* = 19,3$; *б* – 8,1; *в* – 1,3

При уменьшении коэффициента вдува ($M^* < 10$) за счет увеличения скорости сносящего потока или уменьшения скорости импактной струи происходит отклонение осей струй от нормального натекания их на обдуваемую поверхность. Наблюдается снижение теплоотдачи в зонах натекания струй на поверхность, которое не компенсируется ее увеличением за счет некоторого повышения интенсивности вторичных вихрей (рис. 3, б). Минимум теплоотдачи при всех исследованных в работе скоростях струй наблюдается, когда $M^* \approx 1,7$ (штрихпунктирная линия 7).

Таким образом, негативное влияние сносящего потока при $M^* < 10$ приводит к снижению теплоотдачи, минимальное значение которой примерно на 14% ниже ее значений, наблюдаемых при отсутствии сносящего потока. Со снижением M^* меньше 1,7 линии 1...4, характеризующие изменение числа $Nu_{\text{п}}$ от числа $Re_{\text{п}}$ при различных скоростях истечения импактных струй, плавно сливаются с линией 5, которая обобщает опытные данные, полученные при осевом течении потока в канале ($V_c = 0$). С понижением параметра M^* меньше 1,7 происходит полный снос импактных струй, не наблюдается образования вторичных вихрей (рис. 3, в). В этих случаях теплоотдача определяется только осевым – сносящим потоком.

Более наглядно влияние сносящего потока (параметра M^*) на теплоотдачу можно проследить на рис. 4, на котором представлена обработка опытов по характеристикам импактных струй Рейнольдса ($Nu_c = \bar{a}d_c/\lambda_c$ – число Нуссельта; λ_c – коэффициент теплопроводности воздуха при температуре струи). Нормирование результатов выполнено по данным, полученным при отсутствии сносящего потока – Nu_c^0 .

На рис. 4 линия 1 соответствует расчету по уравнению:

$$Nu_c / Nu_c^0 = 1,85 - 0,0234 \cdot M^* - 6,55 / M^* + 8,43 / M^{*1,5} - 2,6 / M^{*2}, \quad (1)$$

где Nu_c^0 – число Нуссельта, рассчитываемое по уравнению при отсутствии сносящего потока [2]:

$$Nu_c^0 = 1,285 \cdot A_f \cdot Re_c^{0,61 \cdot A_f^{0,05}} . \quad (2)$$

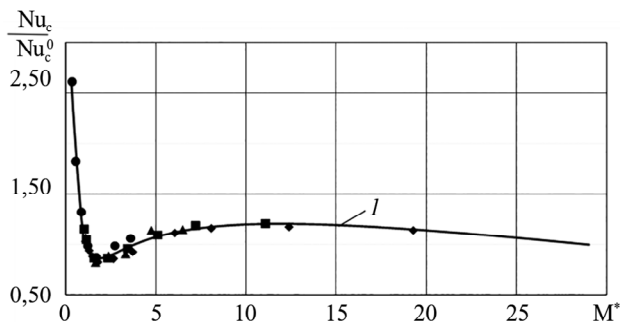


Рис. 4. Влияние коэффициента M^* на теплоотдачу обдуваемой поверхности (обозначения опытных точек соответствуют рис. 2, линия 1 – расчет по уравнению (1))

В уравнении (2) A_f – безразмерная общая площадь выдувных отверстий, отнесенная к площади обдуваемой поверхности теплоотдачи; $Re = V_c d / \nu_c$ – число Рейнольдса; ν_c – кинематический коэффициент вязкости воздуха при температуре струй.

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1) при значениях коэффициента вдува, находящегося в пределах от 10 до 15, наблюдается интенсификация теплоотдачи на поверхности до 20%;

2) на рабочих участках поверхности при снижении коэффициента вдува до 15 для обеспечения равномерной теплоотдачи следует плавно повышать параметр A_f вверх по потоку, а при снижении коэффициента вдува от 10, повышать A_f вниз по потоку за счет увеличения количества отверстий или их диаметра в соответствии с рекомендациями работы [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дыбан, Е.П. Конвективный теплообмен при струйном обтекании тел / Е.П. Дыбан, А.И. Мазур. – Киев: Наукова думка, 1982. – 302 с.

2. *Leukhin, Yu.L. and Alekseeva, P.D.* Study of Heat Transfer of a Concave Surface of Short Annular Channels under Impact Jets / *Technical Physics*. – 2024. – Vol. 69. – № 10. – Pp. 2535–2546.

3. *Алексеев, П.Д., Леухин, Ю.Л., Смолина, Н.В.* Управление теплоотдачей струйного рекуператора // Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции. – Архангельск, 2024. – С. 93-96.

Y.L. Leukhin, C.A. Fedotova*, P.D. Alekseev

*Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov,
Russian Federation, 163002, Arkhangelsk, Severnaya Dvina Emb., 17,*

** fedotova.s@edu.narfu.ru*

EFFECTS OF THE ASSOCIATED FLOW ON THE HEAT TRANSFER OF A CONCAVE SURFACE BLOWN BY IMPACT JETS

М.В. Лоцманов, Р.Ф. Рахимов,
Н.Е. Балабаев, И.А. Беляев*

*Объединенный институт высоких температур РАН,
125412, Москва, Ижорская, 13с2,*

** lotsmanovmv@mail.ru*

МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В БЫСТРОИЗМЕНЯЮЩИХСЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ УСЛОВИЯХ

Исследования магнитогидродинамических (МГД) течений жидких металлов (ЖМ) ведутся с XX века и остаются актуальными для теплоносителей термоядерных реакторов (ТЯР) [1]. В процессе изучения импульсных электромагнитных воздействий на полость с электропроводящей средой ключевой проблемой являются методы диагностики [2]. Классическая диагностика, использующая передачу данных по электрическому сигналу, в быстроизменяющемся магнитном поле вызывает сильнейшие помехи и требует продолжительного времени на восстановление показаний системы.

В работе рассматривается вопрос о влиянии включения электромагнита ДЭМ-1 [3] на электрические датчики. Перспективной оказалась технология пьезоэлектрического датчика давления: при воздействии магнитного поля показания увеличиваются, но сохраняется линейность системы [4].

С другой стороны, время выхода электромагнита ДЭМ-1 на стационарный режим составляет продолжительное время (около 8 с) в отличие от импульсного воздействия (порядка 50-100 мс), что потребовало провести изучение и воссоздание датчика давления на основе оптоволоконной технологии [5].

Первые попытки показали отсутствие стабильной системы показаний, что не позволяло получить калибровочную характери-

стику, поэтому при повторном проведении работ большой вклад вложен в попытки по наварке мембраны с предварительной натяжкой. В качестве материала выбраны тантал, нержавеющая сталь AISI 304 и фторопласт как устойчивые к агрессивным средам.

Повторный подход к воссозданию оптоволоконного датчика давления потребовал проведения оценочных расчетов по определению минимально допустимой толщины для мембран. В качестве входных условий принимается максимальное давление до 2 атм, диаметр мембран – 3 мм [4]. Из расчета упругости, приведенного в работе [5], минимально допустимая толщина для: тантала – 6 мкм, AISI 304 – 5 мкм, фторопласта – 19 мкм, запаса прочности и доступности – в 100 мкм для всех материалов.

Калибровка проводилась с использованием оборудования и методов измерения из [4]. Для каждого типа датчика получены калибровочные кривые, что позволило оценить работоспособность и провести сравнение разных материалов мембран для волоконно-оптического датчика. Вид наваренных мембран представлен на рисунке.



Вид наваренных мембран из AISI 316 и тантала

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда 25-19-00642 «МГД течения при быстро меняющихся сильных магнитных полях и электрических пробоях в жидкость».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *ITER EDA N.J.W.S. et al.* MHD stability, operational limits and disruptions. – 1999.

2. *Смолянов, И.А. и др.* Численное моделирование задачи вытеснения магнитного поля при течении электропроводной жидкости в плоском МГД-канале //Вычислительная механика сплошных сред. – 2025. – Т. 18. – № 3. – С. 276-294.

3. *Беляев, И.А. и др.* Экспериментальный стенд для исследований теплообмена перспективных теплоносителей ядерной энергетики // Теплоэнергетика, 2017. (11). – С. 66-74.

4. *Лоцманов, М.В. и др.* Методы измерения давления в импульсном магнитном поле // Уральский молодежный теплофизический семинар: тезисы докладов. – 2025. – Т. 20. – С. 19.

5. *Жилин, В.Г.* Волоконно-оптические измерительные преобразователи скорости и давления / В.Г. Жилин. – Москва: Энергоатомиздат, 1987.

M.V. Lotsmanov*, R.F. Rakhimov,

N.E. Balabaev, I.A. Belyaev

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, 125412, Russian Federation, Moscow, Izhorskaya St., 13s2,

* lotsmanovmv@mail.ru

**METHODS FOR OBTAINING STATISTICAL
CHARACTERISTICS IN RAPIDLY CHANGING
ELECTROMAGNETIC CONDITIONS**

А.А. Лукьянов, М.Ю. Ничик, А.С. Лебедев,
К.Г. Добросельский, В.М. Дулин*

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1,*

** lukyanov.alexey2018@yandex.ru*

УПРАВЛЕНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫМ ТЕЧЕНИЕМ В СЛЕДЕ ЗА КРУГОВЫМ ЦИЛИНДРОМ С ПОМОЩЬЮ СКВОЗНЫХ ОТВЕРСТИЙ ПРИ БОЛЬШИХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА

Отрыв потока за плохообтекаемыми объектами является фундаментальным гидродинамическим явлением, приводящим к образованию крупномасштабных вихрей и формированию турбулентного следа за потоком [1]. Классическим примером этого явления является обтекание осесимметричного цилиндра в поперечном потоке [2]. За цилиндром формируется периодическая вихревая дорожка Кармана, что сопровождается значительными пульсациями давления и возрастанием лобового сопротивления. Одним из возможных простых решений пассивного контроля и управления отрывом вихрей для цилиндра является система сквозных отверстий. В работах [2-4] было показано, что именно этот подход эффективно снижает сопротивление и подавляет сброс вихрей в следе цилиндра. Однако в литературе практически нет работ по обтеканию цилиндров со сквозными отверстиями при критических числах Рейнольдса $Re = (1,5 - 4) \times 10^5$ для воды.

В настоящей работе исследуется обтекание водой цилиндра с отверстиями при $Re \approx (1,74 - 2,75) \times 10^5$ при изменении угла наклона отверстий относительно направления потока (0, 45 и 90°). Рассматривается изменение основных кинематических и геометрических характеристик такого течения и напряжений Рейнольдса в

ближнем следе за цилиндром в зависимости от числа Рейнольдса. Приводится сравнение характеристик исследуемого течения с характеристиками обтекания подобного стального гладкого цилиндра без отверстий.

Для проведения экспериментального исследования течения вблизи модифицированного цилиндра был использован метод PIV. Основные элементы измерительной системы PIV – высокоскоростная камера Photron Fastcam Nova12 для регистрации изображений с разрешением 1024×688 пикселей, постоянный лазер Optronic KLM-532-2000, генерирующий излучение с длиной волны 532 нм, с фокусирующей и цилиндрической линзами для создания лазерного ножа и оптическое зеркало.

Эксперименты были проведены для двух цилиндров из стали диаметром $D = 26$ мм и длиной $L = 80$ мм: сплошного и с пятью сквозными отверстиями, параллельными друг другу. Центральное отверстие расположено на половине длины цилиндра, остальные – симметрично по оси цилиндра с шагом 6 мм. Диаметр отверстий составлял 3 мм, что соответствует примерно 10% от поперечного размера цилиндра. В результате был проведен сравнительный анализ средних характеристик потока и ближнего следа при изменении угла наклона отверстий относительно направления потока (0 , 45 и 90°) для разных чисел Рейнольдса.

Установлено, что наличие сквозных отверстий, расположенных под углом 0° относительно направления набегающего потока, значительно уменьшает длину зоны рециркуляции с увеличением числа Рейнольдса до $Re = 2,75 \times 10^5$ по сравнению с обычным цилиндром.

В случае отверстий с углом наклона 45° возвратная область за цилиндром меняет свое направление и с увеличением числа Re начинает отклоняться от нижней части цилиндра к верхней относительно оси симметрии. При этом зона рециркуляции для угла 0°

уменьшается в 1,5 раза по сравнению с углом 45° . Для отверстий перпендикулярно направлению течения (90°) наблюдается сильное влияние на разделение потока, что приводит к небольшой зоне рециркуляции и почти постоянному числу St для рассматриваемых значений Re .

Исследование выполнено за счет мегагранта № 075-15-2025-007, https://megagrant.ru/labs/lab_rus_1082740/

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. King R. A review of vortex shedding research and its application / Ocean Engineer-ing. – 1977. – Т. 4. – № 3. – С. 141-171.

2. Choi H., Jeon W.P., Kim J. Control of flow over a bluff body // Annual Review of Fluid Mechanics. – 2008. – Vol. 40. – P. 113-139.

3. Kim, J., Chae, S., and Kim, J. Flow control over a circular cylinder using a slot and axially arranged holes // Ocean Engineering. – 2023. – Vol. 287.

4. Gao, D., Chen, G., Chen, W., Huang, Y., and Li, H. Effects of steady wake-jets on subcritical cylinder flow // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2019. – Vol. 102. – Pp. 575-588.

***A.A. Lukyanov*, M.Yu. Nichik, A.S. Lebedev,
K.G. Dobroselsky, V.M. Dulin***

*Kutateladze Institute of Thermophysics, 630090, Russian Federation,
Novosibirsk, Acad. Lavrentiev ave., 1,*

** lukyanov.alexey2018@yandex.ru*

CONTROL OF TURBULENT WAKE FLOW BEHIND A CIRCULAR CYLINDER USING THROUGH HOLES AT HIGH REYNOLDS NUMBERS

А.А. Лукьянов^{1}, Д.И. Зарипов²*

*¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1,*

** lukyanov.alexey2018@yandex.ru*

*² Федеральный исследовательский центр «Казанский научный
центр РАН», 420111, Казань, ул. Лобачевского, 2/31, а/я 261*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛАМИНАРИЗАЦИИ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ В КРУГЛОЙ ТРУБЕ СО ВСТРОЕННЫМ УСТРОЙСТВОМ

Управление потоками жидкостей и газов – одна из ключевых задач современной техники – находит применение в самых разных отраслях. В энергетике воздействие на вихревые структуры позволяет повысить КПД турбин и компрессоров. Однако самым наглядным примером важности этой проблемы является транспортировка углеводородов и воды по трубопроводам. Огромная доля мировых энергетических ресурсов (до 30%) тратится на преодоление сил трения. Следовательно, даже незначительное снижение сопротивления может привести к колоссальной экономии средств. Современные методы по снижению силы трения в основном направлены на локальную ламинаризацию турбулентного пограничного слоя, однако их эффективность в газах зачастую не превышает 20% [1-3]. Прорывной результат был недавно получен в исследовании [4]: использование устройства, напоминающего продольные пчелиные соты, позволило полностью ламинаризовать турбулентный поток воды. Эксперимент показал снижение гидравлического сопротивления до ламинарного уровня при числах Рейнольдса до 40000. Согласно гипотезе авторов [5], принцип работы этого устройства заключается в формировании М-образного профиля скорости, что

подавляет турбулентность. Тем не менее, вопрос о практической эффективности такого подхода для снижения именно местного гидравлического сопротивления все еще требует изучения.

В данной работе было рассмотрено развитое турбулентное течение воды в оптически прозрачной круглой трубе длиной 5000 мм в диапазоне чисел Рейнольдса $2000 < Re < 5000$, где $Re = U_b D / \nu$, U_b – среднерасходная скорость, D – диаметр трубы, ν – коэффициент кинематической вязкости. Поперечный диаметр трубы составлял 16 мм, что позволяло проводить эксперименты на расстояниях до $150D$.

Используемое в данной работе устройство НС (НС – HoneyComb) представляло собой систему сот с постоянной по радиусу трубы длиной D и гидравлическим диаметром одной соты $d = D/15$. Также было рассмотрено устройство НСг с закругленными краями радиусом $D/3$ на внешней границе. В этом случае соты, расположенные у стенок, были короче, чем в ядре потока. Таким образом, было организовано двухзонное течение с замедленным потоком в центральной области трубы и ускоренным в пристеночной области. Это позволило сформировать М-образный профиль скорости за этим устройством для обеспечения, согласно [5], необходимого условия ламинаризации исходно турбулентного потока. Эти устройства устанавливались на расстоянии $70D$ от входа в рабочий участок ниже по потоку, где течение было развитым, в смысле автомодельности характеристик потока вдоль рабочего участка.

Измерения были выполнены в поперечном сечении трубы на расстояниях $6D$, $50D$, $100D$, и $150D$ за устройствами с использованием высокоскоростного метода Particle Image Velocimetry с высоким пространственно-временным разрешением. Результаты измерений профилей скорости и турбулентных пульсаций показали возможность полной ламинаризации исходно развитого турбулентного течения в круглой трубе. Были получены ламинарные профи-

ли скорости на расстоянии $150D$ вниз по потоку от устройства НСг, обладающего большей, чем в работе [4], гидравлической эффективностью, вплоть до $Re = 3900$. Экспериментальные данные показали, что механизм ламинаризации связан с формированием М-образного профиля продольной средней скорости за рассматриваемым устройством.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kim, J.S., et al.* Influence of a large-eddy breakup device on the frictional drag in a turbulent boundary layer // *Phys. Fluids*. – 2017. – Vol. 29. – № 6.

2. *Krieger, V., et al.* Toward design of the antiturbulence surface exhibiting maximum drag reduction effect // *J. Fluid Mech.* – 2018. – Vol. 850. – Pp. 262–303.

3. *Bradshaw, P., Pankhurst, R.C.* The design of low-speed wind tunnels // *Prog. Aerosp. Sci.* 1964. – Vol. 5. – № 5. – Pp. 1–69.

4. *Kühnen, J., Scarselli, D., Hof, B.* Relaminarization of Pipe Flow by Means of 3D-Printed Shaped Honeycombs // *J. Fluids Eng.* 2019. – Vol. 141. – № 11. – Pp. 1–7.

5. *Kühnen, J., et al.* Destabilizing turbulence in pipe flow // *Nat. Phys.* Springer US, 2018. – Vol. 14. – № 4. – Pp. 386–390.

A.A. Lukyanov^{1*}, D.I. Zaripov²

¹ *Kutateladze Institute of Thermophysics,
630090 Russian Federation, Novosibirsk, Acad. Lavrentiev ave., 1,
* lukyanov.alexey2018@yandex.ru*

² *Federal State Budgetary Institution of Science «Kazan Scientific
Center of Russian Academy of Sciences», 420111 Russian Federation,
Tatarstan, Kazan, ul. Lobachevskogo, 2/31*

EXPERIMENTAL STUDY OF THE RELAMINARIZATION PROCESS OF TURBULENT FLOW IN A CIRCULAR PIPE WITH AN EMBEDDED DEVICE

**Г.С. Маршалова^{1,2}, Д.В. Островская^{1*},
Е.С. Данильчик¹**

¹ *Белорусский государственный технологический университет,
220006, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Сверлова, 13а,*

** dashkaost09@gmail.com*

² *Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси,
220072, Республика Беларусь, г. Минск, ул. П. Бровки, 15*

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ ВЫСОТЫ ВЫТЯЖНОЙ ШАХТЫ ДЛЯ АППАРАТА ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ С УЧЕТОМ ВНЕШНЕГО АЭРОДИСПЕРСНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Аппараты воздушного охлаждения (АВО) широко используются в промышленности для решения различных технологических задач. Поскольку АВО эксплуатируются на открытом воздухе, на оребренной поверхности труб со временем образуется слой внешнего аэродисперсного загрязнения. Обладая высоким термическим сопротивлением, загрязнение приводит к существенному снижению эффективности теплообмена, что делает актуальным исследование его влияния на теплоотдачу пучков оребренных труб.

Экономия энергоресурсов при эксплуатации АВО возможна путем перевода их в режим свободной конвекции, интенсифицированной с помощью установки над теплообменной поверхностью вытяжной шахты.

В работе [1] представлены схема экспериментальной установки для исследования свободно-конвективного теплообмена однорядного пучка из оребренных труб с вытяжной шахтой, конструктивные и геометрические параметры используемых труб, внешнее загрязнение которых создавалось путем равномерного

кольцевого наматывания льняного шнура теплопроводностью $\lambda_3 = 0,0243$ Вт/(м·°С) в межреберное пространство. Был получен слой загрязнения средней толщиной $\delta_3 = 2,0; 3,4$ и $6,8$ мм с неравномерностью $\pm 0,4$ мм.

В ходе экспериментальных исследований над однородным пучком оребренных труб устанавливалась вытяжная шахта высотой $H_{ш} = 0,52; 1,04; 1,72$ и $2,24$ м с площадью выходного отверстия $f_{отв} = 0,086$ м².

Полученные экспериментальные данные обрабатывались в числах подобия Нуссельта $Nu = ad_0/\lambda$ и Рэлея $Ra = Gr \cdot Pr = g\beta d_0^3(t_{ст} - t_0)/(va)$.

Для определения оптимальной высоты вытяжной шахты аппарата воздушного охлаждения с внешним аэродисперсным загрязнением теплообменных поверхностей на рис. 1 представлены экспериментальные зависимости $Nu = f(H_{ш})$ при постоянном числе Рэлея $Ra = 100\,000$ для различных толщин внешнего загрязнения, характеризующихся коэффициентом термического сопротивления $R_3 = \delta_3 / \lambda_3, (m^2 \cdot K) / \text{Вт}$.

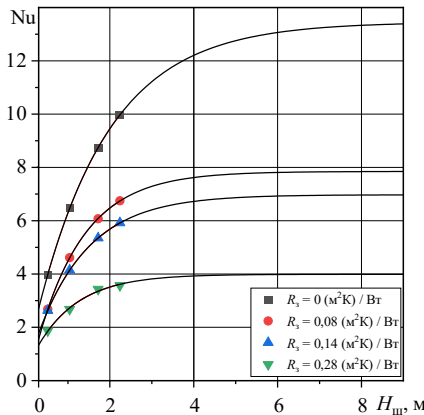


Рис. 1. Зависимость числа Нуссельта Nu от высоты вытяжной шахты при постоянном числе $Ra = 100\,000$

Согласно данным на рис. 1 увеличение высоты вытяжной шахты сопровождается ростом интенсивности теплоотдачи до определенного предела: для однорядного пучка с $R_3 = 0$ ($\text{м}^2 \cdot \text{К}$)/Вт (чистый пучок) оптимальная высота шахты находится в диапазоне $H_{\text{ш}}^{\text{опт}} = 4,5\text{--}5,5$ м, при $R_3 = 0,08\text{--}0,14$ ($\text{м}^2 \cdot \text{К}$)/Вт – $H_{\text{ш}}^{\text{опт}} = 2,5\text{--}3,5$ м, при $R_3 = 0,28$ ($\text{м}^2 \cdot \text{К}$)/Вт – $H_{\text{ш}}^{\text{опт}} = 2,0\text{--}2,5$ м.

Как можно заметить, с увеличением термического сопротивления внешнего слоя загрязнения оптимум высоты вытяжной шахты уменьшается. Данный эффект обусловлен снижением плотности теплового потока от загрязненной поверхности, что приводит к уменьшению движущей силы естественной тяги. В этих условиях аэродинамические потери начинают преобладать при меньшей высоте вытяжной шахты, ограничивая дальнейший рост интенсивности свободно-конвективного теплообмена.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (Т23РНФМ-005).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Маршалова, Г.С.* Тепловой расчет и проектирование аппаратов воздушного охлаждения с вытяжной шахтой: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14 / Г.С. Маршалова. – Минск, 2019. – 16 с.

G.S. Marshalova^{1,2}, D.V. Ostrovskaya¹*, E.S. Danil'chik¹

*¹ Belarusian State Technological University,
220006, Belarus, Minsk, Sverdlova str., 13a,*

** dashkaost09@gmail.com*

*² The A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus,
220072, Belarus, Minsk, Brovki st. 15*

**OPTIMIZING THE EXHAUST STACK HEIGHT FOR AN
AIR-COOLED APPARATUS SUBJECT TO EXTERNAL
AERODISPERSE FOULING OF HEAT TRANSFER
SURFACES**

***О.О. Мильман¹, В.Б. Перов¹, В.С. Крылов¹, А.В. Птахин¹,
Д.В. Брдынкевич¹, А.П. Железнов¹, Е.С. Чергинец¹,
С.А. Зайцев²***

*¹ ЗАО НПВП «Турбокон», 248010, г. Калуга,
Комсомольская Роца, 43*

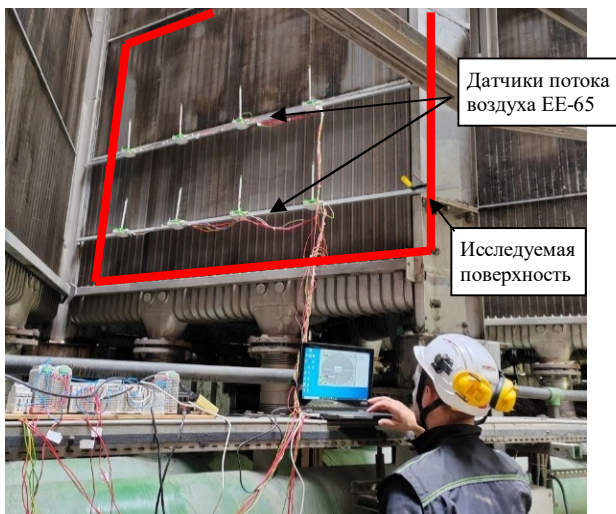
*² ПАО «ОГК-2» – Адлерская ТЭС, 354383, г. Сочи,
Адлерский район, Суздальская, 1А*

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЕПЛООБМЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА СУХОЙ ВЕНТИЛЯТОРНОЙ ГРАДИРНЕ

В настоящее время одна из актуальных проблем при эксплуатации сухих вентиляторных градирен является загрязнение теплообменных поверхностей, что приводит к снижению охлаждающей способности и КПД паротурбинной установки [1].

В процессе обследования СВГ Адлерской ТЭС в период 2021 – 2025 гг. зафиксировано снижение производительности вентиляторов на 10-17%, причиной указанного снижения расхода воздуха является загрязнение теплообменной поверхности. Для оценки состояния охлаждающей способности СВГ был проведен эксперимент по очистке части теплообменной поверхности при помощи установки высокого давления в ручном режиме, а также выполнены замеры скоростей потока воздуха до помывки и после. Фотография процесса измерения скоростей воздуха представлена на рисунке.

После помывки теплообменной поверхности отмечено увеличение скорости потока воздуха, которое составило ΔV от 0,09 м/с до 1,863 м/с, что говорит об эффективности помывки теплообменной поверхности.



Процесс измерения скоростей воздуха

На основании данных, полученных по результатам пробной помывки и в ходе тепловых испытаний за период с 2021 г. по 2025 г. в ЗАО НПВП «Турбокон», была разработана методика, позволяющая определить эффективность охлаждения ТО и оценить загрязнение теплообменной поверхности СВГ. Показатель эффективности охлаждения ТО рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\Delta t_w}{t_{1w} - t_{1в}},$$

где ε – эффективность охлаждения ТО;

Δt_w – глубина охлаждения оборотной воды;

t_{1w} – температура воды на входе в СВГ;

$t_{1в}$ – температура воздуха на входе в СВГ.

В результате тепловых испытаний за период 2021 – 2025 гг. зафиксировано снижение эффективности СВГ с 0,32 до 0,28 (снижение на 12,5 %). По данным оптимизационных расчетов, выполнен-

ных на базе данных испытаний, целевое значение эффективности СВГ должно быть 0,4.

Пробная промывка подтвердила возможность повышения тепловой эффективности СВГ до 0,37-0,4 при промывке теплообменников водой высокого давления.

Данная методика оценки загрязнения теплообменной поверхности СВГ позволяет оценить эффективность работы СВГ и в зависимости от загрязнения ТО, подобрать оптимальную технологию очистки ТО, при которой показатель эффективности СВГ достигнет предельного значения 0,4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Птахин, А.В., Крылов, В.С., Ленев, С.Н.* и др. Основные проблемы при эксплуатации сухих вентиляторных градирен в составе блока ПГУ / // Газотурбинные технологии. – 2023. – № 3 (192). – С. 30-33. – EDN ZRBMOH.

***O.O. Milman¹, V.B. Perov¹, V.S. Krylov¹, A.V. Ptakhin¹,
D.V. Brdynkevich¹, A.P. Zheleznov¹, E.S. Cherginets¹,
S.A. Zaytsev²***

¹ *ZAO NPVP «Turbocon», 248010, Kaluga,
st. Komsomolskaya Grove, 43*

² *PAO «OGK-2» – Adlerskaya TES,
354383, Sochi, Adler district, st. Suzdalskaya 1A*

**METHODS FOR ASSESSING HEAT EXCHANGE
SURFACE FOULING IN A DRY FAN-ASSISTED
COOLING TOWER**

*А.В. Минаков, М.И. Пряжников, А.И. Пряжников,
В.А. Жигарев*, А.С. Якимов*

*ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет,
660041, Красноярск, пр. Свободный, 79,*

** VZhigarev@sfu-kras.ru*

РАЗРАБОТКА МИКРОФЛЮИДНЫХ ЧИПОВ-СЕНСОРОВ ДЛЯ НЕФТЕПРОМЫСЛОВЫХ ФЛЮИДОВ

Нефтегазовая отрасль постоянно сталкивается с вызовом повышения коэффициента извлечения нефти (КИН) при одновременном снижении затрат на разработку и минимизации экологических рисков. Традиционные методы оценки свойств нефтепромысловых флюидов (керновый анализ, ячейки PVT, реометры) часто требуют большого объема проб, длительны и не всегда позволяют моделировать реальные процессы в микропорах пласта [1].

В последнее десятилетие микрофлюидика стала мощным инструментом для решения этих проблем [2]. Микрофлюидные чипы-сенсоры – устройства, позволяющие проводить анализ и моделирование в масштабе реальных поровых каналов (от 1 до 500 мкм), что качественно меняет подход к разработке и тестированию нефтепромысловых флюидов.

К ключевым областям применения относятся: оценка свойств пластовых флюидов (PVT-анализ); разработка и тестирование химических реагентов для повышения нефтеотдачи пласта (ПНП); исследование асфальто-смоло-парафиновых отложений (АСПО); оценка пенообразования и стабильности пен; измерение реологии и межфазного натяжения.

Главное преимущество микрофлюидики – возможность анализировать, что происходит в микропоре [2]. Для анализа доста-

точно микролитров флюида, что критично при работе с дорогостоящими синтезированными химическими реагентами или редкими пробами пластовой нефти [3]. Помимо этого, эксперименты, которые на керне занимают недели, на чипе можно провести за часы благодаря малым масштабам и высокой точности контроля и есть возможность параллельного тестирования десятков составов на одном чипе для быстрого скрининга реагентов [4]. Снижение рисков при работе с высокотоксичными или летучими компонентами [4].

Применение микрофлюидных чипов-сенсоров трансформирует процесс разработки нефтепромысловых флюидов из эмпирического в научно-обоснованный дизайн. Технология позволяет ускорить вывод на рынок новых химических реагентов для ПНП и снизить геологические риски, связанные с несовместимостью флюидов. Несмотря на технологические ограничения, микрофлюидика становится обязательным инструментом в арсенале современных нефтесервисных компаний и научных центров [2, 3].

Коллективом проведена разработка дизайна микрофлюидных чипов-моделей горных пород с различной проницаемостью и характеристиками смачиваемости для задач нефтевытеснения. Были разработаны топологии микрофлюидных чипов для моделирования течений в горных породах, а также для изучения физико-химических процессов при нефтевытеснении. В результате доработки была получена высоковоспроизводимая методика модификации смачиваемости ПДМС и эпоксидной смолы, позволяющая получить устойчивую к нефти гидрофильную поверхность стенок микроканалов чипа. Также были определены фильтрационно-емкостные свойства разработанных топологий. Методами фотолитографии и стереолитографической печати были изготовлены мастер-формы для заливки ПДМС и эпоксидной смолы, получена коллекция микрофлюидных чипов-моделей горных пород с различной проницаемостью и характеристиками смачиваемости.

Разработана серия микрофлюидных сенсоров для измерения вязкости, реологий и межфазного натяжения нефтепромысловых флюидов. Созданы прототипы этих микроустройств. Проведено их тестирования на модельных флюидах. Результаты измерений сопоставлены с результатами измерений классическими методами. Получено удовлетворительное согласование. Продемонстрированы преимущества микрофлюидных сенсоров.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-30022, <https://rscf.ru/project/23-79-30022/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sinton, D.* Energy: the microfluidic frontier // *Lab on a Chip*. – 2014. – Vol. 14. – № 17. – Pp. 3127–3134.

2. *Lifton, V.A.* Microfluidics: an enabling technology for the oil and gas industry // *Lab on a Chip*. – 2016. – Vol. 16. – № 10. – Pp. 1777–1796.

3. *Buchgraber, M., Clemens, T., Castanier, L.M., Kovscek, A.R.* A microvisual study of the displacement of viscous oil by polymer solutions // *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*. – 2011. – Vol. 14. – № 03. – Pp. 327–338.

4. *Zhao, C., van der Steen, E.* Microfluidic sensors for oilfield applications: a review // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2019. – Vol. 289. – Pp. 85–97.

***A.V. Minakov, M.I. Pryazhnikov, A.I. Pryazhnikov,
V.A. Zhigarev*, A.S. Yakimov***

*¹ Siberian Federal University,
660041, Russian Federation, Krasnoyarsk, ave. Svobodny, 79,*

** VZhigarev@sfu-kras.ru*

А.З. Миндубаев^{1*}, Э.В. Бабынин¹, В.М. Бабаев²

¹ *Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН», 420111, Казань, ул. Лобачевского, 2/31, а/я 261*

² *Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова КазНЦ РАН, обособленное структурное подразделение ФИЦ КазНЦ РАН, 420088, Казань, ул. Академика Арбузова, 8*

* mindubaev-az@yandex.ru

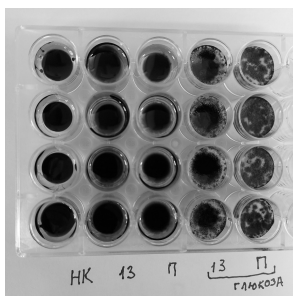
ШТАММ ASPERGILLUS NIGER F-4815D В РОЛИ ДЕСТРУКТОРА НЕФТИ

Нефти и нефтепродукты – основные загрязнители окружающей среды на сегодняшний день. Нефтепродукты в плане токсичности менее опасны для окружающей среды, чем соединения фосфора, но производятся и потребляются в значительно больших объемах. В представленном исследовании исследовалась биodeградация нефти с месторождения «Первомайское» (Республика Татарстан). В качестве микроорганизма деструктора выбран *Aspergillus niger* F-4815D, который ранее уже применялся для биodeградации белого фосфора и показал себя эффективным и универсальным деструктором токсичных загрязнителей.

Культуры высевались в планшеты Corning, скорость роста оценивалась микропланшетным ридером Infinite F200 Pro, Tecan (Австрия). Посев производился в среду́ состава (г/л) NaCl 2.5; MgSO₄ 0.5; KNO₃ 2.0, глюкоза 8.0. Хроматомасс-спектрометрическое (ГХ-МС) исследование проводилось на газовом хроматографе «Agilent 6890N» с масс-спектрометрическим детектором «5973 N» («Agilent Technologies», США). Обращается внимание на то, что в присутствии микроорганизмов с нефтями происходят изменения. На 18-е сутки после посева стало заметно,

что в среде, содержащей глюкозу в качестве основного источника углерода, нефть изменила консистенцию: утратила текучесть и собралась в комки. В среде без глюкозы нефти остались без изменений – по всей видимости, рост *A. niger* в ней не начался [1].

Авторы провели более углубленное исследование методом ГХ-МС. В присутствии глюкозы в качестве основного источника углерода, нефть подвергается грибом глубокой деструкции. Без глюкозы деструкция тоже присутствует, но медленная и неглубокая. Получены следующие результаты химического состава. Наименьшее количество компонентов, выявленных ГХ-МС, 18, в варианте с глюкозой. В этом варианте появляются сигналы соединений, окисленных кислородом (кетонов, лактонов). Это означает, что разросшаяся на глюкозе биомасса гриба осуществляет биодеградацию компонентов нефти. Гриб в первую очередь метаболизирует алканы как нормального, так и разветвленного строения. Ароматические соединения разлагаются хуже.



Аспергилл в нефти растет только в присутствии глюкозы. П – Первомайское, 13 – Ново-Шешминское месторождение. НК – негативный контроль. Снимок сделан через 36 суток после посева.

Наиболее сложный состав (39 компонентов) в негативном контроле, в стерильной нефти. В посеве *A. niger* F-4815D без глюкозы количество компонентов составляет промежуточную величину, равную 30. Из этого можно сделать заключение, что *A. niger*

способен существовать в присутствии нефти в качестве единственного источника углерода и осуществлять ее биодegradацию, однако процесс этот очень медленный, а биодеструкция менее глубокая, чем в присутствии глюкозы. Данный результат тоже хорошо соотносится с представленными.

Можно сделать вывод о том, что нефти подвергаются частичной биодegradации штаммом аспергилла, но только при наличии дополнительных легкоусваиваемых источников углерода. В принципе, дорогостоящую глюкозу можно заменить сельскохозяйственными отходами. Нефть при этом меняет консистенцию и становится комковатой, что в перспективе открывает возможности для создания методов сбора нефти, поскольку комки собираются легче, чем жидкая пленка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мундубаев, А.З., Бабынин, Э.В., Бабаев, В.М., Тутучкина, В.В., Минзанова, С.Т., Миронова, Л.Г., Караева, Ю.В. Штамм *Aspergillus niger* AM1 как агент биодegradации нефти и нефтепродуктов // Микология и фитопатология. – 2024. – Т. 58. – № 1. – С. 27-35. DOI: 10.55421/1998-7072_2023_26_10_41.

A.Z. Mindubaev^{1*}, E.V. Babynin¹, V.M. Babaev²

¹ *Federal State Budgetary Institution of Science «Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences», 420111 Russian Federation, Tatarstan, Kazan, ul. Lobachevskogo, 2/31,*

** mindubaev-az@yandex.ru*

² *Institute of organic and physical chemistry named after a.e. Arbuzov. a.e. Arbuzov Institute of organic and physical chemistry, Kazan, Russia.*

ASPERGILLUS NIGER STRAIN F-4815D AS AN OIL DEGRADER

А.А. Митрофанов, К.М. Моисеева, А.Ю. Крайнов*

Томский государственный университет, Томск,

634050, пр. Ленина, 36

** moiseeva_km@t-sk.ru*

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ СМЕСЕВОГО ТВЕРДОГО ТОПЛИВА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ДАВЛЕНИЯ НАД ЕГО ПОВЕРХНОСТЬЮ

Тема доклада связана с задачей определения скорости горения топлива при изменении давления в камере сгорания. Ранее были проведены исследования особенностей горения топлива под действием гармонических колебаний давления над его поверхностью: в работе [1] показаны результаты исследований горения топлива, содержащего частицы алюминия, в работе [2] исследовано горение безметалльного состава. Настоящий доклад продолжает результаты, полученные в указанных работах [1, 2].

В докладе представлены физико-математическая модель, алгоритм решения и результаты параметрического исследования особенностей горения твердого топлива при действии комбинированного закона изменения давления над поверхностью топлива. Закон колебаний давления над поверхностью топлива взят из работы [3].

Цель данной работы – проанализировать нестационарное горение смесового твердого топлива при изменении давления над поверхностью горения.

Для исследования выбрано безметалльное твердое топливо. Основные предположения модели горения смесового твердого топлива представлены в работе [1]. Предполагается, что топливо занимает левое полупространство. При горении топлива продукты его газификации вытекают вправо. Задача формулируется в сопряженной постановке и определяется уравнениями сохранения массы,

импульса и энергии компонентов газа. Метод решения задачи основан на алгоритмах [4].

Скорость химической реакции в газовой фазе над поверхностью горючего вещества описывается законом Аррениуса, при этом порядок реакции обозначается как n_g :

$$W_{ch} = \rho_{ox}^n k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R_u T_g}\right), \quad (1)$$

где ρ_{ox} – парциальная плотность окислителя; k_0 – предэкспоненциальный множитель; E_a – энергия активации; R_u – универсальная газовая постоянная; T_g – температура газа.

Численное решение задачи выполнено при следующих значениях физических величин [16]: $Q = 4,26$ МДж/кг, $E_a = 189$ кДж/моль, $c_{pg} = 1466,5$ Дж/(кг·К), $c_{vg} = 1202$ Дж/(кг·К), $R_g = 264,5$ Дж/(кг·К), $\lambda_g = 0,5$ Вт/(м·К), $\eta = 2 \cdot 10^{-5}$ Па·с. Теплофизические и кинетические характеристики СТТ задавались равными $Q_c = 0,7$ МДж/кг, $k_c = 6,3 \cdot 10^8$ с⁻¹, $E_c = 100$ кДж/моль, $\lambda_c = 0,5$ Вт/(м·К). Доля окислителя в составе твердого топлива задавалась равной $\alpha_{ox} = 64\%$, доля связки – $\alpha_f = 0,36\%$. Плотность твердого топлива определялась через его состав. Порядок реакции в законе Аррениуса равен n_g . При $n_g = 1$ ($\nu = 0,5$) величина предэкспоненциального множителя задавалась равной $k_{05} = 9,8 \cdot 10^9$ с⁻¹, при $n_g = 1,5$ ($\nu = 0,75$) величина предэкспоненциального множителя задавалась равной $k_{05} = 5,8 \cdot 10^9$ (с⁻¹·кг^{-0,5}·м^{1,5}).

Из решения задачи определялась зависимость скорости горения твердого топлива от закона сброса давления при разных скоростях сброса.

Работа выполнена при финансовой поддержке госзадания Министерства науки и высшего образования (проект № FSWM-2025-0012).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Крайнов, А.Ю., Митрофанов, А.А., Моисеева, К.М.* Численное моделирование горения алюминизированного твердого топлива при колебаниях давления // ФГВ. – 2025. <https://elibrary.ru/item.asp?id=83172273>.

2. *Крайнов, А.Ю., Моисеева, К.М.* Исследование газодинамики горения смесового твердого топлива при колебаниях давления // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2024. – № 90. – С. 130–139.

3. *Липанов, А.М.* Твердотопливные регулируемые двигательные установки / А.М. Липанов. – Москва: Машиностроение, 2011. – 416 с.

4. *Годунов, С.К.* Численное решение многомерных задач газовой динамики / С.К. Годунов, А.В. Забродин, М.Я. Иванов, А.Н. Крайко, Г.П. Прокопов. – Москва: Наука, 1976.

A.A. Mitrofanov, K.M. Moiseeva, A.Yu. Krainov*

Tomsk State University, Russia 634050 Tomsk, Lenina, 36

** moiseeva_km@t-sk.ru*

STUDY OF COMBUSTION OF MIXED SOLID FUEL WITH CHANGING PRESSURE ABOVE ITS SURFACE

***А.А. Мошин^{1,2*}, Д.П. Храмцов², К.Д. Некрасов¹,
Н.Г. Румянцев², И.А. Михайлова³, А.В. Вязьмин²***

*¹ Московский политехнический университет,
107023, Москва, ул. Большая Семеновская, 38*

*² МИРЭА – Российский технологический университет,
119454, г. Москва, Проспект Вернадского, 78*

*³ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14, стр. 1,*

**a.moshin97@mail.ru*

ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ТЕПЛОВОЙ РЕЛАКСАЦИИ ГИДРОГЕЛЕЙ ПРИ 3D-ПЕЧАТИ

Гидрогели с регулируемыми физико-химическими свойствами определяют развитие 3D-биопечати. Подбор их теплофизических характеристик важен для сохранения стабильности структуры и жизнеспособности биообъектов [1], что обуславливает актуальность разработки методов расчета тепловых процессов при послойном формировании гидрогелевого каркаса.

Проведена верификация методики определения теплопроводности и объемной теплоемкости гидрогелей при их нагреве на основе экспериментальных данных, полученных методом голографической интерферометрии [2]. Расчеты выполнены в программной среде Python 3.10.5 путем решения одномерной задачи теплопроводности конечно-разностным методом.

Опираясь на результаты проведенного численного моделирования, дальнейшие исследования были направлены на разработку устройства для реализации технологии послойного нанесения гидрогелей. С использованием разработанного 3D-биопринтера со сменными печатающими устройствами выполнена печать агароз-

ными гидрогелями с варьируемой концентрацией агарозы модельного объекта в виде шестислойного куба. Визуальный осмотр граней и ребер полученного прототипа свидетельствует о работоспособности устройства (рисунок).

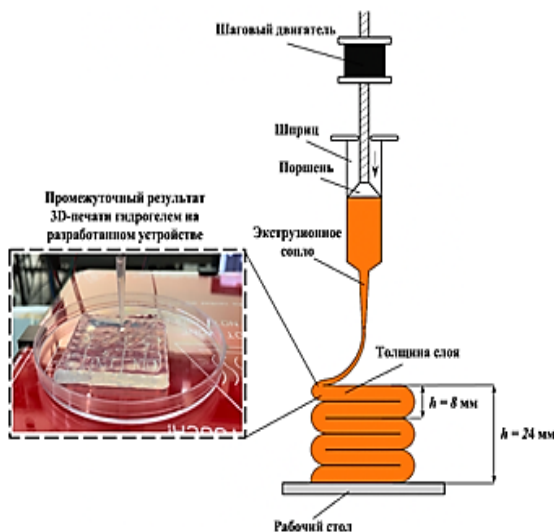


Схема процесса 3D- печати гидрогелем

Однако для успешного масштабирования результатов с модельных на сложные объекты необходимы данные о теплофизических характеристиках гелей, так как температура определяет устойчивость структуры.

Для оценки теплового поведения гидрогелей использована классическая модель теплопереноса [3] на основе нестационарного уравнения теплопроводности в одномерной постановке. Такой подход обеспечивает надежную оценку тепловых характеристик в тонких слоях. Итоговые значения характерного времени установления температурного профиля в слое толщиной $h = 4$ мм для различных гидрогелях представлены в таблице.

Результаты расчета времени теплового равновесия в гидрогеле

Тип вещества	τ , с	λ , Вт/(м · К)
Агарозный гидрогель 0,4% масс.	67,1	0,495
Желатиновый гидрогель 4,0% масс.	69,5	0,474
Смесевой гидрогель (Агароза 0,1% масс. + желатин 4,0% масс.)	66,2	0,494

Проведенные экспериментальные исследования позволили определить значения времени тепловой релаксации при использовании ряда модельных гидрогелей в процессе биопечати. Незначительный разброс величин обусловлен взаимной компенсацией влияния теплопроводности и теплоемкости, при этом высокая чувствительность времени релаксации к изменениям коэффициента теплопроводности подтверждает значимость этого параметра при инженерном выборе материалов, используемых в 3D-биопечати.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Aghajani, M., et al.* 3D Printing of Hydrogel Polysaccharides for Biomedical Applications: A Review // *Biomedicines*. – 2025. – Vol. 13. – № 3. – P. 731.
2. *Pokusaev, B., et al.* Study of hydrogel materials thermophysical properties // *Thermal Science*. – 2023. – Vol. 27. – № 5. – Pp. 3701-3708.
3. *Айнштейн, В.Г.* Процессы и аппараты химической технологии. Общий курс: учебник: в 2-х книгах / В.Г. Айнштейн и др.; под ред. В.Г. Айнштейна. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 1792 с.

***A.A. Moshin^{1,2*}, D.P. Khrantsov², K.D. Nekrasov¹,
N.G. Rumyantsev², I.A. Mikhailova³, A.V. Vyazmin²***

*¹ Moscow Polytechnic University,
107023, st. Bolshaya Semyonovskaya, 38*

² *MIREA – Russian Technological University,
119454, Moscow, Vernadsky Ave., 78*

³ *National Research University «MPEI», 111250,
Moscow, Krasnokazarmennaya str., 14*

* moiseeva_km@t-sk.ru

**ESTIMATION OF THE THERMAL RELAXATION TIME
OF HYDROGELS MATERIAL IN 3D PRINTING**

Н.А. Назаров**, *А.С. Герасимов*, *В.И. Терехов

¹ *Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1,*

** nazarov.nik.an@gmail.com*

КАСАТЕЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ НА СТЕНКЕ ПЛОСКОГО КАНАЛА В ПУЛЬСИРУЮЩЕМ ПОТОКЕ

В гладких каналах теплообменников и проточных систем пульсации расхода существенно влияют на структуру течения, турбулентные характеристики и теплообмен. Однако механизмы воздействия периодических возмущений на пристенную область остаются недостаточно изученными. Именно пристенная область играет ключевую роль в проблеме интенсификации теплообмена в подобных системах. При этом, как расчетные [1], так и экспериментальные [2, 3] исследования значительно усложняются из-за нестационарности течения и расширения количества параметров задачи.

Известно, что в стационарном безградиентном потоке логарифмическая часть турбулентного пограничного слоя напрямую связана с закономерностями трения на стенке [4]. Одной из основных целей работы стала проверка этого соотношения в условиях квазистационарного пульсирующего потока. Для повышения достоверности результатов касательные напряжения на стенке определялись двумя методами.

С помощью PIV и фазового усреднения были получены поля скоростей в пульсирующем турбулентном потоке плоского канала. Частота пульсаций расхода в экспериментах составляла 1, 2, 3, 4 и 5,8 Гц. Исследовался пульсирующий поток с усредненными по времени числами Рейнольдса $1,7 \cdot 10^4$ и $7,3 \cdot 10^4$ и амплитудой

пульсаций соответственно $A = 0,6$ и $A = 0,75$. Диапазон чисел Струхала составлял $Sh = 0.001 - 0.03$. Безразмерная частота Стокса $\omega^+ = \omega\nu/u_*^2$ изменялась в пределах $5 \cdot 10^{-5} - 1.8 \cdot 10^{-3}$, что соответствовало квазистационарному течению [5].

В ходе экспериментов касательные напряжения на стенке определялись двумя способами: с использованием теплового датчика трения и методом Клаузера по логарифмической части фазово-усредненного профиля скорости. Наблюдалось характерное для квазистационарных режимов отсутствие фазового сдвига между результатами, полученными обоими методами. Изменения касательных напряжений повторяли форму колебаний расхода. Оба метода показали хорошее качественное согласование, хотя количественного совпадения не наблюдалось.

Относительная величина турбулентных пульсаций касательных напряжений на стенке в рассмотренных режимах не зависела от фазы колебаний потока и совпадала со значением пульсаций для стационарного режима течения. При этом интенсивность пульсаций трения на стенке по мере роста числа Рейнольдса как для пульсирующего, так и для стационарного режимов заметно понижалась.

Спектральный анализ касательных напряжений на стенке показал, что в пульсирующих режимах спектр повторяет форму стационарного случая при одинаковом среднем числе Рейнольдса, за исключением появления пиков на частотах пульсаций расхода. При этом наклон спектров в инерционной области частот остается неизменным при варьировании числа Рейнольдса, частоты и амплитуды колебаний расхода.

Работа выполнена при финансовой поддержке мегагранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (номер соглашения 075-15-2024-620).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никитин, Н.В. Попеленская, Н.В. Турбулентные пульсирующие течения в трубе квадратного сечения // Изв. РАН. МЖГ. – 2023. – № 2. – С. 55–71.

2. Гольцман, А.Е., Давлетшин, И.А., Михеев, Н.И., Паерелий, А.А. Касательные напряжения в турбулентном пульсирующем потоке в канале // Теплофизика и аэромеханика. – 2015. – Т. 22. – № 3. – С. 333–342.

3. Назаров, Н.А., Герасимов, А.С., Терехов, В.В., Терехов, В.И. Экспериментальное исследование пульсирующего потока в прямоугольном канале // Теплофизика и аэромеханика. – 2024. – Т. 36. – № 6. – С. 1063–1069.

4. Clauser, F.H. Turbulent boundary layers in adverse pressure gradients // J. Aeronaut. Sci. – 1954. – Vol. 21. – Pp. 91–108.

5. Tardu, S.F., Binder, G. Wall shear stress modulation in unsteady turbulent channel flow with high imposed frequencies // Physics of Fluids A: Fluid Dynamics. – 1993. – Vol. 5. – № 8. – Pp. 2028–2037.

N.A. Nazarov*, A.S. Gerasimov, V.I. Terekhov

*Kutateladze Institute of Thermophysics
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
630090 Russian Federation, Novosibirsk, Lavrentyev Prospekt, 1*

* nazarov.nik.an@gmail.com

WALL SHEAR STRESSES IN A PULSATING FLOW IN A FLAT CHANNEL

С.А. Назарова, М.А. Засимова

*Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого, Санкт-Петербург,
195251, Политехническая, 29*

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ВЕНТИЛИРУЕМОГО ПОМЕЩЕНИЯ ПРИ СТАЦИОНАРНОЙ И НЕСТАЦИОНАРНОЙ ПОДАЧЕ ПРИТОЧНОГО ВОЗДУХА

В системах вентиляции, обеспечивающих заданные параметры микроклимата в помещениях, используется стационарная подача приточного воздуха. В работе [1] предложен способ повышения качества воздушной среды путем использования нестационарной подачи воздуха по ступенчатому закону. Работа посвящена исследованию влияния способа подачи приточного воздуха на параметры течения и теплопереноса в помещении. Вентилируемое помещение соответствует рассматриваемому в работе [2], где приведены данные измерений скорости при стационарной подаче воздуха.

Рассматривается течение воздуха в помещении, показанном на рисунке *a*. Воздух поступает через квадратное отверстие $h \times h$, расположенное на потолке, и отводится через отверстие того же размера (в [2] величина $h = 10$ см). Размер помещения $9,14 \times 2,28 \times 3,05$ h^3 , посередине помещения расположена перегородка высотой $1,53h$.

Рассмотрены два режима подачи воздуха. Первый режим (вариант 1) – стационарный с однородным распределением скорости на входном отверстии $V_{in,st} = 0,235$ м/с, соответствует условиям [2]. В этом случае число Рейнольдса $Re = V_{in,st}h/\nu = 1600$. Второй режим (вариант 2) – нестационарный, однородное распределение скорости на входе задавалось по ступенчатому

закону с периодом T_p . За один период скорость на входе $V_{in,unst}$ полагалась равной $2V_{in,st}$, при $0 < t < 0,5T_p$, и 0, при $0,5T_p < t < T_p$. Таким образом, средняя скорость за один период соответствовала $V_{in,st}$. Рассмотрены три значения периода T_p , для которых величина $T_p V_{in,st}/h$ равна 4,7; 18.8 и 47 (варианты 2.1, 2.2 и 2.3).

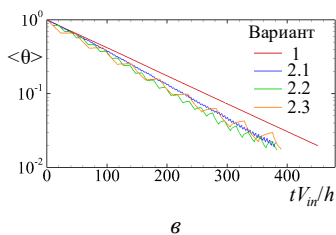
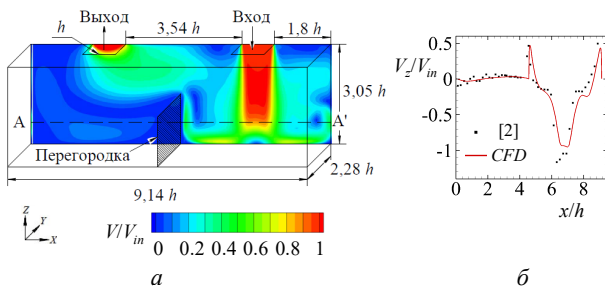
Решалась задача о выравнивании температуры в помещении от состояния покоя в момент времени $t = 0$ до установления течения. Начальная температура воздуха в помещении составляла T_0 (30 °C), температура приточной струи, охлаждающей помещение, была постоянной и равной T_{in} (20 °C).

Моделирование турбулентного движения осуществлялось на основе осредненных по Рейнольдсу нестационарных уравнений Навье – Стокса (URANS подход) с использованием стандартной k - ϵ модели. Расчеты выполнены в пакете ANSYS Fluent. Использовалась сетка, общая размерность которой составила 250 тысяч ячеек. Расчеты выполнены с использованием ресурсов СКЦ «Политехнический».

На рисунке, *а*, показано распределение скорости для варианта со стационарной подачей воздуха на участке установившегося режима течения. В помещении формируются две области, разделенные перегородкой, с высокими (более $0,7V_{in}$) и низкими (менее $0,3V_{in}$) значениями скорости. На рисунке, *б*, показано распределение вертикальной компоненты скорости, полученное в расчетах и в эксперименте [2], вдоль линии AA', проходящей через центр помещения, расположенной на высоте $0,76h$ от пола. Наблюдается хорошее согласие расчетных и экспериментальных данных.

На рисунке, *в*, представлено изменение во времени осредненной по объему помещения безразмерной температуры $\langle \theta \rangle = (\langle T \rangle - T_{in}) / (T_0 - T_{in})$ для вариантов с разными режимами подачи приточной струи. Показано, что изменение средней

температуры во времени подчиняется зависимости $\langle T \rangle \sim t^A$. Для варианта 1 значение показателя A наибольшее ($-2,05 \times 10^{-2}$).



Течение воздуха в помещении: a – расчетная область и распределение скорости в центральном сечении помещения для варианта 1; b – распределение вертикальной компоненты скорости вдоль линии AA' ; v – изменение среднеобъемной температуры во времени

В случае нестационарной подачи наиболее эффективным с точки зрения скорости охлаждения оказался вариант 2.1 ($A = -2,42 \times 10^{-2}$), для вариантов 2.2 и 2.3 значения A составили $-2,33 \times 10^{-2}$ и $-2,23 \times 10^{-2}$ соответственно.

Исследование выполнено при поддержке РНФ (грант № 24-19-00437).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gong, C., Cheng, Y., Jiang, Y. Investigation into fresh air delivery performance with vortex ring // Science of the Total Environment. – 2023. – Vol. 885. 163874. – P. 19.

2. *Posner, J.D., Buchanan, C.R., Dunn-Rankin, D.* Measurement and prediction of indoor airflow in a model room // *Energy and Buildings*. – 2003. – Vol. 35. – № 5. – Pp. 515–526.

S.A. Nazarova, M.A. Zasimova

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia,
195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya, 29*

**ASSESSMENT OF COOLING EFFICIENCY
IN A VENTILATED ROOM WITH STEADY
AND UNSTEADY AIR SUPPLY**

*Н.А. Нигай, С.В. Сыродой,
Ж.А. Солодовникова*, А.С. Познахарев*

*Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
634050, Томск, проспект Ленина, 30,*

** zhanna.kostoreva@yandex.ru*

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ДИСПЕРГИРОВАННОГО СЛОЯ ДРЕВЕСИНЫ НА МЕХАНИЗМЫ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ПРОЦЕССЕ СУШКИ

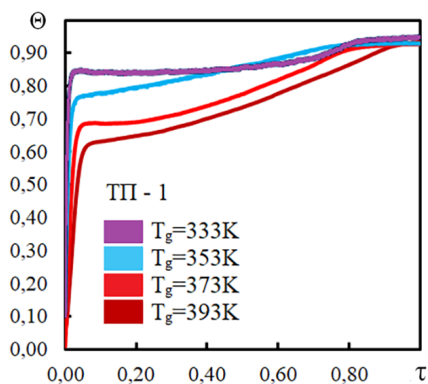
Ранее по результатам экспериментальных исследований [1-3] установлен новый механизм тепло и массопереноса в структуре диспергированной древесной биомассы в условиях ее сушки. В данной работе впервые обоснованы значения толщин слоя древесины, являющихся условной границей между двумя механизмами тепло- и массопереноса переноса: с разнонаправленными течениями (вглубь насыпки и к ее нагреваемой поверхности) и механизм с течением водяных паров только к нагреваемой поверхности насыпки. Проведенные эксперименты показывают, что несмотря на долгую историю изучения процессов сушки древесины в данной области теплотехники есть перспективы совершенствования технологий.

Основной целью работы было установление температур в слое древесной биомассы при разных его толщинах. На рисунке приведены зависимости безразмерных температур

$$\theta = (T - T_0)/(T_g - T_0),$$

где T – температура в характерных реперных точках; T_g – температура внешней среды, К; T_0 – температура внешней среды, К, от без-

размерного времени сушки $\xi = \tau/\tau_d$ (τ – время; t_d – полное время сушки) при различных температурах внешней среды ($T_g = 333 - 393$ К) при толщине слоя $25 \cdot 10^{-2}$ м. Анализ зависимостей, представленных на рисунке, показывает, что в период нагрева влажной диспергированной древесной биомассы в ее слое формируется немонотонно изменяющееся температурное поле, динамика которого определяется толщиной слоя. Для всего исследованного диапазона температур внешней среды ($T_g = 333 - 393$ К) отличительным признаком является то, что в начальный момент времени в глубине древесины стружки температура повышается (что обусловлено конденсацией водяного пара, продиффундировавшегося из верхней части засыпки), а затем уменьшается вследствие испарения вторичного конденсата и исходной влаги. Соответственно можно сделать обоснованный вывод, что температура сушильного агента оказывает незначительное влияние на механизм процессов теплообмена при сушке диспергированной древесиной биомассы.



Зависимости безразмерных температур (θ) слоя биомассы (толщина $d = 250$ мм) от безразмерного времени сушки (ξ) для термопары №1

Исследование выполнено за счет проекта РНФ № 25-79-10045.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Syrodoy, S.V., Malyshev, D.Yu., Nigay, N.A., Purin, M.V. Influence of the Type of Woody Biomass on Energy and Environmental Characteristics of the Thermal Preparation Processes and Ignition of Bio Water Coal Fuel Particles // Process Safety and Environmental Protection. – 2024. – Vol. 184. – Pp. 736–746. DOI:10.1016/j.psep.2024.04.012.

2. Kuznetsov, G.V., Syrodoy, S.V., Kostoreva, Zh.A., Nigay, N.A., Purin, M.V., Karelin, V.A., Salomatov, V.V. Analysis of the Influence of the Type of Heat Transfer on the Dynamics of the Ignition Processes of Wood Bio-mass Particles under Complex Heating Conditions // Combustion and Flame. – 2024. – Vol. 262. – Art. 113353. DOI: 10.1016/j.combustflame.2024.113353.

3. Syrodoy, S.V., Kuznetsov, G.V., Nigay, N.A., Purin, M.V., Kostoreva, Zh.A. The Effect of Compaction of the Dispersed Wood Biomass Layer on its Drying Efficiency // Renewable Energy. – 2023. – Vol. 211. – Pp. 64–75. DOI:10.1016/j.renene.2023.05.021.

***N.A. Nigay, S.V. Syrodoy, Zh.A. Solodovnikova*,
A.S. Poznaharev***

*National Research Tomsk Polytechnic University,
Tomsk Polytechnic University, TPU,
634050, Russian Federation, Tomsk, Lenin Avenue, 30,*

** zhanna.kostoreva@yandex.ru*

**INFLUENCE OF THE THICKNESS OF THE DISPERSED
WOOD LAYER ON THE MECHANISMS OF INTRAPORE
HEAT AND MASS TRANSFER DURING THE DRYING**

И.В. Никифоров, Н.С. Душин*

*Федеральный исследовательский центр
«Казанский научный центр РАН»,
420111, Казань, ул. Лобачевского, 2/31, а/я 261,*

** ilya.nkfrv1@gmail.com*

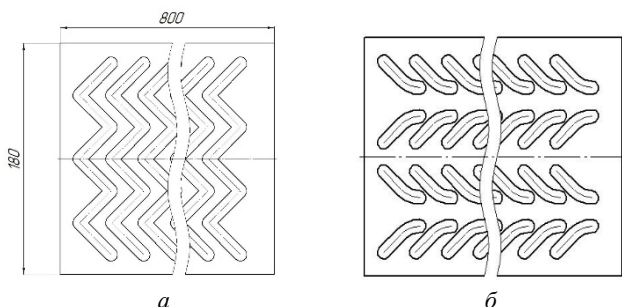
ТЕЧЕНИЕ В СТРУКТУРИРОВАННОМ КАНАЛЕ С ПЕРСПЕКТИВНЫМИ ФОРМАМИ ОВАЛЬНО-ТРАНШЕЙНЫХ УГЛУБЛЕНИЙ

В работе [1] представлен генезис открытия явления аномальной интенсификации ламинарного отрывного течения и теплообмена (АИЛОТТ) на поверхности с наклонной овално-траншейной лункой. Численно и независимо экспериментально было обнаружено, что данное явление сопровождается высокой теплоотдачей внутри лунки и беспрецедентно высокой скоростью на входе в лунку, превышающей среднемассовую скорость в канале до 1,5 раз.

На данный момент большинство литературных источников по АИЛОТТ ограничиваются исследованиями одиночной прямой лунки и каналов с одним рядом наклонных прямых лунок. Однако для оценки возможности применения наклонных овално-траншейных лунок в теплообменных устройствах необходимы исследования широких каналов с многорядными вихрегенераторами подобной формы.

Представлены результаты экспериментального исследования кинематической структуры течения воды на ламинарном ($Re_h = 300$) и турбулентном режимах ($Re_h = 6000$) в прямоугольном структурированном канале размерами $10 \times 180 \times 800$ мм. Исследованы структурированные поверхности с двумя формами овално-траншейных углублений – зигзагообразные и разомкнутые наклонные с изгибом

(рисунок). В обеих конфигурациях глубина элементов равнялась 2,5 мм, а ширина 10 мм.



Эскиз структурированной поверхности с овально-траншейными углублениями различной формы: *a* – зигзагообразные; *б* – разомкнутые изогнутые

При помощи метода SIV [2] получены поля средней скорости, пульсаций продольной и поперечной скорости. Измерения проводились на стабилизированном участке течения, на расстояниях от $0,05h$ до $0,73h$ (от 0,5 до 7,3 мм) от стенки с углублениями.

Выявлены характерные особенности в формировании кинематической структуры потока на ламинарном и турбулентном режимах, связанные с фактором сомкнутости углублений и их формой. Сравнение с ранее полученными данными в однорядном канале с наклонными прямыми лунками позволило дополнить анализ. Например, для однорядного канала с прямыми наклонными углублениями в пристеночной области характерно лучшее перемешивание потока, однако в случае сомкнутых и изогнутых форм высокие значения пульсаций скорости сохраняются на большее расстояние от стенки.

Полученные результаты на турбулентном режиме для обеих форм показывают широкие поперечные области высоких скоростей с более высокими значениями максимумов в случае изогнутых углублений. На ламинарном режиме зигзагообразная форма дает до

двух раз более высокие значения пристеночной скорости при более узких продольных полосах высоких скоростей, при этом в случае изогнутых углублений наблюдаются широкие поперечные области с высокими значениями пульсаций скорости, что способствует лучшему перемешиванию среды в пристеночной области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Исаев, С.А.* Генезис аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена в наклонных канавках на структурированных поверхностях // Изв. РАН. МЖГ. – 2022. – № 5. – С. 13.

2. *Mikheev, N.I., Dushin, N.S.* A method for measuring the dynamics of velocity vector fields in a turbulent flow using smoke image-visualization videos // Instrum Exp Tech 59, 882–889 (2016). <https://doi.org/10.1134/S0020441216060063>.

I.V. Nikiforov*, N.S. Dushin

*Federal State Budgetary Institution of Science
«Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences»,
420111 Russian Federation, Tatarstan, Kazan, ul. Lobachevskogo, 2/31
* ilya.nkfrv1@gmail.com*

FLOW IN A STRUCTURED CHANEL WITH PERSPECTIVE SHAPES OF OVAL-TRENCH GROOVES

А.С. Новокшионов*, Н.С. Маластовский, Н.А. Киселёв

Институт механики, МГУ им. М.В. Ломоносова,

119192, Москва, Мичуринский проспект, 1,

**anton-06042003@mail.ru*

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ЭККЕРТА – ВАЙЗЕ

Введение. Эффект Эккерта – Вайзе заключается в появлении зоны пониженной температуры вблизи задней точки цилиндра при его обтекании сжимаемым потоком газа при числе Маха $> 0,4$ [1]. До настоящего времени этот эффект рассматривался как аэротермодинамическое явление, а не как основа для создания теплообменных аппаратов. В работе [2] предложена оригинальная конструкция, в которой за счет создания отдельного контура с предварительно отобраным газом из основного потока осуществляется теплообмен через теплопроводную стенку (рис. 1).

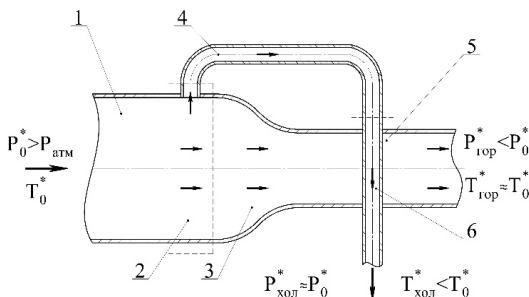


Рис. 1. Устройство на основе эффекта Эккерта – Вайза [2]: 1 – ресивер со сжатым газом; 2 – разделительная камера; 3 – сужающееся сопло; 4 – трубопровод отвода газа в канал охлаждения; 5 – рабочая камера; 6 – канал охлаждения

Но так как количественные оценки реализуемости подобного устройства пока отсутствуют, целью данной работы является раз-

работка методики расчета и выполнение инженерной оценки температур и соотношения расходов для планирования экспериментальных исследований.

Математическая модель. Устройство моделируется как перекрестный теплообменник $\varepsilon - NTU$ -методом. Эффект Эккерта – Вайзе учитывается через адиабатную температуру стенки T_{aw} (путем интерполяции данных [3]) и коэффициент теплоотдачи. Для внешней поверхности использованы зависимости [4] от протяженности области по окружности омываемого цилиндра:

- для полной окружности:

$$\text{Nu} = 0,446\text{Re}^{0,5}\text{Pr}^{0,5} + 0,528\left(\left(6,5e^{\text{Re}/5000}\right)^{-5} + \left(0,031\text{Re}^{0,8}\right)^{-5}\right)^{-1/5} \text{Pr}^{0,42}; \quad (1)$$

- для сектора окружности в диапазоне $85-180^\circ$ от лобовой точки:

$$\text{Nu}_{85-180} = \left(\left(6,5e^{\text{Re}/5000}\right)^{-5} + \left(0,031\text{Re}^{0,8}\right)^{-5}\right)^{-1/5} \text{Pr}^{0,42}; \quad (2)$$

- для сектора окружности в диапазоне $135-180^\circ$ от лобовой точки:

$$\text{Nu}_{135-180} = \left(\left(4,5e^{\text{Re}/4000}\right)^{-5} + \left(0,037\text{Re}^{0,8}\right)^{-5}\right)^{-1/5} \text{Pr}^{0,42}. \quad (3)$$

Для внутреннего потока использовано уравнение Петухова. В качестве дополнительного параметра эффективности для оценки устройства машинного энергоразделения используется величина температурного кпд:

$$\eta = \frac{\Delta T_c^*}{\Delta T_{is}^*} = \frac{\Delta T_c^*}{T_0^* \left[1 - \left(\frac{P_c^*}{P_0^*} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]}, \quad (4)$$

где ΔT_{is} – понижение температуры при изоэнтропическом охлаждении потока; T_c – действительное снижение температуры при охлаждении части газа в устройстве энергоразделения.

Постановка задачи. Расчеты выполнены на установке института механики МГУ [5]: $M = 0,61$, $Re = 2,89 \cdot 10^5$, $P_0 = 122$ кПа, $T_0 = 294$ К; цилиндр $D = 20$ мм, материал – алюминий (толщина стенки 1 мм).

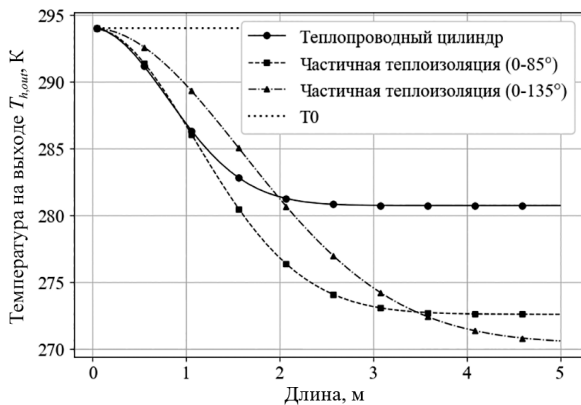
Рассмотрены три варианта теплоизоляции: без изоляции, изоляция передней части ($0-85^\circ$) и изоляция до 135° в соответствии с зависимостями (1)–(3).

Моделирование.

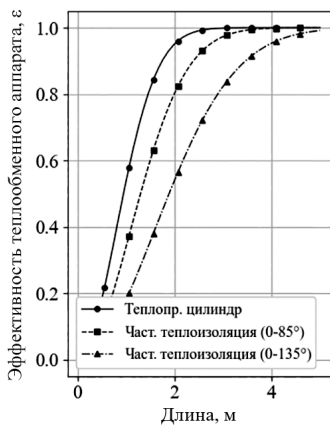
• *Влияние длины теплообменной поверхности.* Увеличение длины L приводит к асимптотическому приближению температуры вторичного потока к адиабатной температуре стенки $T_{ав}$. Для неизолированного цилиндра предельное охлаждение ограничено уровнем $\Delta T \approx 13$ К. Частичная теплоизоляция передней поверхности ($0-85^\circ$) позволяет достичь $\Delta T = 22$ К, а при изоляции большей части окружности ($0-135^\circ$) – до 23,5 К (рис. 2).

Для вариантов с теплоизоляцией температура внутреннего потока опускается ниже статической температуры набегающего потока, но для этого требуется значительная протяженность теплообменной поверхности – более 4 м (расход $G_{in} = 5$ г/с). Чрезмерное сокращение охлаждаемого сектора цилиндра приводит к незначительному дальнейшему снижению температуры, однако ведет к существенному увеличению длины поверхности теплообмена.

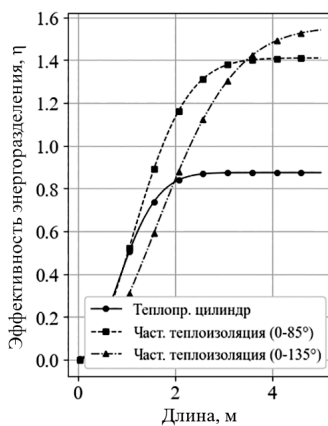
С увеличением длины теплообменного аппарата его тепловая эффективность ε стремится к единице (рис. 2, б), при этом в случае, когда температура вторичного потока становится ниже статической температуры основного потока термический КПД η процесса энергоразделения превышает единицу (η до 1,5) – (рис. 2, в).



a



б



в

Рис. 2. Влияние длины теплообменной поверхности на параметры теплообмена

Интенсификация теплообмена. Дальнейшая интенсификация теплообмена может быть связана как с интенсификацией эффекта Эккерта – Вайса, так и с увеличением площади теплоотдающей поверхности внутренней части цилиндра, например, за счет ее оребрения.

Полученное термическое сопротивление внутренней части приблизительно в 6 раз превосходит ее величину для внешней поверхности цилиндра, что связано с соотношением коэффициентов теплоотдачи: $\sim 130 \text{ Вт/м}^2/\text{К}$ и $\sim 750 \text{ Вт/м}^2/\text{К}$ для внутреннего и внешнего контуров соответственно:

$$R = \frac{1}{\alpha_i d_i} + \frac{\ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}{2\lambda} + \frac{1}{\alpha_o d_o},$$

где α – коэффициенты теплоотдачи для внешнего и внутреннего потока (i и o соответственно); λ – коэффициент теплопроводности цилиндра; d – диаметры теплообменной поверхности.

Выполненные расчеты показали, что увеличение площади поверхности внутренней части цилиндра за счет оребрения для режима $G = 5 \text{ г/с}$ позволяет достичь перепада температур порядка $\Delta T = 14 \text{ К}$ (рис. 3) при $\varepsilon = 0,54$ и $\eta = 0,76$. Следует учитывать, что в то же время это ведет к росту сопротивления в рамках аналогии Рейнольдса, однако позволяет сократить размеры устройства.

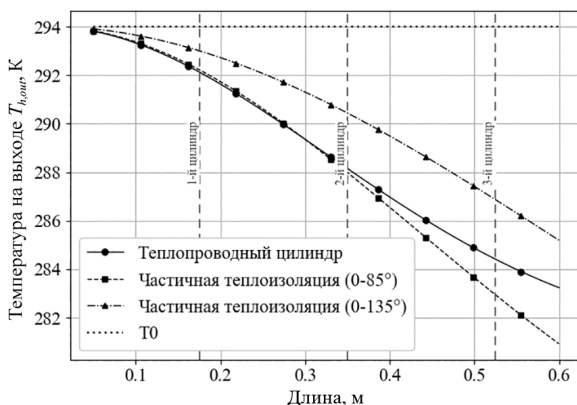


Рис. 3. Температура на выходе от длины для случая интенсификации теплообмена

Обсуждение. Частичная теплоизоляция передней части обтекаемого цилиндра позволяет увеличить температурный перепад между внутренним контуром и внешнем с 13 до 23°C, что обеспечит рост степени охлаждения потока, однако одновременно приведет к увеличению протяженности теплообменного участка. Оптимальным решением выглядит использование цилиндра с теплоизолированной передней частью (85–180°).

В то же время эффект охлаждения потока, возможный за счет более развитой внутренней поверхности цилиндров, обеспечиваемой орebrением, позволяет реализовать значительное охлаждение – до 14° – в рамках имеющейся экспериментальной установки.

Выводы:

– разработана инженерная методика оценки характеристик устройства энергоразделения на основе ε - NTU -подхода с учетом эффекта Эккерта – Вайзе;

– установлено, что температура вторичного потока асимптотически стремится к температуре внешней поверхности цилиндра, которая зависит в том числе от ее теплоизоляции; в то же время рост расхода снижает степень охлаждения;

– теплоизоляция передней части цилиндра позволяет достичь $\Delta T > 20$ К на поверхности цилиндра, тогда как чрезмерное уменьшение теплопроводного сектора неэффективно;

– для имеющейся установки ожидаемый перепад температур (до 12–15 К) заведомо превышает погрешность измерений, что делает эксперимент обоснованным;

– в качестве перспектив совершенствования устройства можно отметить развитие внутренней поверхности за счет орebrения и управление режимами обтекания цилиндров путем выбора оптимального шага их взаимного расположения.

Исследование выполнено за счет гранта РНФ (проект № 24-79-10035), <https://rscf.ru/project/24-79-10035/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Eckert, E. and Weise, W.* Messungen der Temperaturverteilung auf der Oberfläche schnell angeströmter unbeheizter Körper // *Forsch. auf dem Gebiete des Ingenieurwesens.* – 1942. – Vol. 13. – № 6. – Pp. 246–254, doi: 10.1007/BF02585343

2. Пат. №2 853 045 С1 РФ. Устройство и способ безмашинного распределения газовой энергии / *Здитовец, А.Г., Попович, С.С., Киселев, Н.А., Виноградов, Ю.А.* Патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (МГУ); заявл. 28.12.2024; опубл. 18. 12.2025.

3. *Ryan, L.F.* Experiments on aerodynamic cooling. 1951.

4. *Sanitjai, S., & Goldstein, R. J.* (2004). Forced convection heat transfer from a circular cylinder in crossflow to air and liquids // *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(22), 4795–4805. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.05.012>

5. *Zditovets, A.G., Kiselev, N.A., Popovich, S.S., & Vinogradov, Y.A.* (2024). Experimental investigation of the Eckert-Weise effect (aerodynamic cooling) of pair side-by-side circular cylinders in a compressible cross-flow // *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 233. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.126061>

A.S. Novokshonov*, N.S. Malastowski, N.A. Kiselev

*Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University,
119192, Moscow, Michurinsky Prospect, 1,*

* anton-06042003@mail.ru

EVALUATION OF HEAT EXCHANGE APPARATUS PARAMETERS BASED ON THE ECKERT–WEISE EFFECT

В.А. Оришина*, Е.В. Панкратов

*Северный (Арктический) федеральный университет
им. М.В. Ломоносова, Россия,
163000, Архангельск, ул. Набережная Северной Двины, 17,
* v.orishina@narfu.ru*

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЗАКРУЧЕННОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ДОПЛЕРОВСКОЙ АНЕМОМЕТРИИ

Закрученные течения широко используются в энергетике, процессах интенсификации теплообмена, горении, нефтегазовых технологиях и системах очистки [1]. При этом закрутка существенно изменяет структуру турбулентности, перераспределяет импульс по сечению канала и может приводить к формированию зон рециркуляции и неустойчивых режимов [2]. Для построения моделей турбулентности и последующего расчета сопряженных задач тепломассообмена требуется экспериментальная верификация локальных характеристик скорости и их статистических параметров.

Цель настоящей работы – экспериментальное исследование структуры закрученного однофазного воздушного потока в кольцевом канале и анализ трансформации характеристик турбулентности по длине канала в зависимости от интенсивности закрутки.

Эксперимент выполнен на аэродинамическом стенде с кольцевым каналом длиной 1000 мм. Закрутка формировалась аксиально-лопаточным завихрителем с числом лопаток 22 и изменяемым углом установки в диапазоне 0–90°. Геометрические параметры канала обеспечивали формирование развитого турбулентного течения. В качестве рабочей среды использовался воздух при атмосферных условиях.

Измерение локальных компонент скорости осуществлялось методом лазерной доплеровской анемометрии [3]. Принцип метода основан на регистрации доплеровского смещения частоты рассеянного излучения частиц-трассеров, проходящих через интерференционную область измерительного объема. Скорость частицы определяется из соотношения

$$w_i = \frac{f_d \lambda}{2 \sin(\alpha/2)}, \quad (1)$$

где w – компонент скорости; f_d – доплеровская частота; λ – длина волны лазерного излучения; α – угол пересечения лазерных пучков.

Метод ЛДА обеспечивает бесконтактность измерений и высокое временное разрешение, что позволяет регистрировать мгновенные значения скорости и получать статистические характеристики турбулентного потока.

Гидродинамический режим характеризовался числом Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{\overline{\rho w_{z(F)} D_h}}{\mu}, \quad (2)$$

где $\rho \approx 1,204 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха; $\overline{\rho w_{z(F)}}$ – средняя по сечению осевая скорость; $D_h = 0,039 \text{ м}$ – гидравлический диаметр кольцевого канала; $\mu \approx 1,825 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$ – динамическая вязкость.

Для сопоставления различных режимов закрутки все величины нормировались на среднюю по сечению осевую скорость $\overline{\rho w_{z(F)}}$, определенную как

$$\overline{\rho w_{z(F)}} = \frac{\int \overline{w_z} dF}{F}. \quad (3)$$

В исследованном режиме Re соответствует области устойчивой турбулентности с $Re = 5,9 \cdot 10^3$ при различных углах закрутки потока $\theta = 0, 45$ и 75° .

В работе используется разложение мгновенной скорости по Рейнольдсу:

$$w_z(x, t) = \overline{w_z}(x) + w'_z(x, t); \quad (4)$$

$$w_\theta(x, t) = \overline{w_\theta}(x) + w'_\theta(x, t), \quad (5)$$

где $\overline{w_z}$, $\overline{w_\theta}$ – осредненные по времени осевая и тангенциальная компоненты скорости, а u' , w' – соответствующие пульсационные составляющие.

Среднеквадратичные значения пульсаций определялись как

$$w'_{z(RMS)} = \sqrt{\langle w'^2_z \rangle}; \quad (6)$$

$$w'_{\theta(RMS)} = \sqrt{\langle w'^2_\theta \rangle}, \quad (7)$$

где угловые скобки обозначают осреднение по времени.

На рис. 1 представлены безразмерные профили осевой скорости $\overline{w'_z} / \overline{w_{z(F)}}$, нанесенные в координатах \bar{z}, η , где $\eta = X/\delta$ – безразмерная радиальная координата кольцевого зазора, а $\overline{w_{z(F)}}$ – средняя по сечению осевая скорость для соответствующего \bar{z} и угла закрутки. Профили построены для четырех продольных положений \bar{z} и трех углов закрутки $\theta = 0, 45$ и 75° .

При отсутствии закрутки профили имеют квазисимметричный характер и по мере увеличения \bar{z} стремятся к распределению, характерному для развитого турбулентного течения в кольцевом канале. Увеличение угла закрутки приводит к перераспределению осевого импульса по сечению, появлению асимметрии профиля и смещению максимума скорости относительно геометрического центра зазора. Наиболее выраженные отклонения наблюдаются при

$\theta = 75^\circ$, что свидетельствует о существенном влиянии вторичных течений и радиального переноса импульса.

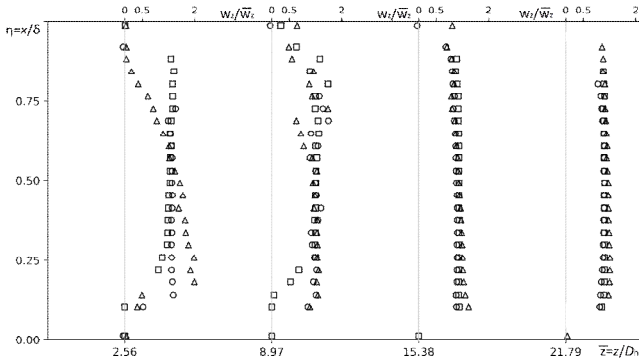


Рис. 1. Профили безразмерной осевой скорости $\overline{w_{z'}}/\overline{w_{z(F)}}$ в координатах η при различных значениях \bar{z} и углах закрутки $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 75^\circ$ ($\circ - \theta = 0^\circ$; $\square - \theta = 45^\circ$; $\triangle - \theta = 75^\circ$)

На рис. 2 приведены безразмерные профили тангенциальной скорости $\overline{w_\theta}/\overline{w_{z(F)}}$ в аналогичном представлении.

Для $\theta = 0^\circ$ тангенциальная компонента практически отсутствует по всей длине канала. При $\theta = 45^\circ$ и 75° фиксируется интенсивная закрутка в начальных сечениях, сопровождающаяся ее постепенным затуханием по мере роста z/D_h . Максимальные значения $\overline{w'_{\theta_{rms}}}/\overline{w_{z(F)}}$ соответствуют $\theta = 75^\circ$, что указывает на значительную долю кинетической энергии, сосредоточенной в окружном движении.

На рис. 3 представлены распределения относительной интенсивности осевых (а) $w'_{rms}/w_{z(F)}$ и тангенциальных (б) и $w'_{\theta_{rms}}/w_{z(F)}$ пульсаций. Для $\theta = 0^\circ$ максимум осевых пульсаций локализован вблизи стенок, что соответствует классической структуре турбулентного течения.

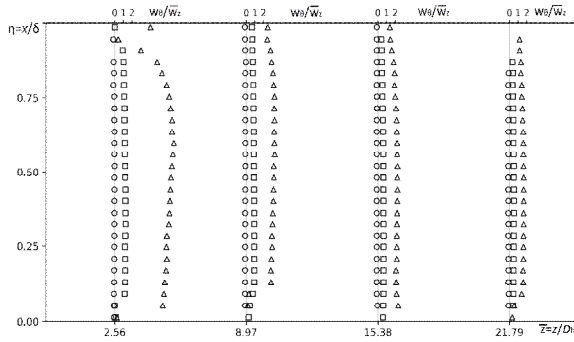
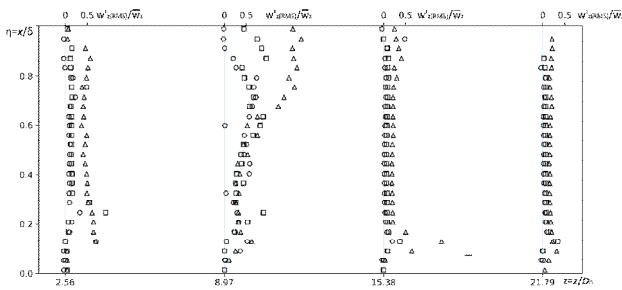
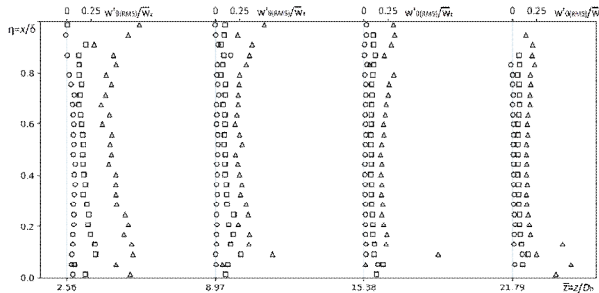


Рис. 2. Профили безразмерной тангенциальной скорости $\overline{w_0}/\overline{w_z(F)}$ в координатах η при различных значениях \overline{z} и углах закрутки $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 75^\circ$ ($\circ - \theta = 0^\circ$; $\square - \theta = 45^\circ$; $\triangle - \theta = 75^\circ$)



a



b

Рис. 3. Распределение относительной интенсивности пульсаций по координате η при различных \overline{z} и углах закрутки:

a – осевых $\overline{w'_{z,rms}}/\overline{w_z(F)}$; *b* – тангенциальных $\overline{w'_{0,rms}}/\overline{w_z(F)}$

С увеличением угла закрутки наблюдается рост $w'_{z,\text{rms}}/\overline{w_{z(F)}}$ в ядре зазора и усиление асимметрии распределения, что отражает дополнительную генерацию турбулентной энергии вследствие закрутки. Тангенциальные пульсации при $\theta = 0^\circ$ минимальны, тогда как при $\theta = 45$ и 75° их уровень существенно возрастает вблизи завихрителя с последующим затуханием вдоль канала.

Таким образом, экспериментально установлено, что увеличение угла закрутки приводит к существенному перераспределению осевого импульса по сечению кольцевого канала, формированию асимметричных профилей скорости и росту анизотропии турбулентной структуры. При $\theta = 75^\circ$ фиксируется максимальный вклад тангенциальной компоненты в кинетическую энергию потока и наибольший уровень относительных пульсаций в ядре зазора. Показано, что по мере увеличения z/D_h происходит перестроение профилей скорости и затухание закрутки, однако влияние завихрения сохраняется на всем исследуемом интервале длины канала. Полученные распределения $w'_z/w_z(\bar{F})$, $\bar{w}_\theta/w_z(\bar{F})$, $w'_{z,\text{rms}}/w_z(\bar{F})$ и $w'_{\theta,\text{rms}}/w_z(\bar{F})$ представляют собой экспериментальную базу для верификации моделей турбулентности при расчете закрученных течений и сопряженных задач тепломассообмена в кольцевых каналах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSRU-2024-0007.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Щукин, В.К.* Теплообмен, массообмен и гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах / В.К. Щукин, А.А. Халатов. – Москва: Машиностроение, 1982. – 200 с.

2. Панкратов, Е.В. Исследование влияния вторичных вихрей в закрученном потоке на теплоотдачу в кольцевом канале // Енисейская теплофизика: тезисы докладов. – Красноярск, 2023. – С. 184-186.

3. Zhang, Z. LDA Application Methods / Z. Zhang. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.

V.A. Orishina*, E.V. Pankratov

*Northern (Arctic) Federal University
named after M.V. Lomonosov, Russia,
163000, Arkhangelsk, st. Northern Dvina embankment, 17,*

** v.orishina@narfu.ru*

**INVESTIGATION OF THE STRUCTURE OF A SWIRLING
TURBULENT FLOW IN AN ANNULAR CHANNEL BY
LASER DOPPLER ANEMOMETRY**

Е.В. Панкратов*

*Северный (Арктический) федеральный университет
им. М.В. Ломоносова, Россия,
163000, Архангельск, ул. Набережная Северной Двины, 17,
* e.pankratov@narfu.ru*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ ИНВЕРСИИ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА В РАЗВОРОТНОЙ ЗОНЕ БАЙОНЕТНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

Байонетный теплообменник представляет собой пару концентричных труб, где внутренняя труба оканчивается глухой заглушкой, заставляя поток рабочей среды разворачиваться на 180° и возвращаться в обратном направлении по кольцевому зазору [1]. Такая геометрия широко применяется в различных областях: от утилизации тепла в промышленных процессах и охлаждения жидким металлом в ядерных реакторах до криогенных медико-технических аппаратов. В обзоре Lock и Minhas подчеркивается, что при такой компоновке особое внимание следует уделять тепловому сопряжению между потоками, поскольку теплопроводность стенки и взаимодействие горячего и холодного потоков влияют на распределение температуры и эффективность теплообмена [2].

Особый интерес представляет явление локальной инверсии теплового потока, возникающей, когда на номинально охлаждаемой стенке участок вместо отвода тепла начинает локально подводить тепло к потоку. Данное явление требует обратного теплопереноса обычно, чтобы локальная температура потока стала ниже температуры стенки, что может происходить из-за сложных сочетаний теплопроводности стенки, рециркуляций и неравномерностей течения.

Исследуемый теплообменный аппарат представляет собой байонетную конструкцию, состоящую из двух коаксиально расположенных цилиндров. Внутренний цилиндр выполнен с внутренним и внешним радиусом $R_1 = 63,5$ мм, $R_2 = 66,5$ мм соответственно, внешний цилиндр – с радиусом $R_3 = 88$ мм. Горячий воздух с температурой 373,15 К подается в осевой внутренний стабилизационный канал с длиной $L_{\text{стаб}} = 500$ мм с массовым расходом 0,1 кг/с. После стабилизационного участка поток попадает в теплообменный аппарат с рабочей длиной $L = 1000$ мм и далее разворачивается в поворотной камере длиной $L_{\text{п.к}} = 100$ мм и направляется в обратную сторону через кольцевой зазор между внутренним и внешним цилиндром. На выходе обеспечено давление 1 атм. В поворотной камере и стабилизационном участке теплообмен отсутствует (адиабатические условия, $Q = 0$).

В рабочем участке реализован сопряженный теплообмен между воздухом и металлической стальной стенкой. На внешней поверхности наружной трубы в этом участке задано граничное условие первого рода с постоянной температурой $T = 273,15$ К. Это обеспечивает отвод тепловой энергии от внутреннего горячего потока к охлажденному внешнему контуру, моделируя теплоотдачу в условиях интенсивного внешнего охлаждения.

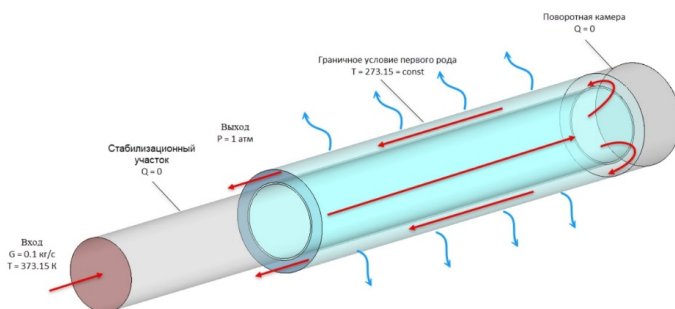


Рис. 1. Геометрические характеристики и граничные условия байонетного теплообменного аппарата

Рассматриваемая конфигурация может быть адаптирована для применения в системах подогрева лопастей ветрогенераторов с целью предотвращения обледенения. В таком контексте внешний цилиндр моделирует поверхность, подверженную воздействию внешней среды, от которой требуется отводить тепло. Внутренний канал может использоваться для циркуляции теплого воздуха от центра лопасти, обеспечивая равномерный прогрев конструкции. Байонетная схема с разворотом потока позволяет реализовать компактный и замкнутый тепловой контур с направленным отводом энергии, что делает данное решение перспективным для встраивания в несущие элементы композитных конструкций лопастей.

Для рассмотренной геометрии было проведено численное моделирование в программной среде ANSYS Fluent с применением осесимметричной трехмерной модели. Внутренние и внешние стенки выполнены из стали с решением задачи сопряженного теплообмена, что позволяет учитывать теплопередачу через твердое тело. Для моделирования турбулентного течения использована модель SST $k - \omega$ (Shear Stress Transport), обеспечивающая адекватное описание как приграничных, так и объемных турбулентных структур. Сетка структурированная, с локальным сгущением вблизи стенок и в зоне поворотной камеры, где ожидается резкое изменение градиентов температуры и скорости.

По результатам численного моделирования было получено распределение скорости в поворотной части теплообменного аппарата. На рис. 2 представлено поле распределения модуля скорости в продольном сечении байонетного теплообменника в области поворотной камеры.

Видно, что при развороте потока из осевого канала во вход кольцевого зазора формируется сложная структура течения, характеризующаяся неравномерностью скоростей. Максимальные значения скорости (до 15 м/с) наблюдаются вблизи стенки внутреннего

цилиндра на входе в кольцевой канал, что связано с ускорением потока в суженном проходе и перераспределением импульса. В центре поворотной камеры формируется область пониженной скорости с рециркуляционными зонами, особенно выраженными вблизи торцевых и боковых стенок.

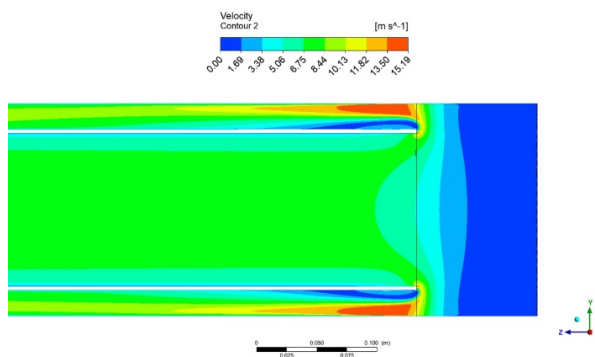


Рис. 2. Распределение модуля полной скорости в продольном сечении поворотной камеры

Такая структура движения влияет на тепловое поле в зоне поворота как показано на рис. 3.

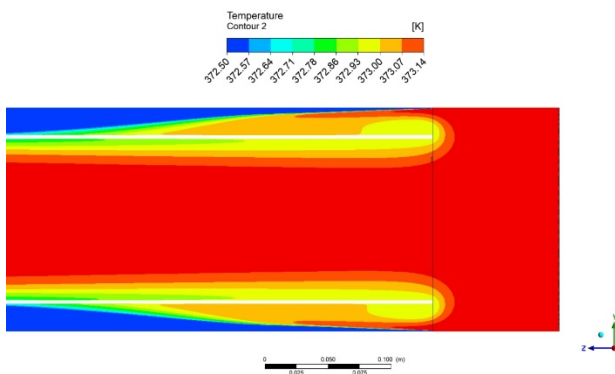


Рис. 3. Распределение температуры в поворотной камере и рабочем участке

По распределению температур в продольном сечении байонетного теплообменника в области поворотной камеры видно, что при развороте потока наблюдается выраженная температурная неравномерность. Так, вблизи оси канала сохраняется максимальная температура, тогда как периферийные зоны охлаждаются значительно быстрее. Такое поведение связано с инерцией основного потока и недостаточной интенсивностью перемешивания в поворотной зоне. Температурный градиент по радиусу создаёт условия для локальной инверсии теплового потока на поверхности внутреннего цилиндра (рис. 4, а).

В первой трети длины рабочего участка наблюдается локальная инверсия теплового потока, отрицательные значения плотности которого указывают на перенос тепла от стенки внутрь теплоносителя. Это вызвано неравномерным распределением температуры в поперечном сечении канала сразу после разворота потока: ядро остается перегретым, в то время как у стенки воздух уже охлажден. Далее по длине канала тепловой поток стабилизируется, приобретая положительные значения, соответствующие направлению от горячего теплоносителя к стенке с постоянной температурой.

В отличие от внутренней поверхности, здесь значения теплового потока стабильные по всей длине охлаждаемого участка, что соответствует направлению теплоотдачи от горячего воздуха к стенке с постоянной температурой. Наблюдается плавный градиент, где максимальные значения расположены ближе ко входу охлаждаемого участка, после чего интенсивность теплообмена постепенно снижается. Инверсия теплового потока на внешней поверхности кольцевого канала не наблюдается (рис. 4, б).

Проведенное численное моделирование показало наличие сложных течений и неравномерного температурного поля в зоне разворота потока.

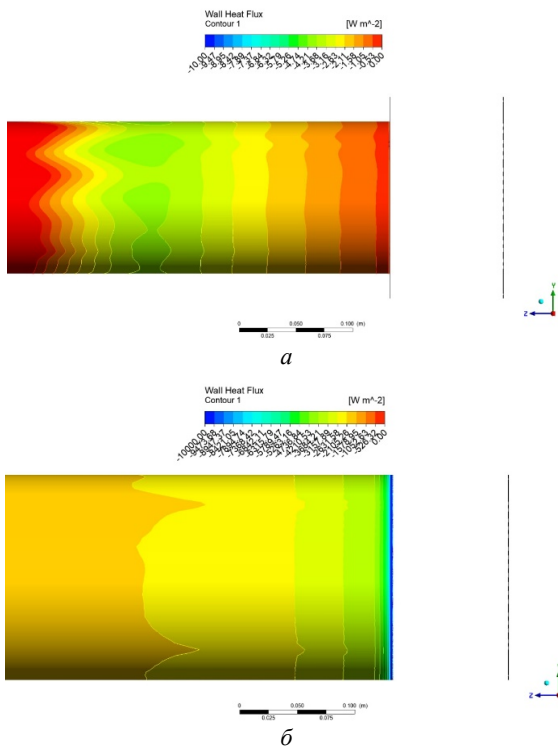


Рис. 4. Распределение плотности теплового потока на поверхности:
a – внутреннего цилиндра; *б* – внешнего кольцевого канала

Внутренний осевой канал, по которому подается нагретый воздух, формирует устойчивое температурное ядро, тогда как охлаждение через внешний цилиндр с постоянной температурой создает условия для возникновения продольных и радиальных градиентов. На фоне этих градиентов в начальном участке кольцевого зазора наблюдается локальная инверсия плотности теплового потока на внутренней поверхности: теплота направляется от стенки внутрь потока. Этот эффект обусловлен запаздыванием теплового выравнивания вследствие инерционности закрученного потока и недостаточной турбулизации в зоне поворота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Zaitsev, A., Kublitskii S.E.* Heat and hydrodynamic calculation of tube-in-tube heat-exchanger / A. Zaitsev, // Journal International Academy of Refrigeration. – 2016. – Т. 15. – Pp. 48-53.

2. *Lock, G.S.H.* Bayonet Tube Heat Exchanger / G.S.H. Lock, H. Minhas // Applied Mechanics Reviews. – 1997. – Vol. 50. – № 8. – Pp. 445-473.

E.V. Pankratov*

*Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov,
Russia, 163000, Arkhangelsk, st. Northern Dvina embankment, 17,*

** e.pankratov@narfu.ru*

**INVESTIGATION OF LOCAL HEAT FLUX INVERSION
IN THE RETURN ZONE OF BAYONET-TYPE HEAT
EXCHANGERS**

***С.А. Пантелеев^{1,2*}, А.П. Дмитрачкова^{1,2},
Д.И. Габдулхакова², Д.И. Зарипов^{1,2}***

*¹ Федеральный исследовательский центр
«Казанский научный центр РАН»,
420111, Казань, ул. Лобачевского, 2/31, а/я 261,
* pantelsem@gmail.com*

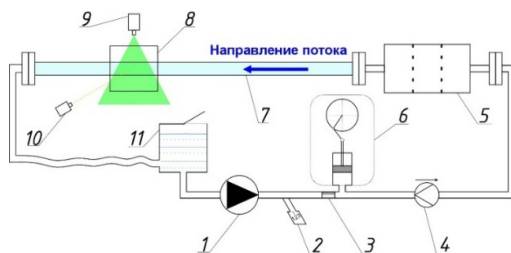
*² Казанский (Приволжский) федеральный университет,
420008, Казань, ул. Кремлевская, 35*

РЕЖИМЫ ТЕЧЕНИЯ ПОТОКА С НАЛОЖЕННЫМИ ПЕРИОДИЧЕСКИМИ ВОЗМУЩЕНИЯМИ В КРУГЛОЙ ТРУБЕ

Известно, что рост путевых потерь при турбулентном режиме течения приводит к увеличению энергопотребления при перекачке жидкости и газа по трубам и, как следствие, к увеличению эксплуатационных расходов [1]. В случае ламинаризации потока потери на трение могут быть значительно снижены. Авторами работы [2] было показано, что добиться ламинарного режима течения при «турбулентных» числах Рейнольдса можно путем наложения на поток периодических синусоидальных возмущений, т.е. создания пульсирующего течения. При определенном соотношении управляющих параметров (амплитуда и частота пульсаций) им удалось добиться ламинарного режима течения вплоть до числа Рейнольдса $Re = 6000$, тогда как при отсутствии возмущений поток турбулизовался уже при $Re = 2000$. Данный метод ламинаризации течения является дальнедействующим и имеет глобальное влияние на поток в отличие от методов, рассмотренных в работе [1], что делает его более перспективным с точки зрения практической реализации. Однако в настоящее время в литературе отсутствует описание механизма ламинаризации течения при наложении периодических

возмущений. Также, хоть авторам и удалось добиться ламинарного режима течения, в литературе до сих пор нет результатов широкого варьирования управляющих параметров и формирующегося режима течения при комбинации этих параметров.

В настоящей работе исследуется влияние управляющих параметров пульсирующего течения жидкости (частота и амплитуда пульсаций, среднерасходная скорость потока) на режим течения. Для этого был спроектирован экспериментальный стенд, рабочим участком которого является прямолинейный цилиндрический канал $190D$, где D – диаметр трубы. При помощи поршня с регулируемой частотой и длиной хода создавались пульсации с заданными параметрами. На практике анализировалось влияние числа Вомерсли ($W_o = R\sqrt{2\pi f/\nu}$, где $R = D/2$, ν – коэффициент кинематической вязкости) и безразмерной амплитуды пульсаций $\beta = A/U_0$, где U_0 – среднерасходная скорость течения. Принципиальная схема установки представлена на рисунке.



- Принципиальная схема установки: 1 – циркуляционный насос;
 2 – вентиль-регулятор расхода; 3 – устройство повышения сопротивления;
 4 – расходомер; 5 – аквариум с перегородками; 6 – поршень; 7 – рабочий участок;
 8 – прозрачный аквариум для устранения искажений; 9 – непрерывный лазер;
 10 – высокоскоростная камера

Методом PIV на различных расстояниях от входа в рабочий участок были получены и проанализированы мгновенные двумерные поля скорости и осциллограммы продольной и радиальной составляющих вектора скорости в ядре потока.

В результате выполнения данной работы удалось частично подтвердить выводы, представленные в работе [2], а также зафиксировать, что поток ламинаризуется на определенном расстоянии вниз по потоку, что показывает, в

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ №25-29-01702.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kühnen, J. *и др.* Relaminarization by Steady Modification of the Streamwise Velocity Profile in a Pipe // Flow, Turbul. Combust. – 2018. – Vol. 100. – № 4. – Pp. 919–943.
2. Xu, D. *и др.* Transition to turbulence in pulsating pipe flow // Journal of Fluid Mechanics. – 2017. – Vol. 831. – Pp. 418–432.

***S.A. Panteleev^{1,2*}, A.P. Dmitrachkova^{1,2},
D.I. Gabdulhakova², D.I. Zaripov^{1,2}***

¹ Federal State Budgetary Institution of Science «Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences», 420111, Russian Federation, Tatarstan, Kazan, ul. Lobachevskogo, 2/31,

** pantelsem@gmail.com*

² Kazan (Volga Region) Federal University, 420008, Russian Federation, Tatarstan, Kazan, ul. Lobachevskogo, 35

FLOW REGIMES WITH SUPERIMPOSED PERIODIC OSCILLATIONS IN A ROUND TUBE

**С.А. Пантелеев^{1,2*}, М.Р. Кучкарова^{1,3},
Н.И. Михеев¹**

¹ *Федеральный исследовательский центр
«Казанский научный центр РАН»,
420111, Казань, ул. Лобачевского, 2/31, а/я 261,
* pantelsem@gmail.com*

² *Казанский (Приволжский) федеральный университет,
420000, Казань, ул. Кремлевская, 35*

³ *Казанский национальный исследовательский
технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ,
420015, Казань, ул. Карла Маркса, 10*

ВТОРИЧНЫЕ ТЕЧЕНИЯ ПРАНДТЛЯ 2-ГО РОДА В ПУЛЬСИРУЮЩЕМ ПОТОКЕ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ КАНАЛЕ

Явление возникновения организованных вторичных течений в прямоугольных каналах, впервые обнаруженное И. Никурадзе и объясненное Л. Прандтлем, остается одним из фундаментальных и практически значимых проявлений турбулентности [1, 2]. В турбулентном режиме в осредненном поле скорости появляются ненулевые поперечные составляющие, формирующие систему крупномасштабных вихрей, которые отсутствуют в ламинарном течении. Несмотря на многолетнюю историю изучения, подавляющее большинство работ посвящено изучению стационарных режимов течения. В то же время многие реальные потоки являются существенно нестационарными, в частности, пульсирующими. Вопрос о поведении вторичных течений в условиях нестационарности остается практически неизученным.

Целью данной работы является экспериментальное изучение структуры и характеристик вторичных течений Прандтля 2-го рода

в турбулентном потоке в прямоугольном канале при наложении пульсаций расхода. Для этого был спроектирован экспериментальный стенд, рабочим участком которого является прямолинейный прямоугольный канал с соотношением сторон 1:2 и длиной $160h$, где h – меньшая высота канала. При помощи пульсатора с регулируемой частотой и длиной хода создавались пульсации с заданными параметрами. Экспериментальные данные получены для нескольких чисел Вомерсли ($W_o = R\sqrt{2\pi f/\nu}$, где R – эквивалентный радиус канала, ν – коэффициент кинематической вязкости) и фиксированной безразмерной амплитуды пульсаций $\beta = A/U_0$, где U_0 – среднерасходная скорость течения. Принципиальная схема установки представлена на рис. 1.

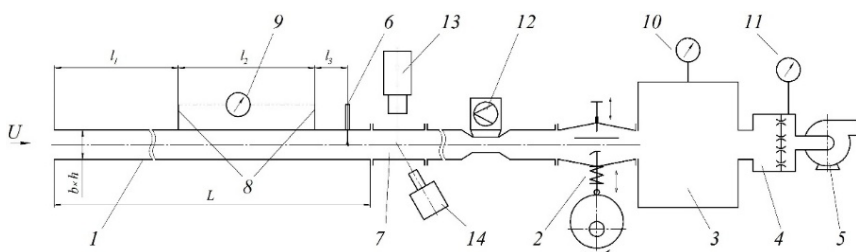


Рис. 1. Принципиальная схема установки. Основные компоненты установки: 1 – рабочий участок; 2 – пульсатор; 4 – критические сопла для регулирования расхода; 12 – ультразвуковой расходомер; 13 – непрерывный лазер; 14 – высокоскоростная камера

Методом SIV были получены мгновенные двумерные поля скорости и осциллограммы продольной и поперечной составляющих вектора скорости в горизонтальных и вертикальных сечениях рабочего участка на различных расстояниях от стенок (рис. 2). В результате поля скорости и пульсаций были восстановлены в поперечном сечении канала.

Выполненные исследования показали, что вторичные течения Прандтля обладают устойчивостью к наложению пульсаций расхо-

да. Их осредненные характеристики в исследованном диапазоне частот пульсаций практически не отличаются от наблюдаемых в стационарном течении, однако магнитуа вторичных течений имеет слабую зависимость от фазы пульсаций.

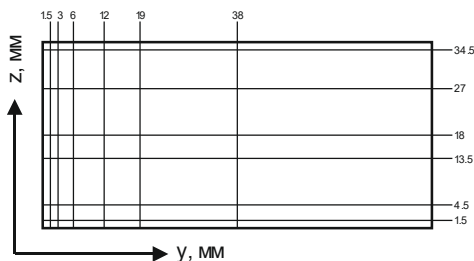


Рис. 2. Некоторые из съемочных плоскостей, в которых производились измерения компонент вектора скорости, в поперечном сечении рабочего участка

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №22-19-00507-П.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nikuradse, J.* Untersuchung über die Geschwindigkeitsverteilung in turbulenten Strömungen // V.D.I. Forschungsheft. – 1926. – Vol. 70. – Pp. 1229–1230.

2. *Никитин, Н.В., Попеленская, Н.В., Stroh, A.* Вторичные течения прандтля 2-го рода. Проблемы описания, предсказания, моделирования // Известия Российской Академии Наук, Механика жидкости и газа. – 2021. – № 4. – С. 73–99.

S.A. Pantelev^{1,2*}, M.R. Kuchkarova^{1,3}, N.I. Mikheev¹

¹ Federal State Budgetary Institution of Science «Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences», 420111, Russian Federation, Tatarstan, Kazan, ul. Lobachevskogo, 2/31

** pantelsem@gmail.com*

² *Kazan (Volga Region) Federal University, 420008, Russian Federation, Tatarstan, Kazan, ul. Lobachevskogo, 35*

³ *Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI 420000 Russian Federation, Tatarstan, Kazan, ul. Karla Marksa, 10*

**SECONDARY PRANDTL FLOWS OF THE 2ND KIND
IN A PULSATING FLOW IN A RECTANGULAR
CHANNEL**

Н.Д. Пашкова*, В.М. Молочников

¹ *Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН», 420111, Казань, ул. Лобачевского, 2/31, а/я 261*

² *Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10,*

** pashkova-2000@mail.ru*

ТУРБУЛИЗАЦИЯ ЗАКРУЧЕННОГО ТЕЧЕНИЯ В КАНАЛЕ С НАЛИЧИЕМ ВНЕЗАПНОГО РАСШИРЕНИЯ

Закрученное течение встречается в различных технических приложениях: форсунки, сепараторы, электрогенераторы и т.д. Отдельное место в данном вопросе занимают теплообменные установки. Увеличение интенсивности теплоотдачи потока – одна из перспективных задач современного машиностроения. Закрутка потока позволяет сократить размеры отрывных зон при изменении геометрии канала или наличии дискретной шероховатости, в результате съем тепла происходит с меньшей поверхности, что увеличивает эффективность теплообмена. Наибольшее число исследований в данной области проводилось для турбулентного потока, так как до настоящего времени наибольшее число теплообменных аппаратов работали именно на этом режиме течения, однако сейчас становится очень актуальной разработка микроканальных теплообменников, работающих преимущественно на ламинарном режиме. В результате была сформулирована цель работы: экспериментальное изучение структуры закрученного течения и геометрии отрывных зон в канале с наличием участка внезапного расширения (классическая задача отрывного течения) при номинально ламинарных режимах течения.

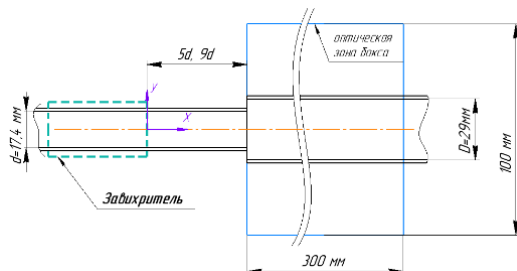


Рис. 1. Схема участка

Рабочий участок представлял собой участок гладкой трубы диаметром $D = 29$ мм, в который поступал закрученный поток, создаваемый лопаточным завихрителем в двух вариациях: с углом лопаток 23 и 45°. Участок между завихрителем и участком внезапного расширения составлял 5 и 9 калибров соответственно, для создания равномерного закрученного течения. Числа Рейнольдса были выбраны $Re = 500, 800, 1200, 1640$. Величина интенсивности закрутки на входе во внезапное расширение представлена в таблице.

Величина интенсивности закрутки [1] на входе во внезапное расширение в зависимости от числа Рейнольдса и угла лопаток

Число Re	Угол лопатки, °	
	23	45
500	0,09	0,1
800	0,11	0,13
1200	0,12	0,14
1640	0,12	0,13

При исследовании течения во внезапном расширении наблюдался классический (для данного потока) осесимметричный профиль с максимумом в центре и зоной обратного течения у стенок. Среднеквадратичные пульсации скорости в данном случае не превышают 2% от средней скорости на входе в завихритель, что удовлетворительно для экспериментальных исследований. Признаков

перехода к турбулентности на всех числах Рейнольдса обнаружено не было.

При наличии входной закрутки от лопаточного завихрителя с углом лопаток 23° при $Re = 500$ (рис. 2, *a*) наблюдается асимметрия потока и значительное сокращение длины отрывной области. Уровень пульсаций остается по-прежнему невысоким, признаков перемежаемости или инерционного интервала в данном случае не обнаружено.

При увеличении числа Рейнольдса до $Re = 800 - 1200$ под действием закрутки потока в области внезапного расширения формируется смещенная относительно оси канала зона торможения потока (зона дефекта скорости) (рис. 2 и 3, *б*). Скорее всего появление данной области возникает вследствие разрушения вихря [1]. Однако признаков прецессии вихря не обнаружено. Уровень пульсаций заметно повышается и становится равным 20-30% от средней скорости потока на входе в завихритель. В самом начале отрывной области ($Re = 800$ это значение $x/h \approx 8$, $Re = 1200$ $x/h \approx 3$) для колебания скорости минимальны. Далее ниже по потоку на границах зоны наблюдаются периодически образующиеся вихри, которые сносятся вниз по потоку, в результате чего зафиксирован факт перемежаемости – один из признаков перехода к турбулентности. В конце области ($Re = 800$ $x/h \approx 13$, $Re = 1200$ $x/h \approx 10$) в частотном спектре наблюдается закон степени $-5/3$, что является признаком развитой турбулентности.

При числе $Re = 1640$ (рис. 3, *в*) области «дефекта» скорости нет, а вблизи стенок канала в области присоединения потока формируются крупномасштабные вихревые структуры, которые периодически разрушаются на более мелкие разномасштабные вихревые образования и сносятся вниз по потоку. В области переднего фронта вихревых структур обнаружены признаки ламинарно-турбулентного перехода (высокий уровень пульсаций с максимумом 40% от средней скорости потока на входе в завихритель и пе-

ремежаемость), а в их тыловой части – признаки развитой турбулентности (инерционный интервал).

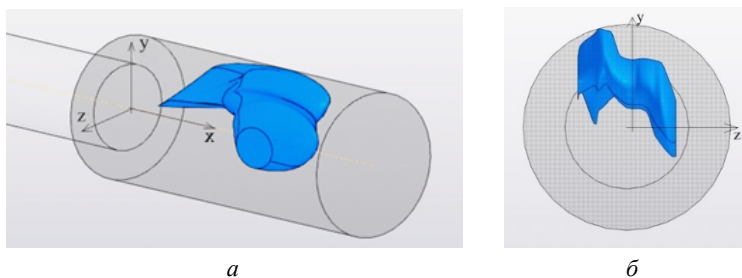


Рис. 2. Пространственная форма области торможения потока при $Re = 1200$ (завихритель 23°)

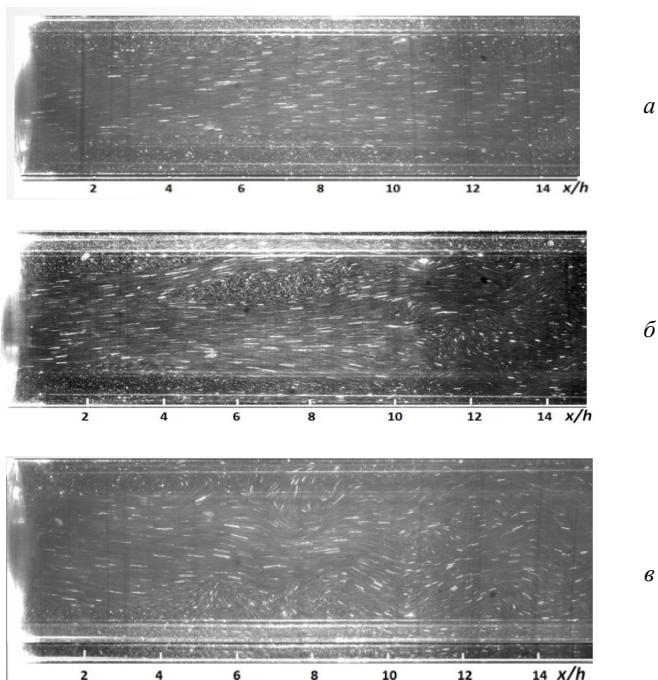


Рис. 3. Визуализация течения во внезапном расширении при закрутке потока завихрителем 23° : а – $Re = 500$; б – $Re = 1200$; в – $Re = 1640$

При установке завихрителя с углом лопаток 45° (рис. 4) размеры отрывной зоны также становятся значительно меньше. При $Re = 500$ области отрыва становятся асимметричными, но вниз по потоку течение выравнивается относительно оси. Уровень пульсаций на входе во внезапное расширение порядка 1%, но при дальнейшем течении жидкости этот параметр увеличивается до 20%. Признаков перемежаемости обнаружено не было. На более высоких числах Рейнольдса наблюдается активное вихреобразование практически в самом начале исследуемой области. Уровень пульсаций на входе во внезапное расширение был выше для данного завихрителя, что, скорее всего, инициировало более ранний переход к турбулентности (в диапазон $x/h = 0 \dots 15$ зафиксирован резкий скачок пульсаций до 25%, а в частотном спектре наблюдается закон степени $-5/3$).

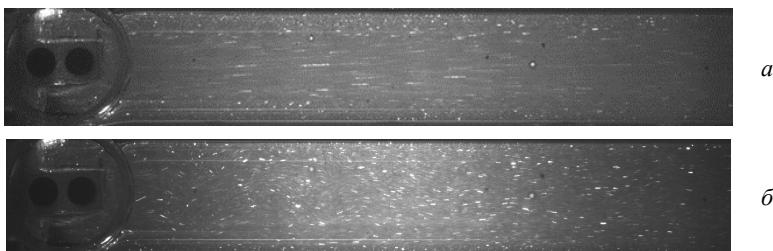


Рис. 4. Визуализация течения во внезапном расширении при закрутке потока завихрителем 45° : *a* – $Re = 500$; *б* – $Re = 1640$

В результате экспериментального исследования выявлены основные закономерности влияния закрутки потока на входе в канал на отрывные области в канале с наличием внезапного расширения, а также рассмотрена вероятность перехода к турбулентности при данных условиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта №25-19-00133.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lucca-Negro, O., O'Doherty, T.* Vortex breakdown: a review
// *Progr. Energy Combust. Sci.* – 2001. – Vol. 27. – Pp. 431–481.

N.D. Pashkova**, *V.M. Molochnikov

¹ *Federal State Budgetary Institution of Science «Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences», 420111, Russian Federation, Tatarstan, Kazan, Lobachevskogo st., 2/31,*

** pashkova-2000@mail.ru*

² *Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, 420111, Russian Federation, Tatarstan, Kazan, K. Marksa st., 10*

EFFECT OF INLET SWIRL ON THE FLOW IN A BRANCHING CHANNEL

*Д.С. Писарев, А.А. Антаненков, И.С. Антаненкова**

*Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Москва, ул. Красноказарменная, 14, стр. 1*

** antanenkovais@mail.ru*

ТЕПЛООТДАЧА И ПОТЕРИ ДАВЛЕНИЯ В ПОДОГРЕВАТЕЛЕ ТЕРМОМАСЛЯНОЙ ОРС-УСТАНОВКИ

Подогреватель фреона в схеме установки, реализующей органический цикл Ренкина (organic Rankine cycle – ORC), по своей сути является экономайзерной частью парогенератора – его роль состоит в нагреве низкокипящего рабочего вещества (НРВ), находящегося в жидком состоянии, до температуры кипения за счет доохлаждения термомасла после испарителя.

Прототипами для подогревателей могут служить теплообменные аппараты систем маслоснабжения турбин энергетических установок на водяном паре. Температурный уровень масла в них несколько ниже, чем в подогревателях ОРС-установок, однако это не должно оказывать существенного влияния на основные подходы и технические решения [1].

В рамках проводимого исследования в качестве оптимальной конструкции для подогревателя фреона ОРС-установки выбран многоходовой кожухотрубный аппарат с перегородками типа «диск – кольцо» с уплотненными технологическими зазорами. Фреон нагревается, двигаясь внутри труб пучка, а термомасло охлаждается в межтрубном пространстве.

Методика теплогидравлического расчета для охладителя масла достаточно подробно изложена в работе [2]. Апробация данной методики для подогревателя НРВ выполнена при параметрах, полученных из расчета принципиальной тепловой схемы ОРС-

установки, утилизирующей теплоту влажных выхлопных газов газопоршневой мини-электростанции. При заданных температуре перед турбиной (160 °С), температуре в конденсаторе (30 °С); внутренних относительных кпд турбины (92%) и насоса (65%) были получены следующие значения кпд цикла на рассматриваемых НРВ: пентан – 21,9%; R1233zd – 20,3%; октаметилтрисилоксана (MDM) – 22,7%. Массовые расходы этих фреонов для создания ORC-установки электрической мощностью 1 МВт составляют 9,3, 18,2 и 16,3 кг/с соответственно.

В качестве греющей среды первого контура принято термомасло Софэксил ТСЖВ, для которого известны расход 25,2 кг/с и температура на выходе из подогревателя 175 °С. Кроме того, принято, что сопротивление теплопередаче слоя загрязнений со стороны термомасла составляет 0,00035 (м²·К)/Вт, а со стороны НРВ – 0,00020 (м²·К)/Вт.

Ввиду более высоких рабочих температур в подогревателе ORC-установки по сравнению с прототипом, в качестве материала труб ($d_n \times \delta = 16 \times 1$ мм) выбрана сталь 20 [$\lambda = 48,5$ Вт/(м·К)].

Результаты расчета подогревателя ORC-установки на разных НРВ

Показатель	Пентан	R1233zd	MDM
Число труб, шт.	480	402	264
Число ходов (по фреону)	4	4	2
Скорость фреона, м/с	0,95	1,10	1,13
Коэффициент теплоотдачи фреона, Вт/(м ² ·К)	1549	1706	1307
Число ходов (по термомаслу)	24	26	34
Скорость термомасла, м/с	0,95	0,92	0,94
Коэффициент теплоотдачи термомасла, Вт/(м ² ·К)	1017	988	996
Коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² ·К)	431	438	403
Площадь теплообмена, м ²	55,4	58,9	55,4
Рабочая длина трубы, м	2,47	3,08	4,4
Внутренний диаметр корпуса, м	0,592	0,550	0,474
Потери давления (фреон), кПа	5,34	15,3	8,7
Потери давления (термомасло), кПа	99,5	99,2	100,1

Необходимо отметить, что представленные в таблице характеристики подогревателей НРВ получены, исходя из условия о предельной величине гидравлических потерь по линии термомасла – не более 100 кПа. Полученные результаты теплогидравлического расчета свидетельствуют о применимости предложенной авторами конструкции прототипа в качестве подогревателя ОРС-установки на различных НРВ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-79-10074). <https://rscf.ru/project/23-79-10074/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антаненкова, И.С., Геллер, Ю.А., Виноградов, М.М., Горбунова, Е.А., Писарев, Д.С., Кузнецов, В.И. Конструктивные решения для основных теплообменных аппаратов ОРС-контура (обзор) // Теплоэнергетика. – 2024. – № 8. – С. 3–23.

2. РТМ 108.020.126-80. Методика расчета и проектирования охладителей масла для систем маслоснабжения турбоустановок. Ленинград: НПО ЦКТИ, 1982.

D.S. Pisarev, A.A. Antanenkov, I.S. Antanenkova*

*National Research University Moscow Power Engineering Institute,
Russia, 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, bul. 1*

** antanenkovais@mail.ru*

**HEAT TRANSFER AND PRESSURE DROP IN
PREHEATER OF A THERMAL OIL ORC-UNIT**

Р.Ф. Рахимов*, М.В. Лоцманов, И.А. Беляев

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Объединенный институт высоких температур РАН»,
125412, г. Москва, ул. Ижорская, 13, стр.2,*

** rakhimrf@ya.ru*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩУЮ СРЕДУ В ПОПЕРЕЧНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Исследование процессов, возникающих при импульсных воздействиях на электропроводящую среду, является актуальной задачей для конструкторских решений в теплообменном оборудовании для ИТЭР. Возникновение срыва плазмы в термоядерной установке приводит к образованию вихревых токов в жидком металле [1], вызывая импульсные воздействия магнитного поля или электрического тока и, как следствие, увеличение механических нагрузок на конструкционные материалы. В работе [2] для уменьшения рисков разрушения теплообменного оборудования и утечки теплоносителя в область формирования плазмы предлагается нанесение капиллярно-пористой структуры на стенки каналов. Покрытие, согласно исследованиям, способно выдерживать быстропротекающие тепловые нагрузки (до 100 ГВт/м²), снижать гидравлическое сопротивление и совместно с МГД-эффектами при образовании трещин позволяет избежать разбрызгивания теплоносителя. При этом отсутствуют экспериментальные работы по импульсным воздействиям на жидкие металлы. В работе [3] рассматриваются разные подходы к численному решению быстропротекающих электромагнитных воздействий на полость с жидким металлом, при этом валидация основана на прямом численном моделировании (DNS), представленном в публикации [4].

В данной работе исследуется магнитная гидродинамика в полости квадратного сечения, заполненной жидким металлом (ртутью). На рис. 1 представлен внешний вид размещения канала в импульсной катушке, которую возможно установить в электромагнит ДЭМ-1 [5], моделируя влияние быстроизменяющегося (50–100 мсек) продольного магнитного поля в стационарном поперечном поле.



Рис. 1. Размещение опытного участка в импульсной катушке

Второй подход к изучению влияния импульсного воздействия – быстродействующее пропускание электрического тока через полость с ртутью (конфигурация опытного участка с установленными электродами представлена на рис. 2), моделируя срыв плазмы, сопровождающийся электрическим пробоем в теплообменном оборудовании с электропроводящей средой.

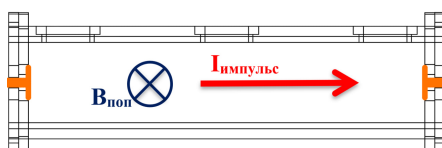


Рис. 2. Конфигурация для импульсного пропускания электрического тока через участок

Рассмотренные в работе экспериментальные исследования позволяют развить феноменологическое понимание МГД-течений при импульсных электромагнитных воздействиях с учетом влияния стационарного магнитного поля и использовать в дальнейшем по-

лученные экспериментальные данные для верификации численных моделей.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда 25-19-00642 «МГД течения при быстро меняющихся сильных магнитных полях и электрических пробоях в жидкость».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Miki, N., Verrecchia, M., Barabaschi, P., Belov, A., Chiocchio, S., Elio, F., Ioki, K., Kikuchi, S., Kokotkov, V., Ohmori, J., Roccella, M., Sonato, P., Testoni, P., Utin, Y.* Vertical displacement event/disruption electromagnetic analysis for the ITER-FEAT vacuum vessel and in-vessel components // *Fusion engineering and design.* – 2001. – Т. 58. – Pp. 555-559.

2. *Vertkov, A.V., Zharkov, M.Y., Lyublinskii, I.E., Safronov, V.A.* Comparative analysis of lithium first wall concepts for tokamak with reactor technologies // *Plasma physics reports.* – 2021. – Т. 47. – №. 12. – Pp. 1245-1260.

3. *Смолянов, И.А., Шмаков, Е.И., Листратов, Я.И., Бердюгин, Д.А., Беляев, И.А., Зиканов, О.Ю.* Численное моделирование задачи вытеснения магнитного поля при течении электропроводной жидкости в плоском МГД-канале // *Вычислительная механика сплошных сред.* – 2025. – Т. 18. – № 3. – С. 276-294.

4. *Bandaru, V., Pracht, J., Boeck, T., Schumacher, J.* Simulation of flux expulsion and associated dynamics in a two-dimensional magnetohydrodynamic channel flow // *Theoretical and computational fluid dynamics.* – 2015. – Т. 29. – № 4. – Pp. 263-276.

5. *Belyaev, I.A., Chernysh, D.Y., Luchinkin, N.A., Krasnov, D.S., Kolesnikov, Y.B., Listratov, Y.I.* Formation of the inlet flow profile for passive control of a magnetohydrodynamic liquid-metal flow in a channel // *High Temperature.* – 2023. – Т. 61. – № 3 – Pp. 417-428.

R.F. Rakhimov*, M.V. Lotsmanov, I.A. Belyev

*Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy
of Sciences, 125412, Izhorskaya st. 13 Bd.2, Moscow, Russia*

** rakhimrf@ya.ru*

**EXPERIMENTAL STUDY OF PULSED ACTION
ON AN ELECTRICALLY CONDUCTIVE MEDIUM
IN A TRANSVERSE MAGNETIC FIELD**

И.С. Романов^{1,2*}, А.П. Попов¹

*¹ Институт теплофизики УрО РАН,
620016, Екатеринбург, Амундсена, 107А,*

** igr.romanov02@gmail.com*

*² УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, Екатеринбург, Мира, 19*

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СПОНТАННОГО ВСКИПАНИЯ И КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОНЕСТАБИЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ

Исследование температур спонтанного вскипания и критических параметров является ключевым для понимания фазовых переходов и термодинамических характеристик веществ, поскольку данные о критических свойствах имеют большое практическое значение, так как являются основой для оценки большого количества термодинамических свойств с использованием принципа соответственных состояний.

Цель данного исследования – определение температуры спонтанного вскипания и критических параметров ряда термонеустойчивых веществ, а также улучшение понимания их фазовых переходов и термодинамических характеристик.

Фазовый переход всегда сопровождается отклонением системы от равновесия, он происходит с участием метастабильной фазы. Понятие метастабильного состояния предполагает локально устойчивое состояние системы, которое сохраняется ограниченное время и переходит в глобально равновесное при достаточно сильных внешних возмущениях, что особенно важно для термонеустойчивых жидкостей. Поскольку исследуемые вещества являются термонеустойчивыми жидкостями, исследования критических параметров были выполнены методом импульсного нагрева проволочного

зонда [1-3; 4], помещенного в исследуемую жидкость. В основе метода лежит нагрев жидкости при помощи импульса электрического тока, подаваемого на тонкий платиновый проволочный зонд. При таком нагреве жидкость достигает температуры, превышающей точку равновесного кипения, оставаясь в метастабильном состоянии до возникновения спонтанного гомогенного зародышеобразования паровой фазы [1, 2] без разрушения структуры вещества. Исследуемая жидкость помещалась во фторопластовый стаканчик, что обеспечивало возможность более глубокого входа в метастабильную область: перегревался лишь небольшой объем, и вероятность наличия в нем предсуществующих центров кипения оставалась крайне малой.

В рамках данного исследования были изучены пять эфиров молочной кислоты (лактаты): пропиллактат (CASRN 616-09-1), пентиллактат (CASRN 6382-06-5), бутиллактат (CASRN 138-22-7), этиллактат (CASRN 97-64-3), метиллактат (CASRN 547-64-8), а также шесть производных фенола: 4-бромфенол (CASRN 106-41-2), р-хлорфенол (CASRN 106-48-9), 1-Нафтол (CASRN 90-15-3), Карвакрол (CASRN 499-75-2), тимол (CASRN 89-83-8), бутил 4-гидроксibenзоат (CASRN 94-26-8). Отдельный интерес к производным фенола связан с тем, что подобные соединения могут образовывать эвтектические растворители, которые благодаря наличию функциональных групп, способных к образованию водородных связей, образуют устойчивые смеси с пониженными температурами плавления и улучшенными растворяющими свойствами.

Поскольку критические свойства этих соединений ранее не измерялись, сравнение экспериментальных данных производилось с результатами, полученными с помощью методов групповых вкладов, где вклад элементов определяется природой участвующих атомов.

В ходе данного исследования впервые получены достоверные критические параметры веществ, ранее недоступных для прямого

измерения. Это восполняет пробелы в термодинамических базах данных и открывает новые возможности в исследовании сложных жидкостей, расширяя тем самым границы предсказательного моделирования для токсичных, нестабильных или дорогостоящих веществ в физической химии и инженерной практике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Скрипов, В.П.* Метастабильная жидкость / В.П. Скрипов. – Москва: Наука, 1972. – 312 с.

2. *Скрипов, В.П., Сеницын, Е.Н., Павлов, П.А. и др.* Теплофизические свойства жидкостей в метастабильном состоянии: Справочник / В.П. Скрипов, Е.Н. Сеницын, П.А. Павлов и др. – Москва: Атомиздат, 1980.

3. *Павлов, П.А.* Динамика вскипания сильно перегретых жидкостей / П.А. Павлов. – Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – Свердловск, 1988.

4. *Никитин, Е.Д.* Таблицы стандартных справочных данных. Критическая температура и критическое давление индивидуальных веществ (ГСССД 268-2012) / Е.Д. Никитин, П.А. Павлов, А.П. Попов. – Москва: Стандартинформ, 2012. – 27 с.

I.S. Romanov^{1,2*}, A.P. Popov¹

¹ *The Institute of Thermal Physics UB RAS,
620016, Russian Federation, Yekaterinburg, Amundsen St., 107A,*

** rakhimrf@ya.ru*

² *Ural Federal University named after the first President of Russia
B.N. Yeltsin, 620002, Russian Federation, Yekaterinburg, Mira St., 19*

MEASUREMENT OF THE SPONTANEOUS BOILING TEMPERATURE AND CRITICAL PARAMETERS OF THERMALLY UNSTABLE SUBSTANCES

*А.Н. Сабирзянов *, М.Н. Меньшиков, К.Е. Мурашев*

*Казанский национальный исследовательский
технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ,
420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10,*

** ansabirzyanov@kai.ru*

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРОВ ЧАСТИЦ И СКОРОСТИ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА НА РАВНОМЕРНОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОТДАЧИ

Актуальность исследования теплообмена конденсированных частиц в сверхзвуковых потоках обусловлена множеством факторов, начиная с горения металлических частиц твердых топлив и до процессов термического напыления покрытий, которое определяется интенсивностью нагрева и плавления частицы. Протекание последующих процессов, как следствие, будет напрямую зависеть от размера частиц, поэтому возникает необходимость уточнения численной зависимости коэффициента теплоотдачи от дисперсности в условиях обтекания сверхзвуковым потоком.

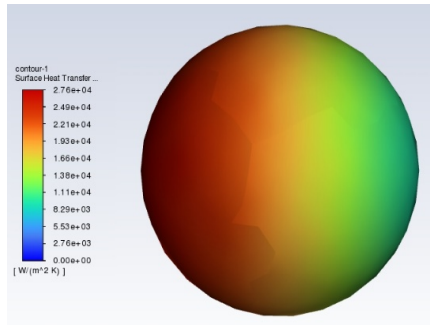
Целью работы является численное определение зависимости коэффициента конвективной теплоотдачи по поверхности сферической частицы от ее размера и параметров сверхзвукового потока.

Полученные в результате исследования зависимости могут быть использованы для уточнения двухфазных потерь в сопле ракетного двигателя, определяющих кристаллизацию частиц.

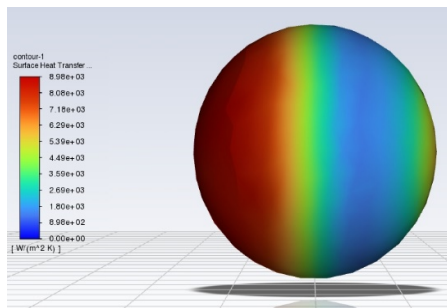
Исследования выполнялись средствами программного продукта Ansys Fluent в трехмерном приближении для стационарной и нестационарной задачи с применением типовых моделей турбулентности. Рассматривались сферические частицы алюминия диаметром от 2,5 до 100 мкм с заданной температурой поверхности.

Верификация результатов моделирования проводилась на основе сравнения с имеющимися данными [1, 2] и с данными, полученными по критериальным зависимостям.

Проведенные исследования подтвердили, что дисперсность размеров частицы является ключевым параметром, влияющим на теплообмен в высокоскоростных потоках. Различие значений коэффициента конвективной теплоотдачи в зависимости от размера частиц достигает значительных величин. В качестве примера на рисунке приведены распределения коэффициента теплоотдачи для частиц разного диаметра, полученные при одинаковых параметрах потока для стационарного приближения.



a



б

Распределение коэффициента теплоотдачи на частице диаметром:
a – 2,5 мкм; *б* – 100 мкм

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ли, В., Лю, Х.* Моделирование теплообмена металлических частиц в высокоскоростном потоке // ПМТФ. – 2016. – Т. 57. – № 2. – С. 45-56.
2. *Теплухин, В.А. и др.* Горение металлических порошков в ракетных двигателях // Вестник МГТУ. – 2010. – Т. 13. – № 4. – С. 78-89.

A.N. Sabirzyanov*, M.N. Menshikov, K.E. Murashev

*Kazan National Research Technical University
named after A.N. Tupolev – KAI,
420111, Russian Federation, Tatarstan, Kazan, K. Marksa st., 10*

** ansabirzyanov@kai.ru*

**TEMPLATE NUMERICAL STUDY OF THE INFLUENCE
OF PARTICLE SIZES AND SUPERSONIC FLOW
VELOCITY ON THE UNIFORMITY OF THE HEAT
TRANSFER COEFFICIENT DISTRIBUTION**

А.Н. Сабирзянов, А.Р. Ахметзянов, А.Р. Бекеров*

*Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.Н. Туполева – КАИ,
420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10,*

** ansabirzyanov@kai.ru*

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА ГАЗООБРАЗНЫХ ПРОДУКТОВ РАЗЛОЖЕНИЯ РЕЗИНОПОДОБНЫХ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

При проектировании тепловых энергетических установок обязательным аспектом выступает проектирование тепловой защиты. В ракетных двигателях твердого топлива стенки камеры сгорания защищают активным теплозащитным покрытием, в роли которого выступают резиноподобные материалы, аблирующие в процессе работы двигателя. Продукты абляции и уносимый коксовый слой могут влиять на тяговые характеристики двигателя. Знание состава газообразных продуктов термодеструкции резиноподобных теплозащитных материалов (ТЗМ) позволяет обеспечить более точное прогнозирование тяговых характеристик.

В связи с этим возникает конкретная цель исследования – получение экспериментальных данных о составе продуктов термического разложения конкретных марок резиноподобных материалов. Для достижения указанной цели необходимо иметь экспериментальную базу и отработанную методологию получения данных о составе продуктов разложения резиноподобных ТЗМ.

Следует отметить, что экспериментальные данные по составу продуктов термического разложения конкретных марок резиноподобных ТЗМ в открытых источниках либо крайне ограничены, ли-

бо отсутствуют вовсе. Государственный научный центр «Центр Келдыша» и Московский институт теплотехники исследовали состав продуктов термического разложения резиноподобных ТЗМ на основе этиленпропиленового каучука, близкого по составу и свойствам к ТЗМ Р-998, Р-864. Результаты показали, что основными компонентами продуктов сгорания при температуре 1300 К являются метан CH_4 и этилен C_2H_4 , суммарная массовая доля которых составляет 75%. Кроме этого, присутствуют водород H_2 ~4%, этан C_2H_6 , ~3%, пропилен C_3H_6 , ~1,5% и следы бутилена C_4H_8 . Окись углерода CO присутствует в незначительных количествах (<1%) [1].

Основными продуктами разложения фенольных смол, используемых часто в качестве связующих, являются водород H_2 , метан CH_4 , окись CO и двуокись CO_2 углерода, фенол, крезолы, другие фенолы и легкие углеводороды [2, 3]. Некоторые экспериментальные исследования состава продуктов разложения полимеров, входящих в резиноподобные ТЗМ, изложены в работе [4]. Так, в результате пиролиза полиэтилена, полипропилена, полиизобутилена, основные продукты разложения – углеводороды $\text{C}_1 - \text{C}_4$ (метан, этан, этилен, пропилен, бутилены). Для полибутадиена и бутадиенстирольного каучука помимо углеводородов $\text{C}_1 - \text{C}_4$, характерно образование диенов (бутадиен) и ароматических соединений (бензол, стирол). При пиролизе бутадиен-нитрильного каучука дополнительно к углеводородам выделяется цианистый водород и нитрилы (акрилонитрил).

Для выполнения намеченных исследований была спроектирована и создана экспериментальная установка (рис. 1), где в качестве нагревателя используются лампы накаливания 2, способные нагревать внутреннюю полость камеры 1 до 1000 °С. Образец 3 устанавливается на керамическую сотовую подставку, которая в

свою очередь лежит на ложементе 4. На выходе из камеры сгорания продукты разложения попадают по трубопроводной системе 5 в газоанализатор 6 (газоанализатор Полар, имеющий электрохимические датчики для улавливания CO, CO₂, NO, NO₂ и NO_x).

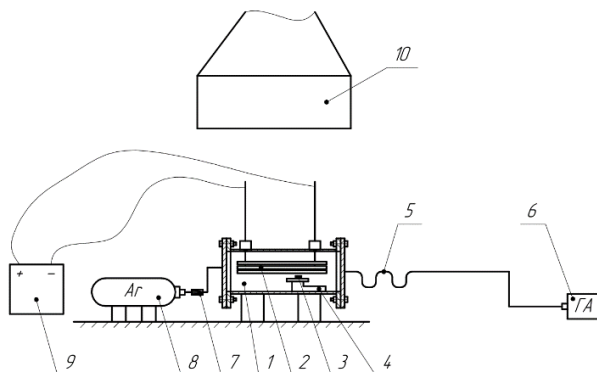


Рис. 1. Установка для проведения испытаний: 1 – внутренняя полость камеры; 2 – лампы накаливания; 3 – образец резины; 4 – ложемент с керамической сотовой подставкой; 5 – трубопроводная система; 6 – газоанализатор; 7 – редуктор давления; 8 – баллон с инертным газом; 9 – источник питания; 10 – вытяжка

Исследовались следующие марки резиноподобных материалов: 51-2166; 51-1667; 51-2185-1; 6М-55/54. Испытания сырой и полимеризованной резин каждой марки проводились в среде воздуха при атмосферном давлении. Во всех экспериментах образцы резин изначально имели одинаковую массу ~ 4,5 гр. В результате динамического нагрева исследуемого материала получены температурные зависимости концентраций исследуемых газообразных продуктов термического разложения. Следует отметить незначительную концентрацию NO₂ и CO₂ в составе продуктов разложения. В качестве примера на рис. 2 приведено сравнение температурных зависимостей изменения концентраций СО в газообразных продуктах термодеструкции сырой и полимеризованной резин.

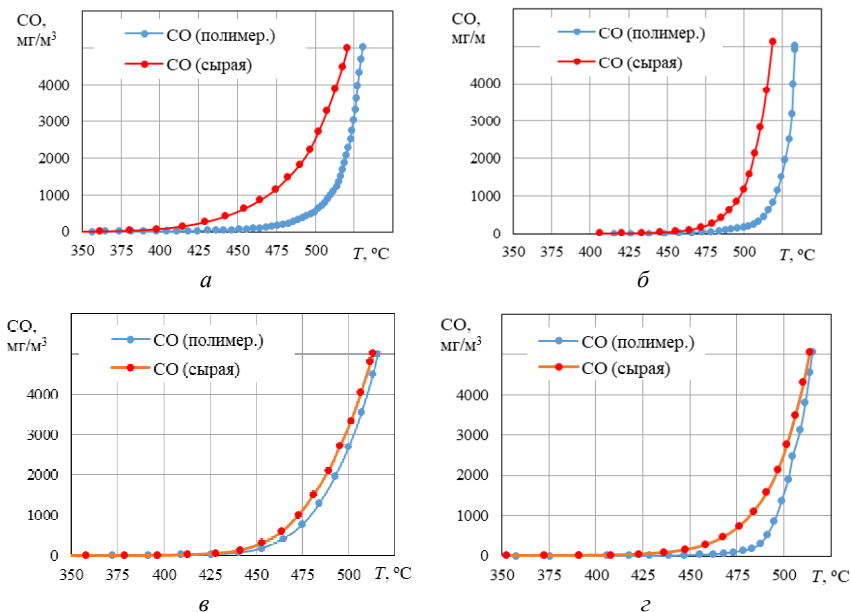


Рис. 2. Температурная зависимость концентраций СО в продуктах разложения:
 а – резины 51-2166; б – резины 51-1667; в – резины 51-2185-1;
 г – резины 6М-55/54

Результаты испытаний сопоставлялись с данными, полученными на другом газоанализаторе и хроматографе «ХРОМАТЭК – КРИСТАЛЛ 5000», что определяло достоверность отработанной методологии получения данных о составе продуктов разложения резиноподобных ТЗМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миронов, В.В., Толкач, М.А. Состав и свойства газообразных продуктов деструкции резиноподобных теплозащитных материалов // ТВГ. 2021. – Т. 59. – № 5. – С. 747–754.

2. Грибанов, В.М., Слободчиков, С.С., Потапенко, А.И., Ульяновков, Р.В. Расчетно-экспериментальный метод определения

энергозатрат на физико-химические превращения в полимерных материалах // Вопросы электромеханики. – 2012. – Т. 130. – С. 51–57.

3. *Горюев, И.М., Ибрагимов, А.А.* Фенолформальдегидные смолы // Вестник магистратуры. 2019. – № 10-3(97). – С. 11–17.

4. *Мадорский, С.* Термическое разложение полимеров / С. Мадорский; пер. с англ. – Москва: Мир, 1967. – 328 с.

A.N. Sabirzyanov*, A.R. Akhmetzyanov, A.R. Bekerov

*Kazan National Research Technical University
named after A.N. Tupolev – KAI,*

420111, Russian Federation, Tatarstan, Kazan, K. Marksa st., 10

** ansabirzyanov@kai.ru*

**STUDY OF THE COMPOSITION OF GASEOUS
PRODUCTS OF DECOMPOSITION OF RUBBER-LIKE
THERMAL PROTECTION MATERIALS**

И.И. Саушин^{1,2,3*}, А.Е. Гольцман², М.И. Телешов¹

* saushin@promav.ru

¹ Завод горелочного оборудования и автоматики ПРОМА, 420017, Индустриальный парк Лаишево ОЭЗ «Иннополис», Лаишевский район, ул. Технологическая, 11

² Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН», 420111, Казань, ул. Лобачевского, 2/31, а/я 261, * an116ya@mail.ru

³ ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», 420066, г. Казань, ул. Красносельская 51

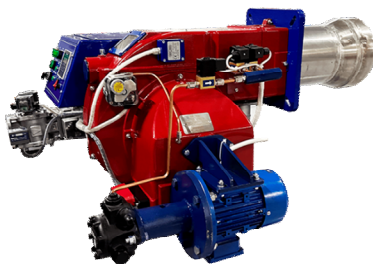
ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМЫ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ В БЛОЧНЫХ ГОРЕЛКАХ ЕММА-N ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ КОТЛОВ

Рубеж XX и XXI веков стал ключевым этапом в формировании глобальной энергетической повестки. Ратификация Киотского протокола в 1997 году побудила Европейский Союз (ЕС) активизировать усилия по снижению антропогенного воздействия на климат. Успешная имплементация протокола потребовала от ЕС не только совместного подхода к его принятию, но и выработки единых механизмов регулирования. Кульминацией этого процесса стала «Стратегия-2020», утвержденная в 2007 году, которая установила амбициозные цели: сокращение выбросов парниковых газов на 20%, достижение 20%-ной доли ВИЭ в энергобалансе и повышение энергоэффективности на 20% (относительно прогнозных показателей). После продолжительных межведомственных обсуждений и активной роли датского председательства в Совете ЕС в октябре 2012 года была принята Директива по энергоэффективности (EED).

Ужесточение европейских нормативов закономерно инициировало пересмотр российских стандартов. Это привело к началу

работ по актуализации ГОСТ Р 50591-2013, в результате которых предельные нормы по оксидам азота (NO_x) были приведены в соответствие с мировыми требованиями (менее 60 мг/м^3). В этой связи ключевым трендом в развитии промышленного горелочного оборудования становится применение технологий, направленных на подавление образования NO_x .

Одним из наиболее эффективных методов снижения концентрации NO_x (до уровня менее 30 мг/м^3) является технология рециркуляции дымовых газов (FGR), основанная на снижении пиковых температур в факеле. Она широко применяется ведущими мировыми производителями. Однако эффективность FGR критически зависит от параметров процесса горения и требует интеллектуального управления расходами компонентов через менеджер горения. Существующий барьер для импортозамещения в этой области обусловлен монополизацией рынка европейским производителем с закрытыми протоколами связи, что ограничивает интеграцию с другими компонентами. Этот проект представляет первые результаты внедрения технологии FGR в российской блочной горелке ЕММА (рисунок) под управлением отечественного менеджера горения «САФАР». Данное решение демонстрирует возможность создания полностью локализованной системы сжигания с низким уровнем выбросов NO_x , свободной от импортных комплектующих и программного обеспечения.



Блочная комбинированная горелка ЕММА производства
ООО «НПП ПРОМА» (Россия)

I.I. Saushin^{1,2,3*}, A.E. Goltsman², M.I. Teleshov¹

** saushin@promav.ru*

*¹ "PROMA Burner Equipment and Automation Plant",
420017, Laishevo Industrial Park, Innopolis SEZ, Laishevsky District,
Tekhnologicheskaya St. 11*

*² Federal Research Center, Kazan Scientific Center of the Russian
Academy of Sciences, 420111, Kazan, Lobachevsky St., 2/31,
P.O. Box 261*

** an116ya@mail.ru*

*³ Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
"Kazan State Power Engineering University",
420066, Kazan, Krasnoselskaya St. 51*

**IMPLEMENTATION OF A FLUE GAS RECIRCULATION
(FGR) SYSTEM IN EMMA-N BLOCK BURNERS FOR
INDUSTRIAL BOILERS**

М.А. Селезнев^{1,2*}, А.Г. Кучумов^{1,2}

¹ *Научно-технологический университет «Сириус»,
354340, пгт. Сириус, Олимпийский проспект, 1*

² *Пермский национальный исследовательский политехнический
университет, 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29,*

* seleznev.ma@talantiuspeh.ru

СРАВНЕНИЕ ГЕМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ТРАНСКАТЕТЕРНОМ ПРОТЕЗИРОВАНИИ АОРТАЛЬНОГО КЛАПАНА

Сердечно-сосудистые заболевания, включая тяжелый аортальный стеноз, являются одной из ведущих причин смертности, особенно среди пожилых пациентов. Несмотря на распространенность хирургической замены аортального клапана, высокая степень риска и сложность процедур обусловили развитие альтернативных малоинвазивных методов, среди которых значительное место занимает транскатетерная имплантация аортального клапана (ТИАК). Существующие протезы имеют ограниченный выбор линейки размеров, что может приводить к регургитации из-за недостаточно плотного прилегания протеза к аорте, низким градиентам давления или повышенной тромбогенности после проведения операции. Целью работы является моделирование гемодинамики в протезе клапана, имплантируемого в аорте человека для подбора оптимальных параметров геометрии протеза. Критерием сравнения являются гемодинамические характеристики, близкие к нативному клапану. Для моделирования поведения установленного импланта нами были созданы 8 геометрий протезов, каждый из которых состоял из створчатого аппарата и сетчатой конструкции каркаса. Два из восьми протеза соответствовали коммерческим клапанам: Sapien и Evolut. Также была разработана геометрическая модель корня аор-

ты. В данном исследовании была реализована математическая модель, основанная на методе взаимодействия жидкости и твердого тела (FSI), для оценки и прогнозирования гемодинамических и механических характеристик транскатетерных аортальных клапанов [1, 2]. CFD-моделирование позволяет оценить гидродинамические характеристики [3]. В качестве начальных условий на входе в аорту задавалась функция скорости, основанная на данных эхокардиографии, а на выходе – физиологическое давление, определенное двухэлементной моделью Виндкесселя. Кровь моделировалась как ньютоновская жидкость с постоянным значением плотности 1060 кг/м^3 и динамической вязкости $0,0035 \text{ Па}\cdot\text{с}$. Все результаты были получены путем численного моделирования в программном пакете COMSOL Multiphysics. В результате моделирования нами были получены основные метрики, позволяющие оценить пригодность протеза и проанализировать изменение гемодинамики после проведения ТИАК. Среди оцениваемых параметров были: пристеночные касательные напряжения (WSS), максимальные скорости потока крови (V_{max}), полезная площадь открытия створок (EOA), их перемещение, градиенты давления (ΔP) и коэффициент изменения направления пристеночных касательных напряжений на створках (OSI). Наилучшие результаты по совокупности параметров показали две модели: коммерческий имплант Evolut и одна из геометрий, разработанной нашей командой.

Результаты получены при финансовой поддержке проекта «Развитие технологии для проектирования численного моделирования и аддитивного производства сетчатых конструкций для транскатетерной имплантации аортального клапана», реализуемого в рамках государственной программы федеральной территории «Сириус» «Научно-технологическое развитие федеральной территории «Сириус» (Соглашение № 27-03 от 07 июля 2025 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Pil, N., Kuchumov, A.G., Kadyraliev, B., Arutunyan, V.* Influence of Aortic Valve Leaflet Material Model on Hemodynamic Features in Healthy and Pathological States // *Mathematics*. – 2023. – Vol. 11. – № 2. – P. 428. – DOI 10.3390/math11020428. – EDN XVEQUV.

2. *Kuchumov, A.G., Makashova, A., Vladimirov, S. et al.* Fluid–Structure Interaction Aortic Valve Surgery Simulation: A Review // *Fluids*. – 2023. – Vol. 8. № 11. – P. 295. – DOI 10.3390/fluids8110295. – EDN FKOZQO.

3. *Kuchumov, A.G., Nyashin, Y.I., Samartsev, V.A.* Modelling of peristaltic bile flow in the papilla ampoule with stone and in the papillary stenosis case: Application to reflux investigation // *IFMBE Proceedings: 7th, Kent Ridge, 06–08 июля 2015. – Kent Ridge, 2015. – Pp. 158-161. – DOI 10.1007/978-3-319-19452-3_42. – EDN VALVAB.*

M.A. Seleznev^{1,2*}, A.G. Kuchumov^{1,2}

¹Sirius University of Science and Technology, 354340, Russian Federation, Sirius Federal Territory, Olympic Prospekt, 1

²Perm National Research Polytechnic University, 614990, Russian Federation, Perm, Komsomolsky Prospekt, 29

** seleznev.ma@talantiuspeh.ru*

COMPARISON OF HEMODYNAMIC CHARACTERISTICS IN TRANSCATHETER AORTIC VALVE REPLACEMENT

Г.Д. Селиванов^{1,2*}, А.Г. Кучумов^{1,2}

¹ *Научно-технологический университет «Сириус»,
354340, пгт. Сириус, Олимпийский проспект, 1*

² *Пермский национальный исследовательский политехнический
университет, 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29,*

**selivanov.gd@talantiuspeh.ru*

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОТЕЗОВ ТИАК НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕТЧАТОЙ КОНСТРУКЦИИ КАРКАСА

Во время операции ТИАК (транскатетерная имплантация аортального клапана) протез, устанавливаемый непосредственно внутри пораженного нативного клапана через кровеносный сосуд [1], представляет собой стент с биологическими или полимерными створками, который расширяется внутри аортального кольца, заменяя функцию собственного клапана. Стент выполняет роль каркаса [2, 3], обеспечивая фиксацию створок клапана и стабильное положение протеза. Его изгибная жесткость отвечает за способность адаптироваться к кривизне аортального корня и динамическим деформациям в условиях сердечного цикла. Ограниченное число конфигураций существующих систем ТИАК и отсутствие учета индивидуальной геометрии аортального корня затрудняют прогнозирование поведения протеза после имплантации. Целью данной работы является разработка и исследование вычислительного подхода для анализа и прогнозирования изгибной жесткости стент-каркаса протеза для ТИАК в зависимости от его геометрических параметров на основе численного моделирования и методов машинного обучения.

Рассматриваются два подхода к исследованию изгибной жесткости каркаса протеза. Используется алгоритм построения параметризованных геометрий каркаса ТИАК с параметрами: количество ячеек по вертикали (K) и горизонтали (N), кривизна в верхней части (UB), диаметр (WD) и положение (WP) зоны сужения, длина прямой части (SS). В первом подходе проведены натурный и численный эксперименты на трехточечный изгиб и построена суррогатная модель (интерполяция радиальными базисными функциями) для исследования чувствительности изгибной жесткости к изменению геометрических параметров. Второй подход включает создание 2400 моделей, численные эксперименты на чистый изгиб и построение нейросети. По результатам экспериментов, проведенных в рамках первого подхода наибольшую положительную корреляцию, показали параметры K (0,64) и N (0,56), присутствует и достаточно высокая обратная зависимость от параметров SS (-0,29) и UB (-0,16). В случае второго подхода наибольшую положительную связь показал параметр K (0,59), среднюю зависимость от UB (0,42) и N (0,23), почти нулевую от WD (0,08) и SS (0,08), а WP продемонстрировал слабую положительную корреляцию (0,18). Построена модель машинного обучения для определения геометрических параметров стент-каркаса по заданной изгибной жесткости. Точность оценивалась сравнением предсказанных параметров с результатами численных экспериментов. Ошибка в предсказаниях модели составила около 10 %. В результате работы сформирован подход для анализа влияния геометрии стент-каркаса на его изгибную жесткость. Несмотря на то, что методы оценки изгибной жесткости отличаются в зависимости от подхода, в обоих случаях параметры ячейки структуры оказывают значимое влияние на значение изгибной жесткости конструкции. Методы машинного обучения позволили существенно ускорить оценку механических характеристик искусственного клапана, однако они требуют дальнейшего исследования, увеличения обучающей выборки и конкретизации оцениваемых параметров.

Результаты получены при финансовой поддержке проекта «Развитие технологии для проектирования численного моделирования и аддитивного производства сетчатых конструкций для транскатетерной имплантации аортального клапана», реализуемого в рамках государственной программы федеральной территории «Сириус» «Научно-технологическое развитие федеральной территории «Сириус» (Соглашение № 27-03 от 07 июля 2025 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kuchumov, A., Khoroshev, D., Selivanov, G. et al.* Study of Bending Stiffness of Transcatheter Aortic Valve Stents // *Mech. Solids* (2026). DOI: 10.1134/S0025654425605427.
2. *Kuchumov, A.G., Nyashin, Yu.I., Samartsev, V.S. et al.* Mathematical modelling of shape memory stent placing at endobiliary interventions // *Russian Journal of Biomechanics*. – 2017. – Vol. 21. – № 4. – Pp. 461-472. – DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2017.4.13. – EDN YMCSRF.
3. *Кучумов, А.Г., Лохов, В.А., Словигов, С.В. и др.* Экспериментальное исследование сплавов с памятью формы, применяющихся в медицине / // *Российский журнал биомеханики*. – 2009. – Т. 13. – № 3. – С. 7-19. – EDN KWDTZF.

G.D. Selivanov^{1,2*}, A.G. Kuchumov^{1,2}

*¹ Sirius University of Science and Technology,
354340, Russia Sirius Federal Territory, Olympic prospect, 1*

*² Perm National Research Polytechnic University,
614990, Russia, Perm, Komsomolsky prospect, 29*

** seleznev.ma@talantiuspeh.ru*

NUMERICAL ANALYSIS OF THE EFFECT OF GEOMETRIC PARAMETERS OF TAVI PROSTHESES ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE STENT FRAME LATTICE STRUCTURE

*О.А. Сидоркина *, С.С. Тимофеева, Ю.В. Караева*

*Федеральный исследовательский центр
«Казанский научный центр РАН»,
420111, Казань, ул. Лобачевского, 2/31, а/я 261,*

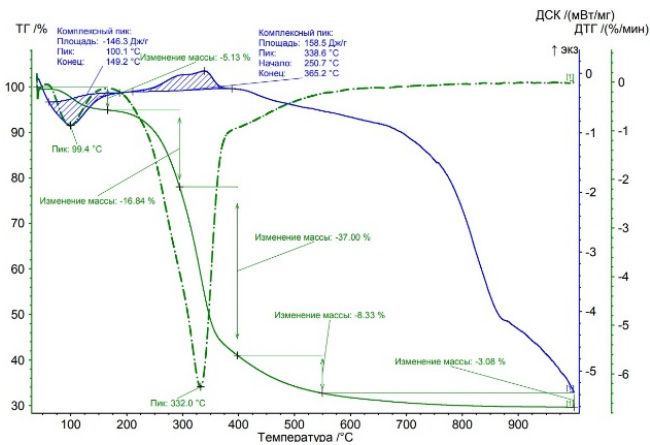
** leylik.sidorkina@mail.ru*

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ КОНВЕРСИИ БИОМАССЫ И ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

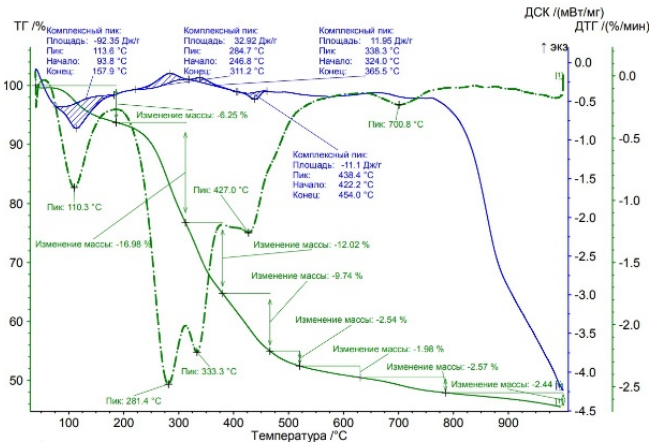
Различные отходы биомассы могут быть преобразованы в энергию или биотопливо с помощью биохимических и термохимических процессов, а также комбинированных технологий [1]. Цель данной работы – исследование термохимической конверсии растительной биомассы и органических отходов. Термическое разложение куриного помета (КП) и лузги подсолнечника (ЛП) изучали в инертной среде методом ТГ-анализа.

Термогравиметрический анализ (ТГА) образцов ЛП и КП проводили с использованием синхронного микротермического анализатора STA 449 A1 Jupiter (Netzsch, Selb, Германия). В ходе экспериментов исследовали процесс термохимической конверсии при скорости нагрева 10 °С/мин, аналогичной значениям температуры при проведении быстрого пиролиза в лабораторных условиях. Погрешность повторяемости эксперимента составила 1,5%. Были получены ТГ- и ДТГ-кривые, которые характеризуют потери массы и их скорость (рисунок).

В результате проведенных исследований определены характеристики растительной биомассы и органических отходов, которые соответствуют требованиям к сырью для переработки в аппаратах термохимической конверсии [2].



а



б

ТГ- и ДТГ-кривые конверсии образцов: а – ЛП; б – КП

Процесс термического разложения исследованных образцов биомассы и органических отходов при скорости нагрева 10 °C/мин состоит из стадий сушки, удаления летучих веществ и карбонизации твердого остатка. Большая часть газообразных продуктов выделялась из образцов в диапазоне температур 270-500 °C, что сопровождалось наибольшей потерей массы, эта стадия представляет

собой активный пиролиз. Максимальная скорость потери массы наблюдалась в середине температурного интервала 280-330 °С. Средняя величина остаточной массы для лузги подсолнечника составляла 29,6%, для куриного помета – 45,5%.

Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда № 25-29-00732, <https://rscf.ru/project/25-29-00732/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mignogna, D., Szabó M., Ceci, P., Avino, P.* Biomass Energy and Biofuels: Perspective, Potentials, and Challenges in the Energy Transition // Sustainability. – 2024, – Vol. 16, – P. 7036. <https://doi.org/10.3390/su16167036>

2. *Karaeva, J.V., Timofeeva, S.S., Islamova, S.I., Gerasimov, A.V.* Pyrolysis kinetics of new bioenergy feedstock from anaerobic digestate of agro-waste by thermogravimetric analysis // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2022. – Vol. 10. – № 3. – P. 107850. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107850>.

O.A. Sidorkina*, S.S. Timofeeva, J.V. Karaeva

Federal State Budgetary Institution of Science «Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences», 420111, Russian Federation, Tatarstan, Kazan, ul. Lobachevskogo, 2/31,

** leylik.sidorkina@mail.ru*

STUDY OF THERMOCHEMICAL CONVERSION OF BIOMASS AND ORGANIC WASTE

А.В. Смирнов^{1,2*}, А.В. Муслаев², И.М. Дергунов^{2,3}

*¹ Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет),
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9,
* artursmirnov1999@gmail.com*

*² ООО «Т1 Интеграция», 125167, г. Москва,
Ленинградский проспект, 36с41*

*³ Национальный исследовательский университет
«Московский энергетический институт»,
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14с1*

ИНЖЕНЕРНАЯ МОДЕЛЬ ПРИСТЕНОЧНОГО КИПЕНИЯ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ЯГОВА С ГОМОГЕННЫМ ОПИСАНИЕМ ДРЕЙФА ФАЗ ДЛЯ МУЛЬТИФИЗИЧЕСКИХ САЕ-РАСЧЕТОВ

Задача описания сопряженного теплообмена между твердым телом и жидкостью (газом) возникает во многих инженерных приложениях, таких как теплообменники, испарители и системы охлаждения. В случае, когда теплоноситель представляет собой однофазную инертную среду, моделирование теплообмена сводится к решению задачи теплопроводности на основе закона Фурье в сочетании со стандартными уравнениями гидродинамики. Данный подход получил значительное теоретическое и практическое развитие и позволяет с высокой точностью описывать однофазный теплообмен, в том числе в рамках большого числа существующих CFD-пакетов.

Однако в случаях, когда в системе реализуются условия, при которых теплоноситель претерпевает фазовые переходы, либо когда среда изначально является двухфазной смесью, конвективный перенос тепла и теплопроводность перестают быть определяющими механизмами теплообмена.

В частности, при перегреве контактирующей с жидкостью поверхности, когда разность температуры стенки твердого тела и температуры насыщения жидкости превышает $\Delta T_{н.к}$ [1], возникает процесс пристеночного кипения, сопровождающийся резким увеличением теплоотдачи за счет фазового перехода на стенке. При этом в образовавшейся в проточной области двухфазной среде перенос энергии осуществляется не за счет теплопроводности, а за счет дрейфа фаз относительно друг друга.

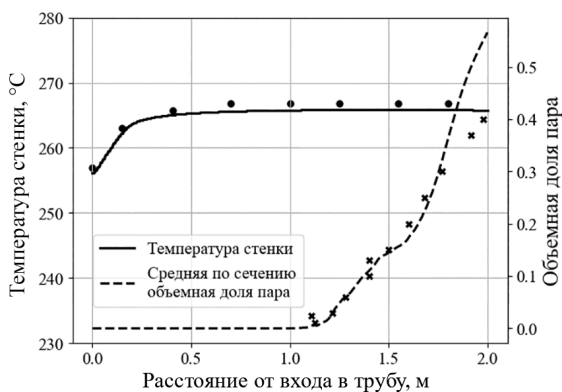
Основной метод моделирования пристеночного кипения, как правило, реализуют на основе гетерогенной модели (Ansys, Star-CCM+), в рамках которой решаются уравнения переноса объемных долей жидкости и пара совместно с условиями межфазного взаимодействия. В представляемой работе предлагается альтернативный подход на основе гомогенной модели, в которой предполагается, что жидкость и газ находятся в состоянии равновесия в каждой точке пространства. В данном подходе теплопроводность в жидкости описывается путем решения уравнения закона сохранения энергии в энтальпийной форме. При этом паросодержание в некоторой точке пространства является функцией энтальпии и давления. Для учета дрейфа фаз используется диффузионное приближение. Для этого в двухфазной области производится замена коэффициента молекулярно-турбулентной теплопроводности в уравнении энергии коэффициентом эффективной диффузии энтальпии, зависящим от объемной доли пара. Таким образом, дрейф фаз становится результатом переноса энтальпии.

Тепловой поток с поверхности за счет кипения рассчитывается в соответствии с моделью Ягова [1]:

$$q_b = 3,43 \cdot 10^{-4} \frac{\lambda^2 \Delta T^3}{\nu \sigma T_s} \left(1 + \frac{h_{LV}}{2R_i T_s^2} \right) \left(1 + \sqrt{1 + 800B} + 400B \right);$$

$$B = \frac{h_{LV} (\rho_V \nu)^{3/2}}{\sigma (\lambda T_s)^{1/2}}.$$

Модель была реализована на базе пакета CADFlo. Выполнено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными для широкого класса веществ, таких как вода, фреоны и жидкий азот, которое показало достаточную точность для инженерных приложений. В частности, на рисунке приведены численные аппроксимации средней объемной доли пара по сечению и температуры стенки вдоль оси трубы в эксперименте Бартоломеи [2]. В данном эксперименте недогретая до насыщения вода втекает в вертикальную трубу, нагреваемую тепловым источником электрического тока, с последующим вскипанием вблизи стенки.



Температура стенки трубы и распределение средней по сечению объемной доли пара в эксперименте Бартоломеи [2]:

$$P = 45 \text{ атм}, q = 0,57 \text{ МВт/м}^2, G = 900 \text{ кг/(м}^2 \times \text{с)}, T_{in} = 257 \text{ }^\circ\text{C}$$

Несмотря на физические упрощения, связанные с использованием гомогенной модели и диффузионного приближения дрейфа фаз, приведенный метод показал хорошие результаты при моделировании пристеночного кипения. При этом его основное преимущество заключается в значительно более высокой скорости расчёта по сравнению с моделями на основе гетерогенного подхода, что является ключевым условием в инженерных приложениях, где тре-

буется моделирование технических устройств со сложной геометрией. По этой причине высокая скорость расчета и простота модели делают ее перспективной для реализации во многодисциплинарных инженерных CAE-системах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лабунцов, Д.А.* Механика двухфазных систем // Д.А. Лабунцов, В.В. Ягов. – Москва: Изд-во МЭИ, 2000.
2. *Bartolomei, G.G. et al.* An experimental investigation of true volumetric vapor content with subcooled boiling in tubes // *Thermal Engineering*. – 1982. – Vol. 29. – № 3. – Pp. 132-135.

ENGINEERING MODEL OF WALL BOILING BASED ON THE YAGOV MODEL WITH A HOMOGENEOUS DESCRIPTION OF PHASE TRANSFER FOR MULTIPHYSICS CAE SIMULATIONS

A.V. Smirnov^{1,2*}, A.V. Muslaev², I.M. Dergunov^{2,3}

*¹ Moscow Institute of Physics and Technology,
141701, Russian Federation, Dolgoprudny, Institutsky al., 9*

** artursmirnov1999@gmail.com*

*² TI Integration, 125167, Russian Federation, Moscow,
Leningradsky av., 36 b 41*

*³ Moscow Power Engineering Institute,
111250, Krasnokazarmennaya st., 14 b 1*

Р.И. Соловьев^{1,2*}, Е.А. Марфин^{1,2}

¹ Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН», 420111, Казань, ул. Лобачевского, 2/31, а/я 261,

** roman.solovev.99@inbox.ru*

*² Институт энергетики и перспективных технологий
ФИЦ КазНЦ РАН*

*³ Институт физики казанского федерального университета,
420111, Казань, ул. Кремлевская, 16А*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СВОЙСТВА НЕФТИ В ЗАДАЧАХ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ДОБЫЧИ

Традиционные методы интенсификации добычи нефти в низкопроницаемых коллекторах часто малоэффективны и неэкологичны. Акустическое воздействие является перспективным физическим методом, однако механизм его влияния на фильтрацию, в частности – изменение физико-химических свойств самой нефти, остается дискуссионным [1, 2]. Целью данной работы является количественная оценка изменения вязкости и межфазного натяжения образцов нефти при воздействии звука заданной частоты и интенсивности.

В ходе работы были проведены эксперименты по измерению вязкости и поверхностного натяжения образцов нефти до, при и после акустического воздействия. Измерение вязкости проведено при помощи вибрационного вискозиметра SV-10. Получаемые температурные зависимости вязкости позволяют оценить не только факт изменения вязкости нефти, но и оценить структурные преобразования посредством изменения энергии активации вязкого течения.

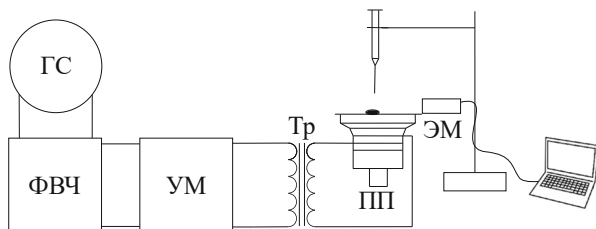
Для измерения поверхностного натяжения использовались метод падающей капли и метод ADSA, основанный на анализе

формы осесимметричной капли, лежащей на плоской поверхности. Для этого в разработанной экспериментальной установке (рисунок) были использованы закрепленные на штативе шприц с иглой для формирования капель, цифровой электронный микроскоп (ЭМ) для фиксации фото- и видеоизображений и программное обеспечение с применением модифицированного порогового метода обработки изображений и подбором теоретической формы капли к экспериментальному профилю [3] по уравнению Лапласа, записанному в общем виде:

$$\Delta p = \alpha \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

где Δp – разность давлений; α – коэффициент поверхностного натяжения; R_1 и R_2 – радиусы кривизны лежащей капли [4].

Акустическое воздействие на образцы нефти осуществлялось с помощью пьезопреобразователя (ПП), подключенного к широкополосному усилителю мощности УМ (100 Гц-100 кГц) через повышающий трансформатор Тр и закрепленного на платформе.



Экспериментальная установка для измерения поверхностного натяжения лежащих капель нефти

Проведенные эксперименты показали, что акустическое воздействие способно снижать вязкость (до 30%) и поверхностное натяжение нефти. Полученные данные могут быть использованы для улучшения добычи нефти влиянием акустического поля, что способствует снижению действия сил поверхностного натяжения и

внутреннего сопротивления, а также – вовлечению остатков нефти в фильтрацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Luo, X., Gong, H., He, Z., Zhang, P., He, L. Recent advances in applications of power ultrasound for petroleum industry // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2021. – Vol. 70. – P. 105337.

2. Марфин, Е.А. Эффекты ультразвукового воздействия на высоковязкую нефть // ТРУДЫ МФТИ. – 2025. – Т. 17. – № 1(65). – С. 161–172.

3. Favier, B., Chamakos, N.T., Papathanasiou, A.G. A precise goniometer/tensiometer using a low cost single-board computer // *Measurement Science and Technology*. – 2017. – Vol. 28. – № 12. – P. 125302.

4. Директор, Л.Б., Зайченко, В.М., Майков, И.Л. Усовершенствованный метод лежащей капли для определения поверхностного натяжения жидкостей // ТВТ. – 2010. – Т. 48. – № 2. – С. 193–197.

R.I. Solovyev^{1,2*}, E.A. Marfin^{1,2}

¹ *Federal State Budgetary Institution of Science «Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences», 420111, Russian Federation, Tatarstan, Kazan, ul. Lobachevskogo, 2/31*

² *Institute of Energy and Advanced Technologies of the Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences*

* roman.solovev.99@inbox.ru

³ *Institute of Physics of Kazan Federal University, 420111, Russian Federation, Tatarstan, Kazan, Kremlevskaya str, 16A*

**STUDY OF THE INFLUENCE OF ACOUSTIC EFFECT
ON OIL PROPERTIES IN PRODUCTION
INTENSIFICATION PROBLEMS**

С.В. Сыродой*, **Ж.А. Солодовникова**, **Р.Р. Замалтдинов**

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30,

**ssyrodoy@yandex.ru*

СОВМЕСТНОЕ ДРОБЛЕНИЕ КАПЕЛЬ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Активное внедрение нетрадиционных (солнечные и ветровые) источников показало несостоятельность подобных мер по полноценному замещению ископаемого топлива [1]. Соответственно, дальнейшее развитие энергетики будет сводиться ко все большему использованию угля, которой при этом считается достаточно антропогенным энергоносителем. Это создает предпосылки для создания новых экологически «чистых» технологий топливосжигания, например таких, как технология водоугольного топлива (ВУТ). Последнее является достаточно перспективным за счет секвестирования [2] оксидов серы и азота, которые являются основной проблемой при сжигании твердых топлив. Но применение подобного топлива сопряжено со следующими трудностями – при распылении ВУТ образуются капли с характерными размерами 3,5 – 5 мм. Капли ВУТ с таким размером зажигаются значительно дольше [3] (время зажигания $t_{ign} \approx 10 - 15$ с). Форсуночные технологии, позволяющие получить поток капель с размерами до 100 – 200 мкм, на настоящее время существуют только в виде опытных установок вследствие значительного эрозийного износа соплового канала. В этих условиях необходимо разрабатывать новые технологии дробления капель водоугольного топлива в потоке воздуха. Но для этого необходима апостериорная информация о процессах совместного дробления капель ВУТ при движении по схеме «одна за другой». Цель исследования – установление влияния аэродинами-

ческого следа одной капли ВУТ на процесс разрушения второй капли водоугольного топлива. Экспериментальные исследования проведены на экспериментальном стенде, схема которого подробно описана в работе [4].

На рисунке приведено распределение числа Вебера капель ВУТ, движущихся в аэродинамическом следе предыдущей капли при варьировании начального расстояния между каплями. Можно отметить, что совместное дробление существенно отличается от процессов дробления одиночной капли ВУТ. При малых начальных расстояниях между каплями процесс дробления капли ВУТ, движущейся в аэродинамическом следе другой, значительно затягивается по сравнению с дроблением одиночной капли [4]. Последнее обусловлено тем, что в этих условиях на каплю действует не ламинарный поток, а значительно турбулизированный, вследствие возмущения, которое создает первая капля (рисунок). В результате критический перепад давлений между надветренной и подветренной частями капли возникает со значительной задержкой.

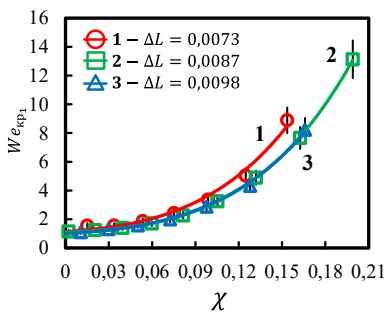


Схема движения капель и зависимость критического числа Вебера

первой капли ($We_{кр1}$) от пройденного пути $\chi = \frac{x}{L}$:

1 - $\Delta L = 0,0073$; 2 - $\Delta L = 0,0087$; 3 - $\Delta L = 0,0098$

Работа поддержана Российским Научным Фондом грант № 23-79-10092.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ukoba, K., Medupin, R.O., Yoro, K.O., Eterigho-Ikelegbe, O., Jen, T.-C.* Role of the fourth industrial revolution in attaining universal energy access and net-zero objectives // *Energy*. – 2024. – Vol. 360. Art. 100002. DOI: 10.1016/j.energy.2024.100002.

2. *Syrodoy, S.V., Kuznetsov, G.V., Gutareva, N.Y., Salomatov, V.V.* The efficiency of heat transfer through the ash deposits on the heat exchange surfaces by burning coal and coal-water fuels // *Journal of the Energy Institute*. – 2018. – Vol. 91. – № 6. – Pp. 1091–1101. DOI: 10.1016/j.joei.2017.06.014.

3. *Dorokhov, V., Vershinina, K., Kartashova, K., Kovtunets, I., Strizhak, P.* Energy and environmental characteristics of coal and biocomponents co-combustion // *Energy*. – 2025. – Vol. – 340. 139359. DOI: 10.1016/j.energy.2024.139359.

4. *Kuznetsov, G.V., Syrodoy, S.V., Zamaltdinov, R.R., Kostoreva, Zh.A., Borisov, B.V., Nigay, N.A., Gutareva, N.Yu., Tamashevich, M.S.* Influence of the velocity gradient of the carrier medium on the crushing characteristics of non-Newtonian liquid droplets on the example of a highly concentrated coal-water suspension // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2026. – Vol. 171. – P. 111598. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2025.111598.

S.V. Syrodoy*, Zh.A. Solodovnikova, R.R. Zamaltdinov

*National Research Tomsk Polytechnic University,
634050, Tomsk, 30 Lenin Avenue*

**ssyrodoy@yandex.ru*

**CO-BREAKUP OF INTERACTING COAL-WATER
FUEL DROPLETS**

Д.С. Трегуб¹, А.А. Бахарев^{1,2}, И.А. Мельников¹*

*¹ НИЦ «Курчатовский институт»,
123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1А,
* danieltregub@gmail.com*

*² Национальный исследовательский университет
«Московский энергетический институт»,
111250, Москва, ул. Красноказарменная, 14*

О РАСЧЕТЕ ТЕПЛОТДАЧИ В ОКСИДНОМ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕМ СЛОЕ

В ходе тяжелой аварии в реакторной установке возможно плавление активной зоны с дальнейшим формированием ванны расплава. Для управления аварией существуют две стратегии удержания расплава: внутрикорпусное удержание (IVR) и удержание в устройстве локализации расплава (УЛР). Конфигурация ванны расплава будет отличаться в зависимости от подхода к управлению аварией. Зачастую после стратификации расплава в рамках стратегии IVR формируется двухслойная конфигурация с оксидным тепловыделяющим слоем снизу и металлическим слоем сверху. В случае же стратегии с удержанием в УЛР за счет взаимодействия с жертвенным материалом (ЖМ) оксидный слой перемещается наверх, а металлический вниз. Для анализа эффективности подобных стратегий необходимо знать теплоотдачу от расплава на стенки корпуса/УЛР.

Подобные экспериментальные исследования интенсивно проводятся с 1990-х годов [1-2] и продолжают по сей день. Число экспериментальных данных растет, однако общий подход к расчету теплоотдачи до сих пор не разработан, а имеющиеся расчетные формулы теряют актуальность. Возникает необходимость уточнения существующих соотношений.

В данной работе проанализированы имеющиеся экспериментальные данные по исследованию свободной конвекции в тепловыделяющей жидкости и на основе проделанного анализа предложены соотношения для расчета теплоотдачи. В рамках стратегии ВКУ для расчета теплоотдачи на боковую поверхность лучшее совпадение наблюдается при использовании соотношения, предложенного Л.И.Зайчиком [3], для теплоотдачи вверх актуальным до сих пор остается соотношение BALI 2D [1]. В рамках подхода с УЛР имеющиеся экспериментальные данные с хорошей точностью описываются соотношением Маингера [4], а теплоотдача в сторону в тепловыделяющей жидкости ограничивается одним экспериментом и соответственно одним соотношением [5].

Исходя из проделанной работы, представим предложенную методику в виде таблицы.

**Соотношения для расчета теплоотдачи в оксидном слое
при удержании расплава**

Стратегия	Теплоотдача вверх	Теплоотдача вниз/в сторону
IVR	$\overline{Nu}_{up} = 0,383Ra_i^{0,233}$ [1]	$\overline{Nu}_{dn} = BRa_q^{\frac{1}{4}}$ [3]
УЛР	$\overline{Nu}_{up} = 0,345Ra_i^{0,233}$ [4]	$\overline{Nu}_{sd} = 0,85Ra_i^{0,19}$ [5]

Представленные соотношения могут быть внедрены в тяжеловарийные расчетные коды, что приведет к повышению точности получаемых результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Theofanous, T.G., Liu, C.*, in Proc. American Nucl. Soc. National Heat Transfer Conf. (Portland, Oregon, 1995). – P. 349.
2. Расплав. Удержание расплавленных материалов активной зоны водоохлаждаемых реакторов: проекты Агентства по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития (OECD NEA) RASPLAV и MASCA (1994 – 2006) / Под ред.

В.Г. Асмолова, А.Ю. Румянцева, В.Ф. Стрижова. – Москва: Концерн Росэнергоатом, 2018. – 576 с. (OECD NEA)

3. *Зайчик, Л.И.* Турбулентная свободная конвекция на наклонной поверхности при больших числах Рэлея // Л.И. Зайчик, В.М. Алипченков. *ТВТ*, **38:3** (2000). – С. 445–451.

4. *Большов, Л.Н., Кондратенко, П.С., Стрижов В.Ф.* Свободная конвекция тепловыделяющей жидкости // УФН 171 1051-1070 (2001).

5. *Steinberner, U., Reineke, H.H.*, Turbulent buoyancy convection heat transfer with internal heat sources // In: Proc. 6th Int. Heat Transfer Conf., Toronto, 1978. – Pp. 305-310.

D.S. Tregub¹*, A.A. Bakharev^{1,2}, I.A. Melnikov¹

¹ National Research Center "Kurchatov Institute", 1, Akademika Kurchatova Sq, 123182, Moscow, Russia,

** danieltregub@gmail.com*

² National Research University "Moscow Power Engineering Institute", 14, Krasnokazarmennaya St, 111250, Moscow, Russia

ABOUT THE CALCULATION OF HEAT TRANSFER IN HEAT-GENERATING OXIDE MELT

***Р.И. Халилов^{1*}, П.Г. Фрик¹, И.В. Колесниченко¹,
А.Д. Мамыкин¹, В.А. Балашов²***

*¹ Институт механики сплошных сред Уральского отделения
Российской академии наук» – филиал Федерального
государственного бюджетного учреждения науки
Пермского федерального исследовательского центра
Уральского отделения Российской академии наук,
614013, Пермский край, г. Пермь, ул. Академика Королёва, 1*

** khalilov@icmm.ru*

*² Общество с ограниченной ответственностью
«Научно-испытательный центр механики сплошных сред»,
108809, Москва, вн.тер.г. поселение Марушкинское,
д. Марушкино, ул. Речная, 12*

НАТРИЕВЫЙ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ

Развитие реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (БН-600, БН-800, БН-1200, МБИР) требует создания и всесторонних испытаний оборудования, работающего в экстремальных условиях. Жидкий натрий, являясь химически активным и высокотемпературным теплоносителем, предъявляет особые требования как к конструкции оборудования, так и к методам контроля его параметров. Достоверность результатов испытаний напрямую зависит от применяемых методов и средств измерений.

В ИМСС УрО РАН функционирует уникальный натриевый испытательный стенд (НИС), предназначенный для тестирования электромагнитных насосов и другого оборудования. Основная метрологическая задача при проведении испытаний – определение за-

висимости развиваемого напора от расхода перекачиваемой среды (расходно-напорной характеристики) в рабочем диапазоне температур. Для этого требуется одновременная фиксация трех ключевых параметров: объемного расхода жидкого натрия, перепада давления на испытываемом оборудовании и температуры теплоносителя.

Измерения проводятся в диапазоне температур от 150 до 450°C и давлений до 0,9 МПа. Для обеспечения требуемой точности и перекрытия всего рабочего диапазона расходов применяется комбинированная схема измерений. В качестве первичного преобразователя расхода используется электромагнитный расходомер ПКР-7 собственной разработки (верхний предел 35 м³/ч, пределы допускаемой относительной погрешности ±1,13 %). Для измерений в области повышенных расходов (до 210 м³/ч) задействован кориолисовый расходомер ЭЛМЕТРО-Фломак (класс точности 0,5). Давление в контрольных сечениях контура измеряется четырьмя датчиками МИДА-ДИ-12П с верхним пределом 1,0 МПа и основной погрешностью ±0,5 %. Контроль температуры осуществляется с помощью шести термоэлектрических преобразователей ТХА(К). Все применяемые средства измерений, кроме расходомера ПКР-7, имеют утвержденные типы и проходят регулярную поверку. Расходомер ПКР-7 имеет аттестованную методику калибровки.

Сигналы от датчиков поступают на модули аналогового ввода программируемого логического контроллера (ПЛК) «ОВЕН», где производится их первичная обработка, фильтрация и масштабирование. Цифровые значения параметров выводятся на сенсорную панель оператора и синхронно записываются в энергонезависимый архив, что позволяет регистрировать динамику изменения параметров во время испытаний и формировать протоколы. Разработанная система сбора данных обеспечивает высокую дискретиза-

цию сигналов, необходимую для анализа работы оборудования в переходных режимах, включая стопорные режимы работы насосов.

Для подтверждения достоверности результатов была проведена оценка погрешностей измерений. Суммарная относительная погрешность измерения расхода в рабочем диапазоне не превышает $\pm 1,13$ %, давления – $\pm 2,5$ %, температуры – $\pm 2,5$ % (при доверительной вероятности $P = 0,95$). В 2023 году испытательная лаборатория, в состав которой входит НИС, успешно прошла аккредитацию Госкорпорации «Росатом», что подтверждает ее соответствие самым высоким отраслевым стандартам.

Применяемые на натриевом испытательном стенде методы и средства измерений в совокупности с современной системой сбора и обработки данных позволяют получать достоверные и точные результаты, необходимые для сертификации ответственного оборудования атомной промышленности. Опыт эксплуатации стенда подтверждает работоспособность принятых технических решений и их пригодность для решения широкого круга научных и прикладных задач в области гидродинамики жидких металлов.

***R.I. Khalilov^{1*}, P.G. Frick¹, I.V. Kolesnichenko¹,
A.D. Mamykin¹, V.A. Balashov²***

¹ Institute of Continuous Media Mechanics Ural Branch Russian Academy of Sciences, 614013, Russia, Perm, Akademika Koroleva st, 1

** khalilov@icmm.ru*

*² Scientific Testing Center of Continuous Media Mechanics LLC,
12 Rechnaya St., Marushkino, Moscow, 108809, Russia*

SODIUM TEST LOOP: MEASUREMENT TECHNIQUE AND UNCERTAINTY EVALUATION

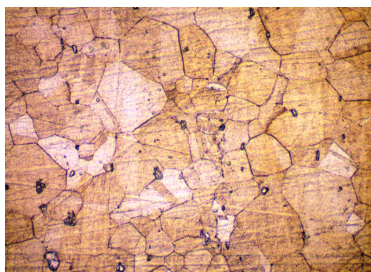
*Р.М. Хамидуллин**

Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН», 420111, Казань, ул. Лобачевского, 2/31, а/я 261,

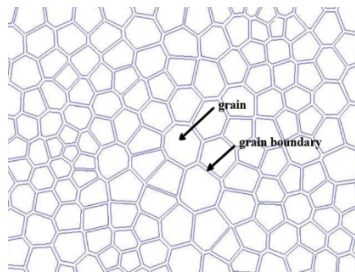
** ruslankhamidullin94@mail.ru*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОМИНИРУЮЩИХ МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ХН73М В ТЕРМИНАХ ФАЗОВЫХ ПОЛЕЙ

В работе проведено численное моделирование процессов инициализации и развития трещин в компактных образцах из никелевого жаропрочного сплава ХН73М с использованием метода фазовых полей разрушения. Микроструктура материала характеризуется морфологической неоднородностью и состоит из крупных зерен неправильной формы, разделенных выраженными межзеренными границами (рис. 1, *а*). Двумерная структурная аппроксимация никелевого сплава ХН73М была реализована в программно-вычислительном комплексе ANSYS с помощью метода мозаики Вороного (рис. 1, *б*). Данный метод позволяет генерировать зерна с варьируемыми размерами для упрощенного представления реальной микроструктуры.



а



б

Рис. 1. Микроструктура материала: *а* – структура никелевого сплава ХН73М; *б* – двумерная аппроксимация, полученная с помощью мозаики Вороного

Фрактографический анализ морфологии поверхностей разрушенных образцов в результате испытаний на изотермическую усталость и взаимодействие усталости и ползучести показал, что при комнатной температуре 20°C в рассматриваемом материале независимо от типа механического нагружения преобладает транскристаллитный механизм разрушения (рис. 2, *а*). При увеличении температуры до 400°C проявляется смешанный характер разрушения, наблюдается прогрессирующая трансформация механизма разрушения от транскристаллитного к межкристаллитному (рис. 2, *б*). При повышении температуры до 650°C доминирующим становится межкристаллитный характер разрушения (рис. 2, *в*).

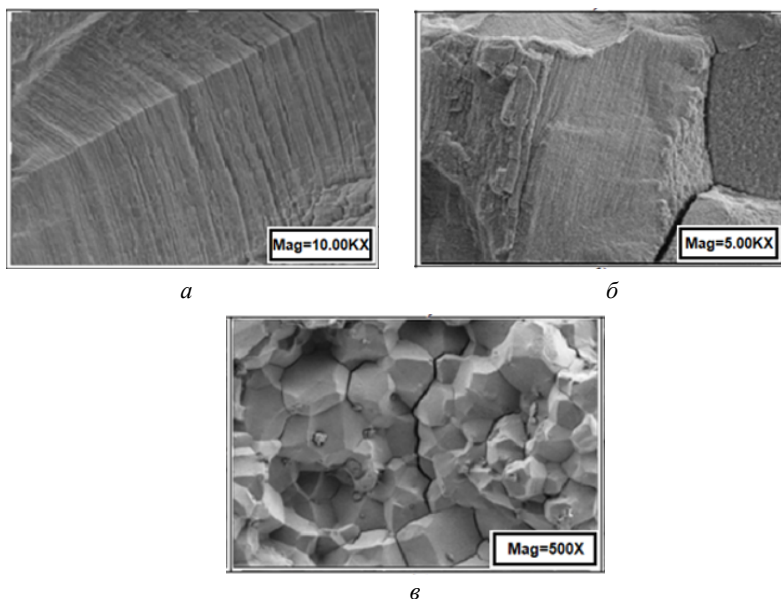


Рис. 2. Морфология поверхностей разрушения при температуре:
а – 20°C; *б* – 400°C; *в* – 650°C

В связи с этим в данной работе численное моделирование кинетики роста трещин в рамках метода фазовых полей разруше-

ния выполнено для указанных трех температурных режимов. При моделировании этих механизмов разрушения для тел зерен и межзеренных границ параметры, характеризующие механические характеристики материала, а также масштаб фазового поля, в рамках континуальных моделей приняты идентичными. Различие в поведении материала при моделировании доминирующих механизмов разрушения определяется преимущественно энергией, необходимой для распространения трещины в рамках модели фазовых полей разрушения.

На основе экспериментальных результатов дано описание зависимости критических значений скоростей высвобождения энергии от температуры для зерен и межзеренных границ в никелевого сплаве. По результатам численных исследований проведен сравнительный анализ кинетики роста трещин при монотонном статическом и циклическом нагружениях. Установлено, что в идентичных условиях по температуре при статическом нагружении наблюдается множественное ветвление трещин (рис. 3, *а*), в то же время при циклическом нагружении процесс разрушения характеризуется доминированием основной трещины с криволинейной траекторией (рис. 3, *б*).

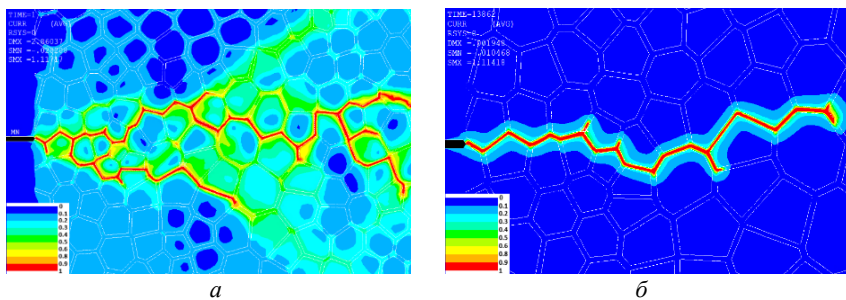


Рис. 3. Кинетика роста трещин при нагружении: *а* – монотонном; *б* – циклическом

Согласно теории фазовых полей разрушения, эволюция повреждений описывается как кумулятивный процесс последователь-

ного приращения длины трещины, обусловленного локализованным разрушением отдельных конечных элементов при достижении критического состояния в компонентах кристаллической структуры материала. Для количественной оценки энергетических затрат на формирование процессов разрушения проведен сравнительный анализ величин полной потенциальной энергии и ее составляющих в зависимости от параметра накопления повреждений φ .

Полученные результаты имеют практическую ценность для прогнозирования остаточной долговечности и оценки предельных состояний высоконагруженных конструктивных элементов, эксплуатирующихся в условиях сложного термомеханического нагружения. Особую важность представляет разработанная методика параметризации модели, учитывающая температурную зависимость критической скорости высвобождения энергии для тела зерна и межзеренных границ, что позволяет адекватно описывать микроструктурные процессы разрушения.

R.M. Khamidullin*

Federal State Budgetary Institution of Science «Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences», 420111, Russian Federation, Tatarstan, Kazan, ul. Lobachevskogo, 2/31,

** ruslankhamidullin94@mail.ru*

**MODELING OF THE DOMINANT FRACTURE
MECHANISMS OF THE XH73M NICKEL ALLOY
IN TERMS OF PHASE FIELDS**

Д.А. Чижиков^{1*}, Р.Ф. Рахимов², Е.А. Белавина^{1,2}

¹ *Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111116, Москва, Красноказарменная, 17,*

** ChizhikovDA@mpei.ru*

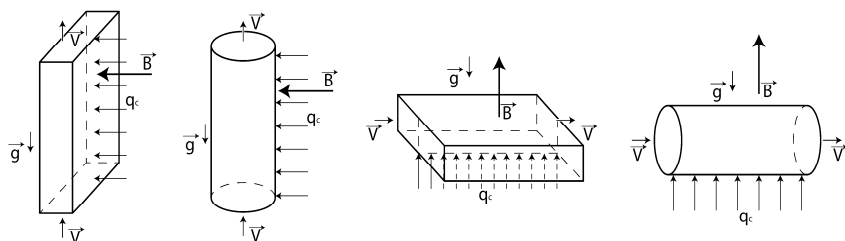
² *Объединенный институт высоких температур РАН,
125412, Москва, Ижорская, 13с2*

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МГД-ТЕЧЕНИЯ ЩЕЛОЧНОГО РАСТВОРА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

При проектировании охлаждающей системы термоядерной установки большинство работ склоняется к технологии с жидкими металлами, теплофизические свойства которых превосходят классический теплоноситель – воду [1]. Но в силу высокой электропроводности таких теплоносителей в теплообменном оборудовании под воздействием сильных магнитных полей возникают значительные перепады давления. Одним из вариантов решения данной проблемы является применение расплавов фторидных солей щелочных и редкоземельных металлов, таких как «флайб» (FLiBe) и «флинак» (FLiNaK). Однако лабораторное экспериментальное исследование процессов течения данных солей затрудняется их высокими температурами плавления (460-650 °C) и требованиями к используемым конструкционным материалам из-за высокой коррозионной активности теплоносителя, поэтому авторы работы [2] в качестве альтернативного подхода по изучению магнитной гидродинамики рассматривали модельный теплоноситель – водный раствор гидроксида калия.

Данная работа посвящена численному моделированию турбулентного течения модельного теплоносителя в поперечном магнитном поле. Рассматривалась смешанная конвекция ($Ri \approx 1$) при

горизонтальном и подъемном течениях имитатора расплава соли в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = 7000 - 15000$ в прямоугольном канале (100x40 мм, длиной 1 м и толщиной стенки 2 мм) и трубе (52 мм, длиной 1 м и толщиной стенки 1 мм) в присутствии поперечного магнитного поля ($Ha = 11$). В качестве модельного теплоносителя был выбран 20%-ный водный раствор КОН, свойства которого брались из работы [3], проводимость раствора из статьи [4]. Для каждой из задач рассматривались изотермическая конфигурация и конфигурация с обогревом. Для прямоугольного канала был выбран нагрев одной стенки для увеличения градиента температур в сечениях. На рисунке показаны конфигурации течения для прямоугольного канала и трубы.



Конфигурации течения

Моделирование производилось в программных пакетах Comsol Multiphysics 5.6 и OpenFOAM для сравнения результатов, полученных разными методами расчета (метод конечных элементов и метод контрольных объемов соответственно).

В результате моделирования были построены поля скорости и температуры, получены коэффициенты гидравлического сопротивления, распределение КТО по длине, произведено сравнение результатов разных CFD-кодов.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание № 075-00270-26-00).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поддубный, И.И., Пятницкая, Н.Ю., Разуванов, Н.Г., Свиридов, В.Г., Свиридов, Е.В., Лешуков, А.Ю., Алесковский, К.В., Обухов, Д.М. Исследования режимов теплообмена при течении жидкого металла в условиях термоядерного реактора // ВАНТ Термоядерный синтез. – Вып. 3. – 2015.

2. Белавина, Е.А., Беляев, И.А., Пятницкая, Н.Ю. Исследование теплогидравлики имитатора расплава соли при течении в канале в условиях неоднородного обогрева // ВАНТ Ядерно-реакторные константы. – Вып. 4. – 2021. – С. 82-97.

3. Бобылев, В.Н. Физические свойства наиболее известных химических веществ: справочное пособие / В.Н. Бобылев. – Москва: Издательский центр РХТУ им. Менделеева, 2003.

4. Gilliam, R.J. et al. A review of specific conductivities of potassium hydroxide solutions for various concentrations and temperatures // International Journal of Hydrogen Energy. – 2007. – Vol. 32. – № 3. – Pp. 359–364.

D.A. Chizhikov¹*, R.F. Rakhimov², E.A. Belavina^{1,2}

*¹ National research university «MPEI», 111116, Russian Federation
Moscow, Krasnokazarmennaya St., 17*

** ChizhikovDA@mpei.ru*

*² Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy
of Sciences, 125412, Russian Federation Moscow, Izhorskaya St., 13s2*

**NUMERICAL SIMULATION OF THE MHD-FLOW
OF AN ALKALINE SOLUTION IN A MAGNETIC FIELD**

*А.В. Чукалин**

*Ульяновский государственный технический университет,
432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32*

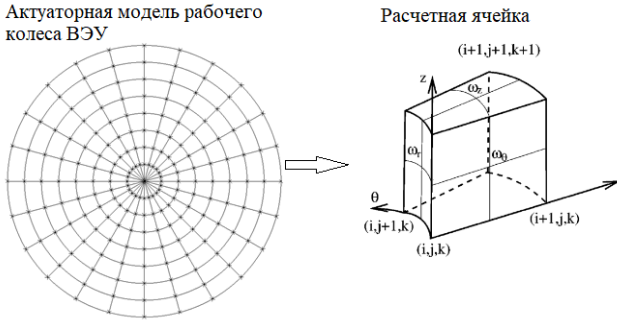
** chukalin.andrej@mail.ru*

МИНИМАЛЬНО-ПАРАМЕТРИЗОВАННАЯ АКТУАТОРНО-ДИСКОВАЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Полногеометрическое моделирование ветроэнергетических установок с явным разрешением геометрии лопастей требует чрезвычайно высоких вычислительных ресурсов. В связи с этим в задачах численного моделирования ветропарков широко применяются актуаторные модели, позволяющие параметризовать воздействие ветроэнергетических установок на поток без явного воспроизведения геометрии ротора. Наиболее распространенными подходами являются актуаторно-дисковая модель (Actuator Disk Model, ADM) и актуаторно-линейная модель (Actuator Line Model, ALM) [1,2]. Однако использование актуаторных моделей может быть связано с рядом ограничений. В частности, известные реализации ADM и ALM требуют детального задания геометрических и аэродинамических характеристик лопастей, включая распределение хорды, угла установки и аэродинамических коэффициентов профиля [3]. Кроме того, в ряде исследований показано, что актуаторные модели могут недостаточно точно воспроизводить структуру турбулентного следа и развитие вихревых структур за ротором [4].

Предложена минимально-параметризованная актуаторно-дисковая вычислительная модель ветроэнергетической установки (рисунок), основанная на использовании ограниченного набора интегральных параметров (номинальной мощности, диаметра ротора и зависимости коэффициента мощности C_p от скорости ветра)

и обеспечивающая вычислительно эффективное и устойчивое описание воздействия установки на поток в многомасштабных задачах атмосферного пограничного слоя.



Область приложения сил в актуаторной модели

Аэродинамическое воздействие ротора представлена как сумма сил создаваемых актуаторной моделью ветроэнергетической установки F_i^T , добавляемого к уравнению импульса:

$$F_i^T = F_{r,cell}^T + F_{z,cell}^T + F_{\theta,cell}^T, \quad (1)$$

где $F_{r,cell}^T$, $F_{z,cell}^T$, $F_{\theta,cell}^T$ – проекции радиальной, осевой и тангенциальной составляющих силы, действующих в каждой ячейке расчетной области актуаторного диска.

В соответствии с принятой постановкой задачи проекции силового воздействия записываются в следующем виде:

$$F_{r,cell}^T = 0; F_{z,cell}^T = f_{z,i} \frac{x_{cell} V_{cell}}{\sum_{cell} x_{cell} V_{cell}}; F_{\theta,cell}^T = f_{\theta,i} \frac{x_{cell} V_{cell}}{\sum_{cell} x_{cell} V_{cell}}, \quad (2)$$

где x_{cell} – регуляризованное значение ячейки в области актуаторного диска; V_{cell} – объем расчетной ячейки, принадлежащей области проекции актуаторного диска; $f_{z,i}$ – локальная осевая и $f_{\theta,i}$ тан-

генциальная сила, действующая на каждой узловой точке расчетной ячейки актуаторного диска.

В отличие от традиционных актуаторных моделей, требующих детального задания аэродинамических характеристик лопастей, предлагаемая модель использует аналитическую параметризацию источников импульса и энергии, согласованную с интегральными характеристиками ветроэнергетической установки. Это позволяет применять ее в задачах атмосферного масштаба при ограниченной доступности данных о геометрии и аэродинамике лопастей.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-79-00146, <https://rscf.ru/project/25-79-00146>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sørensen, J.N., Shen, W.Z.* Numerical modelling of wind turbine wakes. *Journal of Fluids Engineering*. – 2002. – Vol. 124 (2). – Pp. 393–399.

2. *Troldborg, N.* Actuator Line Modeling of Wind Turbine Wakes \ N. Troldborg. – PhD thesis, Technical University of Denmark, Department of Mechanical Engineering, Lyngby, Denmark, 2008. – 142 p.

3. *Navarro Diaz, G.P., Otero, A.D., Asmuth, H., Sørensen, J.N., Ivanell, S.* Actuator line model using simplified force calculation methods // *Wind Energy Science*. 2023. – Vol. 8. – № 3. – Pp. 363–382. DOI: <https://doi.org/10.5194/wes-8-363-2023>.

4. *Revaz, T., Porté-Agel, F.* Large-eddy simulation of wind turbine flows using actuator models / T. Revaz, F. Porté-Agel. – *Energies*, 2021.

A.V. Chukalin*

*Ulyanovsk State Technical University,
432027, Russian Federation, Ulyanovsk, Severny Venets St., 32,*

** chukalin.andrej@mail.ru*

A MINIMALLY PARAMETERIZED ACTUATOR DISK MODEL OF A WIND TURBINE

*Е.С. Чура, К.М. Моисеева**

*Томский государственный университет,
634050, Томск, пр. Ленина, 36*

** moiseeva_km@t-sk.ru*

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ВОДОРОДО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В УЗКОМ КАНАЛЕ

В докладе представлены результаты численного исследования горения водородо-воздушной смеси в узком канале. Вопросы горения водородо-воздушных смесей являются актуальными и представляют интерес для разработчиков новых видов камер сгорания. В частности, исследования горения водородных смесей выполнены в работах [1 – 2]. В настоящей работе представлены результаты собственных исследований, основанных на предыдущих работах [3, 4].

Постановка задачи основана на физико-математических моделях [3, 4] и учитывает процессы теплопереноса и химического реагирования в реакционноспособной смеси. Очаг воспламенения расположен в области $0 \leq x \leq x_0$; $0 \leq r \leq r_0$. В области очага задается повышенная температура газа при атмосферном давлении. Коэффициенты диффузии и теплопроводности зависят от температуры. Газовая постоянная определяется составом смеси. Уравнения физико-математической модели записываются в цилиндрической системе координат в консервативной форме. Метод решения задачи описан в [5]. Слагаемые в правых частях уравнений, описывающие процессы переноса за счет теплопроводности и диффузии, аппроксимировались явно на трехточечном шаблоне. Шаг по пространству вдоль осевого и радиального направлений задавался постоян-

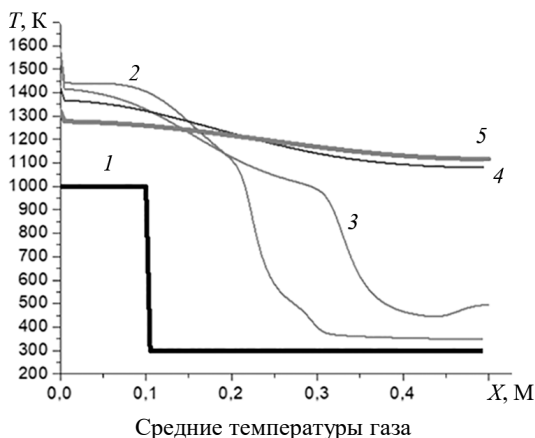
ным и равным $\Delta h_x = \Delta h_r = 4 \cdot 10^{-5}$ м. Шаг по времени определялся из условия устойчивости Куранта –Фридрихса – Леви:

$$\frac{1}{\Delta t} < \frac{1}{\Delta t_x} + \frac{1}{\Delta t_r},$$

где $\Delta t_x = \frac{h_x}{\max[|u_g| + c_g]}$; $\Delta t_r = \frac{h_r}{\max[|v_g| + c_g]}$; c_g – скорость звука в

газе; u_g – осевая составляющая скорости газа; v_g – радиальная составляющая скорости газа. Из расчета определялась форма пламени водородо-воздушной смеси и средняя скорость горения газа по сечению канала.

На рисунке показан пример получаемого результата расчета и распределения осредненной по ширине канала температуры газа в зависимости от координаты по длине канала в последовательные моменты времени.



Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда 25-21-00663.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shen, X., He, X, Sun, J.* A comparative study on premixed hydrogen–air and propane–air flame propagations with tulip distortion in a closed duct // *Fuel*. 2015. – Vol. 161. – Pp. 248–253.

2. *Ванькова, О.С.* Математическое моделирование воспламенения и стабилизации горения в предварительно не перемешанных водородно-воздушных потоках при сверхзвуковых скоростях: автореф. дис. ... канд. физ. наук: 1.1.9 / ИТПМ СО РАН. – Новосибирск, 2023. – 20 с.

3. *Моисеева, К.М., Крайнов, А.Ю.* Численное определение критических условий искрового зажигания и выхода на устойчивый режим горения бедной метано-воздушной смеси // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. – 2018. – № 56. – С. 79–87.

4. *Кантарбаева, А., Моисеева, К.М.* Особенности распространения пламени в угле-пропано-воздушной газозвеси // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. – 2021. – № 74. – С. 95–102.

5. *Van, Leer B.* Towards the ultimate conservative difference scheme. Second-order sequel to Godunov’s method // *J. Comput. Phys.* – 1979. – Vol. 32. – № 1. – Pp. 101–136.

E.S. Chura, K.M. Moiseeva*

Tomsk State University, Russia, 634050, Tomsk, Lenina, 36

** moiseeva_km@t-sk.ru*

**NUMERICAL SIMULATION OF COMBUSTION
OF A HYDROGEN-AIR MIXTURE IN A NARROW
CHANNEL**

Я.О. Шайхутдинов*, Г.И. Павлов, Д.А. Теляшов

*Казанский национальный исследовательский
технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ,
420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10,*

** jara2105@mail.ru*

МОДЕРНИЗАЦИЯ СОПЛОВОГО БЛОКА ГОРЕЛКИ С ОСЕВЫМ ВЕНТИЛЯТОРОМ ПУТЕМ УСТАНОВКИ КОНФУЗОРА ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ

В ходе анализа работы блочной горелки с применением осевого вентилятора *SHUFT CFs 160 S* установлена неравномерность скорости потока воздуха по сечению. При текущей конфигурации соплового блока скорость воздушного потока на оси минимальная, так как воздух распределяется по периферии. Потенциально это может ухудшить смесеобразование, поскольку компоненты циркулируют раздельно: воздух сосредоточен в периферийной области, а топливо – преимущественно вблизи оси. Согласно новой схеме в выходном сечении корпуса вентилятора был установлен сужающийся патрубок – конфузор. Это привело к перераспределению механической энергии потока – часть энергии была перенаправлена в область оси соплового блока. Ожидается, что такое решение может способствовать более однородному смешению компонентов.

Для проведения численных исследований воздушного потока была смоделирована трехмерная модель вентилятора *SHUFT CFs 160 S*. Математическая модель потоков решалась в *ANSYS Fluent* с использованием турбулентной модели $k-\omega$ *SST*. На входе вентилятора (*inlet*) задавался массовый расход воздуха 0,28 кг/с (при температуре 300 К). Скорость вращения – 2500 об./мин. У выходного

сечения вентилятора дополнительно был построен свободный объем для анализа течения воздушного потока в пространстве.

Расчетный профиль скорости за вентилятором без каких-либо направляющих устройств показывает периферийно-концентрированный характер течения (рис. 1). Высокая скорость поддерживается на периферии потока, в то время как в центральной части значение скорости близко к нулю. Данный результат качественно согласуется с экспериментальными наблюдениями. При измерении скоростей с применением термоанемометра *Hot Wire Anemometer GM8903* было выявлено, что вблизи оси скорость воздуха минимальна, в то время как на периферии наблюдается ее резкое возрастание. Физически это объясняется тем, что при высокой закрутке струи без сужения ее поперечного сечения основная часть кинетической энергии тратится на формирование тангенциальной скорости, в центре создается область низкого давления и поток сдвигается к стенкам [1].

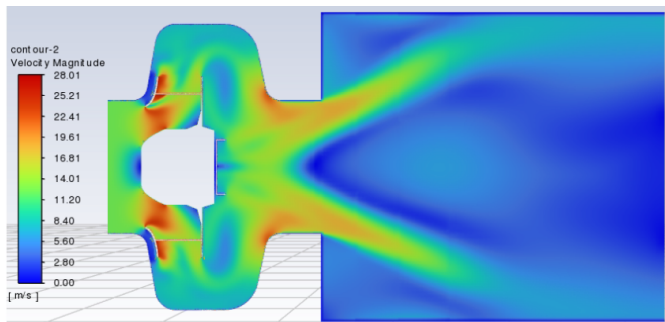


Рис. 1. Распределение скорости потока в продольном сечении (без конфузора)

В исследовании использовался осевой центробежный вентилятор, для которых характерна достаточно высокая закрутка воздушного потока [2]. Описанный профиль скорости ухудшает массообмен с горючим газом, поскольку при подаче топлива его ос-

новая масса будет находиться в центральной зоне, что снижает степень пересечения потоков.

Для устранения периферийно-концентрированной структуры потока предлагается установить конфузор – плавно сужающийся участок канала (с $D_y = 160$ мм до $D_y = 89$ мм) непосредственно за вентилятором (рис. 2). В дозвуковой гидроаэродинамике, при наличии достаточной потенциальной энергии, конфузор может обеспечить ускорение потока: переход к меньшему сечению приводит к перераспределению энергии, вследствие чего статическое давление потока снижается с увеличением скорости газов в продольном направлении. Опыт гидротехнических систем показывает, что наличие сужающего устройства быстро преобразует вихревой поток в осевой [3], выравнивая его профиль. В применении к горелочному устройству это позволяет ожидать перераспределения воздушного потока в направлении оси канала, что потенциально должно способствовать созданию более благоприятных условий для последующего смесеобразования с подаваемым топливом.

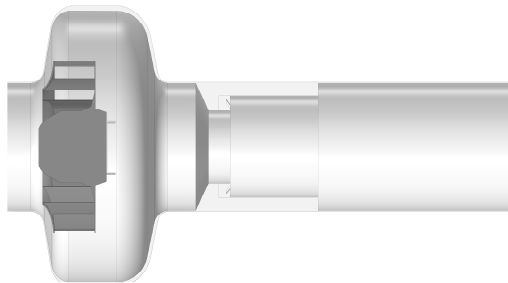


Рис. 2. Трехмерная модель соплового блока с конфузором в разрезе

Проведенный сравнительный анализ течения воздуха с установленным конфузором (рис. 3) и без него подтверждает это. Сужение канала приводит к существенному перераспределению продольной скорости по сечению: за конфузоре формируется выраженная зона повышенной осевой скорости, тогда как периферийные

области характеризуются пониженной скоростью. Полученная структура течения принципиально отличается от ранее описанного характера потока, наблюдаемого при отсутствии сужающего участка.

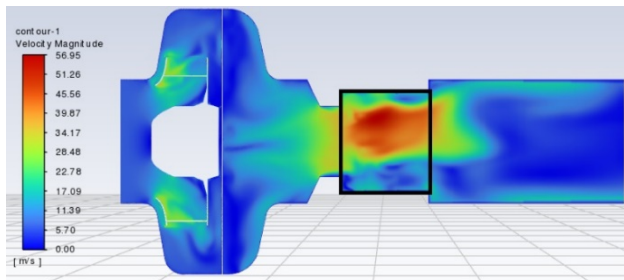


Рис. 3. Распределение скорости воздушного потока в продольном сечении (с конфузуром)

В области, соответствующей предполагаемой зоне смесеобразования (выделена черным цветом), наблюдается рост продольной скорости воздушного потока и формирование выраженных градиентов скорости. Наличие таких градиентов способствует усилению сдвиговых взаимодействий между основным воздушным потоком и струями топлива, подаваемыми под углом к оси канала, что позволяет рассматривать данную конфигурацию как более благоприятную с точки зрения кинематических предпосылок для интенсификации смесеобразования.

Полученные результаты отражают изменения кинематических характеристик воздушного потока и служат основой для дальнейшего анализа процессов смесеобразования с учетом переноса компонентов и параметров турбулентности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Litvinov, I., Suslov, D., Gorelikov, E., et al.* Swirl number and nozzle confinement effects in a flat-vane axial swirler // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2021. – Vol. 91.

2. Шайхутдинов, Я.О., Павлов, Г.И., Накоряков, П.В. и др. Исследование хордальных струй в реагирующих смесях численным методом // XXVII Туполевские чтения (школа молодых ученых): материалы международной молодежной научной конференции, 13-14 ноября 2025 г., Казань: ИП Сагиев А.Р., 2025. – С. 1005-1011.

3. Yangiev, A., Adjimuratov, D., Gapparov, F., et al. The calculation of the rates in the swirling flow for the confuser section // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. – Vol. 869.

I.O. Shaikhutdinov*, G.I. Pavlov, D.A. Telyashov

*Kazan National Research Technical University
named after A.N. Tupolev–KAI, 420111, Russian Federation,
Tatarstan, Kazan, K. Marksa st., 10,*

** jara2105@mail.ru*

**MODERNIZATION OF THE NOZZLE BLOCK
OF A BURNER WITH AN AXIAL FAN BY INSTALLING
A CONFUSER TO INTENSIFY MIXTURE FORMATION**

Р.Р. Шакиров, И.А. Давлетишин, Н.И. Михеев*

Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН», 420111, Казань, ул. Лобачевского, 2/31,

** radiffshakirov@mail.ru*

ВЛИЯНИЕ ВТОРИЧНЫХ ТЕЧЕНИЙ НА ТЕПЛООБМЕН И ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ В КАНАЛЕ С ШЕРОХОВАТОЙ СТЕНКОЙ

Введение. Пассивное управление теплообменом с помощью дискретной шероховатости, генерирующей вторичные течения Прандтля 2-го рода, позволяет интенсифицировать массообмен между пристенной областью и ядром потока [1]. Вклад таких течений в процессы переноса сравним с вкладом турбулентных пульсаций [2]. Цель работы – экспериментальное определение теплогидравлической эффективности прямоугольного канала с дискретной шероховатостью, вызывающей устойчивые вторичные течения.

Методика. Эксперименты выполнены на воздухе в прямоугольном канале 36×180 мм ($L = 3$ м). По периметру стенок канала (за исключением боковых) наклеены латунные прутки 1×1 мм и длиной 36 мм. Прутки наклеены прерывисто с шагом, равным длине прутка. Вдоль направления потока прутки расположены друг за другом на расстоянии 9 мм. Такая чередующаяся ориентация прутков по ширине и длине канала формирует продольные полосы шероховатых и гладких участков стенок, ориентированные со смещением относительно противоположных стенок. Данная геометрия генерирует вторичные течения Прандтля 2-го рода со скоростью 2–4% от средней скорости потока. Локальные коэффициенты теплоотдачи измерялись методом ИК-термографии на нагреваемой текстолитовой стенке с медными дорожками [3]. Поля скорости в поперечном сечении восстановлены оптическим методом SIV [4].

Гидравлическое сопротивление определялось по перепаду статического давления.

Результаты. Получены коэффициенты теплоотдачи и коэффициенты сопротивления в диапазоне чисел Рейнольдса, соответствующем турбулентному режиму. Визуализация потока подтвердила наличие крупномасштабных вихревых структур, ориентированных перпендикулярно основному течению, которые интенсифицируют перенос тепла от стенки. Показано, что организация вторичных течений 2-го рода позволяет повысить теплоотдачу при умеренном росте гидравлических потерь.

Выводы. Исследованная геометрия дискретной шероховатости является эффективным пассивным методом интенсификации теплообмена. Теплогидравлическая эффективность поверхности обусловлена генерацией вторичных течений Прандтля 2-го рода, вклад которых в перенос сравним с турбулентными пульсациями.

Работа поддержана грантом РФФ № 22-19-00507-П.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Леонтьев, А.И., Олимпиев, В.В.* Потенциал энергосбережения различных способов закрутки потока и дискретно шероховатых каналов (обзор) // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2010. – Т. 1. – С. 13–49.

2. *Никитин, Н.В., Попеленская, Н.В. и др.* Вторичные течения Прандтля 2-го рода. Проблемы описания, предсказания, моделирования // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа, 2021. – № 4. – С. 73–99.

3. *Давлетишин, И.А. Михеев, Н.И., Паерелий, А.А., Шакиров, Р.Р.* Метод измерения коэффициента теплоотдачи на плоской стенке // Теплофизика высоких температур. – 2022. – Т. 60. – № 3. – С. 443–447.

4. Mikheev, N.I. Dushin, N.S. A method for measuring the dynamics of velocity vector fields in a turbulent flow using smoke image-visualization videos // Instruments Exp. Tech. – 2016. – Vol. 59. – № 6. – Pp. 882–889.

R.R. Shakirov*, I.A. Davletshin, N.I. Mikheev

Federal State Budgetary Institution of Science «Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences», 420111, Russian Federation, Tatarstan, Kazan, ul. Lobachevskogo, 2/31,

** radiffshakirov@mail.ru*

**INFLUENCE OF SECONDARY FLOWS ON HEAT
TRANSFER AND HYDRAULIC RESISTANCE
IN A CHANNEL WITH A ROUGH WALL**

М.Ж. Шекенов^{1,2*}, С.С. Попович¹, К.С. Егоров²

*¹ Научно-исследовательский институт механики МГУ
им. М.В. Ломоносова, 119192, г. Москва, Мичуринский пр., 1*

*² Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1,*

** manas.shekenov.02kg@mail.ru*

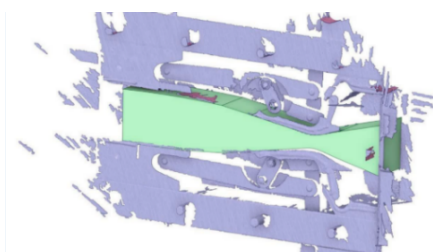
РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ СОПЛА АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности и достоверности экспериментальных исследований в области газодинамики на основе цифровизации процессов моделирования и обработки данных. Использование трехмерных цифровых моделей экспериментальных установок обеспечивает уменьшение ресурсоемкости исследований, повышение точности определения геометрических и газодинамических характеристик [1]. Кроме того, применение цифровых моделей также позволяет оперативно вносить изменения в конструкцию элементов установки для расширения диапазона исследуемых параметров течения.

В работе рассматривается процесс создания цифровой модели сопла аэродинамической установки и последующий анализ его характеристик. Цель исследования заключается в разработке цифровой модели сопла с использованием технологий 3D-сканирования.

Для создания цифровой модели сопла был использован 3D-сканер, позволивший получить облако точек в трехмерном пространстве, где каждая точка описывается координатами X , Y и Z . Полученные данные были обработаны в программной среде Matlab. Контур сопла был сориентирован вдоль координатных осей итерационным методом, что позволило скорректировать его пространственное положение. Таким образом, была получена геометрия

проточной части аэродинамической установки для реализуемых в ней чисел Маха 2.25, 2.5, 2.75, 3.0 (рисунок).



Восстановленная геометрия на фоне исходной STL модели

Рассматриваемая установка снабжена плоским регулируемым сверхзвуковым соплом пластинчатого типа, что позволяет непосредственно во время эксперимента изменять скорость потока в рабочей части установки от скорости, соответствующей числу Маха от 1,7 до 3,5 [2, 3]. Кроме того, стенд оборудован системой PIV (Particle Image Velocimetry), обеспечивающей бесконтактное измерение полей скоростей потока и получение детальной информации о структуре течения в исследуемой области [4].

На основе полученной модели были проведены расчеты основных газодинамических параметров потока (числа Маха, давления, температуры, скорости) и построены графики их распределений по длине канала. Для комплексного анализа геометрии сопел выполнено сопоставление профилей исследуемого сопла с Атласом плоских сопел [5] при числах Маха 2.25, 2.5 и 3.0.

Работа выполняется при поддержке гранта РНФ (проект №24-79-10035).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марков, В.В. Создание виртуальных аналогов экспериментальных установок как компонентов комплексного исследования быстропротекающих газодинамических процессов // Материалы

Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-27). – 2022.

2. *Попович, С.С.* Особенности автоматизации эксперимента и обработки результатов при исследовании теплообмена в сверхзвуковом потоке сжимаемого газа // Программная инженерия. – 2018. – Т. 9. – № 1. – С. 35-45.

3. *Popovich, S.S., Zditovets, A.G., Kiselev, N.A., Vinogradov, U.A.* Experimental study of aerodynamic heating in the region of an incident shock wave boundary layer interaction // Acta Astronautica. – 2025. – Vol. 229. – Pp. 804–813.

4. *Егоров, К.С., Загайнов, И.А., Попович, С.С.* Сравнительное исследование применимости различных видов трассеров засева потока системы PIV при сверхзвуковых скоростях // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках. Тезисы докладов XXIV Школы семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева, посвященной 100-летию академика РАН В.Е. Алемасова. – 2023. – С. 406–407.

5. *Овсянников, А.М., Пирумов, У.Г., Плетнёв, Э.М., Росляков, Г.С.* Атлас плоских сопел. – Москва: Изд-во Московского государственного университета, 1976.

M.Zh. Shekenov^{1,2*}, S.S. Popovich¹, K.S. Egorov²

¹ *Research Institute of Mechanics at Lomonosov Moscow State University, 119192, Russian Federation, Moscow, Michurinsky Prospekt 1*

² *Bauman Moscow State Technical University, 105005, Russian Federation, Moscow, 2 Baumanskaya Street, 5, Building 1,*

** manas.shekenov.02kg@mail.ru*

DEVELOPMENT OF A DIGITAL MODEL OF AN AERODYNAMIC FACILITY NOZZLE

***П.Д. Шульженко^{1*}, В.Д. Мешкова^{1,2},
К.Ю. Литвинцев², А.А. Дектерев^{1,2}***

*¹ Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск, проспект Свободный, 79,*

** Shulzhenko.polina@yandex.ru*

*² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 1*

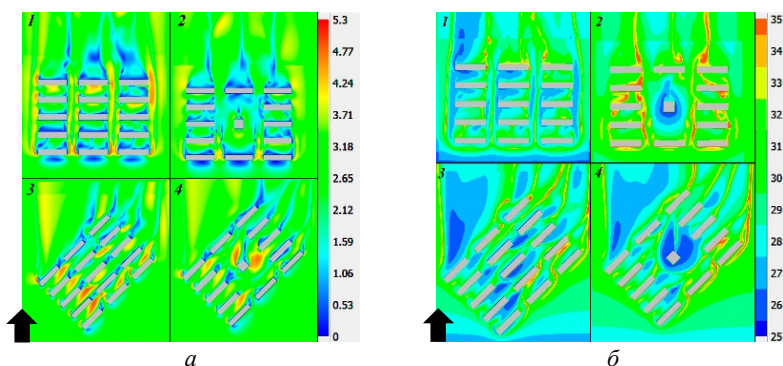
ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА ФОРМИРОВАНИЯ БИОКЛИМАТИЧЕСКОГО КОМФОРТА В ГОРОДСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Температура является наиболее важным фактором, влияющим при оценке биоклиматического комфорта внутри городского пространства. Нагрев зданий, асфальта, почвы и других объектов солнечной радиацией сильно влияет на движение воздушных масс, их скорость и направление за счет конвективных процессов. Тепловой режим города необходимо также учитывать и изучать, как и ветровой, при оценке пешеходного комфорта. В данной работе представлена часть из исследования влияния аэрационного движения и теплового нагрева на формирование биоклиматического комфорта в городском пространстве. Исследования выполнены с помощью разработанного авторским составом программного комплекса – «SigmaPedestrianComfort» [1]. Программа позволяет произвести зонирование городской территории по уровням биоклиматического комфорта.

Для исследования был выбран строчный вид жилой застройки в двух вариациях: 1 – состоящий из зданий прямоугольной формы с размерами зданий 15×75×15 м (высота, длина, ширина соответственно); 2 – центральные здания были заменены одним высотным зданием с размерами 60×25×25. Оценки выполнялись

при разных направлениях ветра – 45 и 90°. Расчеты проводились для летнего дневного периода, температура воздуха задавалась равной 25°C, скорость ветра, согласно логарифмическому закону – на высоте 10 м $v = 4,1$ м/с.

На рисунке представлены картины полей скорости и температуры на высоте 2 метра для всех вариантов расчета. Диапазон температур колеблется от 26 до 35°C, на формирование таких условий влияет конвекция и формирующийся внутри района аэрационный режим. Вблизи зданий температура воздуха выше, чем вдали от зданий, на это влияет то, что в данных областях скорость ветра ниже. В местах, где скорость ветра высокая – на углах зданий, где происходит срыв потока, температура воздуха заметно ниже.



Результаты расчета на высоте 2 метра: *а* – поле скорости, м/с; *б* – поле температур, °C; ↑ – направление ветра

Для оценки биоклиматического комфорта была использована радиационно-эквивалентно-эффективная температура (РЭЭТ) – комплексный показатель, объединяющий влияние температуры, влажности воздуха, скорости ветра и интенсивности теплового излучения (радиации) на теплоощущение человека. Все исследованные варианты, учитывая их диапазон температур и скорости ветра, удовлетворяют критериям биоклиматической комфортности.

Строчный вид района без высотного здания более комфортный для жизнедеятельности человека. Вариант с высотным зданием в центре менее комфортный, так как происходит влияние на формирование ветрового режима и, соответственно, на тепловой режим вблизи здания. Из-за отрыва потока с кромки здания, а также большой аэродинамической тени за ним происходит образование особой зоны вокруг высотного здания. РЭЭТ сильно снижается, температура воздуха становится низкой, что приводит к ухудшению комфортности нахождения людей в данной области.

Здания, преимущественно низкоэтажные, строчного вида являются одними из наиболее комфортных для жизнедеятельности человека, так как имеют сбалансированную скорость ветра и температуру воздуха вблизи них.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Программный модуль для расчета биоклиматического уровня комфорта пешеходов в уличных пространствах городской среды. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025613633, от 13 февраля 2025 г.

***P.D. Shulzhenko^{1*}, V.D. Meshkova^{1,2},
K. Yu. Litvintsev², A.A. Dekterev^{1,2}***

*¹ Siberian Federal University, 660041, Russian Federation,
Krasnoyarsk Territory, Krasnoyarsk, Prospekt Svobodny, 79,*

** Shulzhenko.polina@yandex.ru*

*² Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS,
630090, Russian Federation, Novosibirsk region,
Novosibirsk, Akademika Lavrentieva Avenue, 1*

NUMERICAL EVALUATION OF THE FORMATION OF BIOCLIMATIC COMFORT IN URBAN SPACE

С.А. Шуляев, А.О. Клименко,
С.С. Кропотова, А.Г. Исламова*

*Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
660074, Российская Федерация, Томск, ул. Ленина, 30,*

** sas77@tpu.ru*

ДИНАМИКА РАСТЕКАНИЯ КАПЕЛЬ РАСТВОРОВ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ ПО ТВЕРДЫМ ПОВЕРХНОСТЯМ

Управление процессом столкновения капель с твердой поверхностью является актуальным во многих сферах промышленности [1]. Добавление в состав жидкости поверхностно-активных веществ (ПАВ) существенно влияет на динамику этого процесса [2]. Актуальным является определение оптимальных значений концентраций ПАВ для стабильной реализации режимов разбрызгивания или растекания капель по поверхности. Цель настоящего исследования – анализ влияния физико-химических свойств ПАВ на характеристики процесса соударения капель с твердой подложкой.

Эксперименты проведены для капель растворов ПАВ размерами $2,28 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$. В качестве ПАВ использовались AFFF, ОП-10, сульфолон, СМАРТ с концентрацией в диапазоне $0,01 - 0,5\%$. В качестве твердой подложки использовалась сталь разной степени обработки (шероховатости) поверхности. Варьирование скорости столкновения капель с поверхностью в диапазоне $0,7 - 2,3 \text{ м/с}$ осуществлялось путем изменения высоты расположения сопла. Кадры соударения капель ПАВ с твердой поверхностью получены теневым методом с помощью скоростной видеокамеры.

Описание методики проведения экспериментов приведено в [3]. По результатам видеосъемки регистрировались основные па-

раметры взаимодействия капли с поверхностью: диаметр капли до столкновения (D_0), диаметр растекания (D_i), высота капли (h_i) и динамические контактные углы (DCA).

По результатам обработки экспериментальных данных вычислялось отношение высоты капли к начальному диаметру капли h_i/D_0 (рис. 1).

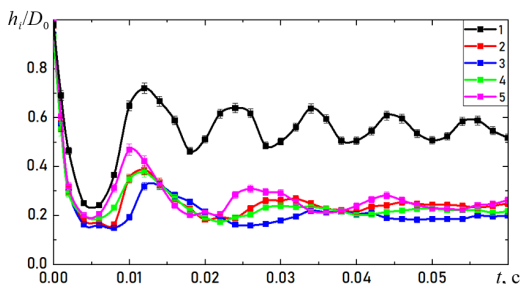


Рис. 1. Зависимость отношения высоты к начальному диаметру капли от времени при варьировании типа ПАВ в концентрации 0,5% (полированная поверхность): 1 – вода; 2 – АФФФ; 3 – ОП10; 4 – сульфонол; 5 – СМАРТ

Добавление ПАВ в воду значительно изменяет характеристики растекания капель. Показано, что добавление ПАВ в концентрации 0,5% приводит к снижению значений отношения h_i/D_0 в среднем на 40-50%. Такой эффект связан с изменениями в структуре водной фазы, вызванными адсорбцией ПАВ на границе раздела фаз, что в свою очередь приводит к более быстрому рассеянию кинетической энергии.

Показано, что добавление ПАВ в концентрации 0,5% оказывает существенное влияние на динамический угол смачивания – по сравнению с водой зарегистрировано снижение DCA на 50%, а также значительное уменьшение амплитуды их колебаний (рис. 2).

Результаты исследований способствуют лучшему пониманию степени влияния ПАВ на процессы взаимодействия капель с поверхностями и позволяют оптимизировать процессы для конкретных применений, например, в технологиях пылеулавливания и пылеосаждения.

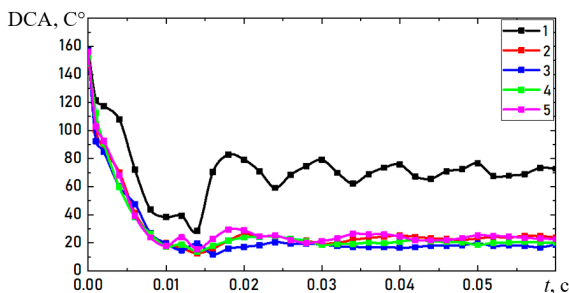


Рис. 2. Зависимость динамических контактных углов (DCA) от времени при варьировании типа ПАВ в концентрации 0,5% (полированная поверхность):
 1 – вода; 2 – АФФФ; 3 – ОП10; 4 – сульфонол; 5 – СМАРТ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 26-21-20073, <https://rscf.ru/project/26-21-20073>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang, L. et al. Adhesion force characterization method of water-droplet sliding on superhydrophobic surface // Surf. Interfaces. – 2025. – Vol. 60. – P. 106073.
2. Liu, L. et al., Eur, J. Mech. Experimental study on impact dynamics of droplet on heated copper surfaces and liquid gallium surfaces // B/Fluids. – 2025. – Vol. 114. – P. 204346.
3. Antonov, D.V. et al. Droplet collision with hydrophobic and superhydrophobic surfaces: Experimental studies and numerical modeling // Surf. Interfaces. – 2024. – Vol. 48. – P. 104264.

S.A. Shulyaev^{1*}, A.O. Klimenko, S.S. Kropotova, A.G. Islamova

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
 660074, Russian Federation, Tomsk, Lenina, 30,

* sas77@tpu.ru

DYNAMICS OF LIQUID DROP DISPERSION ON A SOLID SURFACE IN THE PRESENCE OF SURFACTANT

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Антонов Д.В., Керимбекова С.А., Кузнецов Г.В., Микулич А.В., Микулич М.Е.</i> Исследование расслоения и седиментации органических примесей в сточных водах	3
<i>Бердников В.С., Винокуров В.А., Винокуров В.В., Гришков В.А., Кислицын С.А., Митин К.А., Митина А.В., Михайлов А.В.</i> Тепловая гравитационно-капиллярная конвекция в вертикальных слоях и в полостях с тонкими вертикальными стенками	6
<i>Жукова Ю.В., Чорный А.Д., Попов И.А., Щелчков А.В.</i> Тепловой расчет и анализ систем охлаждения радио- и микроэлектроники с использованием методов вычислительной гидродинамики.....	9
<i>Исаев С.А., Михеев Н.И., Осюк Е.А., Душин Н.С.</i> Физический механизм ускорения в ядре ламинарного потока и аномальной интенсификации теплообмена в узком канале с двухрядными наклонными канавками	12
<i>Кузнецов В.В.</i> Тепло- и массообмен при фазовых превращениях и химических реакциях в малоразмерных системах	15
<i>Абрамов М.А., Арефьев К.Ю.</i> Математическая модель построения поля расходонапряженности потока частиц в несущем газовом потоке на основе вероятностного подхода	18
<i>Абсатаров Т.Н., Тупотилов П.А., Богданова Е.В., Захаренков А.В., Дедов А.В.</i> Влияние пространственного фактора	

на теплообмен при охлаждении обогреваемой мишени диспергированным потоком теплоносителя.....	20
<i>Аганин А.А., Мустафин И.Н.</i> Коллапс симметрично расположенных парогазовых пузырьков	24
<i>Акашев А.А., Решетников А.В., Пастухов В.Г.</i> Взаимодействие двух параллельных перегретых струй воды в условиях взрывного вскипания.....	29
<i>Алексеев П.Д., Булатова И.А., Леухин Ю.Л.</i> Повышение эффективности рекуперативных устройств на основе исследования использования технологии импактных струй.....	33
<i>Арефьев К.Ю., Абрамов М.А.</i> Математическая модель движения и испарения полидисперсных капель воды в высокоэнталийном воздушном потоке.....	39
<i>Артамонова Д.Д., Шмельков Ю.Б.</i> Расчетное исследование выхода и накопления продуктов деления в зазоре тепловыделяющего элемента.....	41
<i>Асрутдинова Л.Н., Щелчкова М.А., Миннуллин Р.Р.</i> Исследование гидродинамических характеристик потока воды в открытом канале.....	44
<i>Ахметзянов А.К., Пашкова Н.Д., Молочников В.М.</i> Влияние закрутки потока на течение в разветвляющемся канале	47
<i>Баранова А.А., Сыродой С.В., Солодовникова Ж.А., Сенчихин Д.К.</i> Экспериментальное исследование гетерогенного и газофазного зажигания частиц типичных биотоплив	52
<i>Батура Н.И., Гаджимагомедов Г.Г., Галанская Ю.Н., Чудаков А.Я.</i> Исследование влияния различных способов воздействия на аэродинамические и теплообменные характеристики турбулентной струи воздуха.....	55
<i>Бердников В.С., Митин К.А., Кислицын С.А., Гришков В.А.</i> Влияние режимов гравитационно-капиллярной конвекции на сопряженный теплообмен при росте кристаллов методом горизонтальной направленной кристаллизации	59

<i>Борцев Н.О., Кочегарова А.В., Рахимов Р.Ф.</i> Разработка модели аксиальной тепловой трубы и оценка ее эксплуатационных характеристик	62
<i>Бухмиров В.В., Светушков И.И.</i> Математическое моделирование микроклимата главного корпуса ТЭС в ПБК ANSYS.....	65
<i>Валеев А.А., Душин Н.С., Никифоров И.В.</i> Ускорение турбулизации течения в устройствах подготовки потока	69
<i>Генералов Д.А.</i> Развитие моделей и методов моделирования газодинамических и теплообменных процессов в энергетических установках.....	72
<i>Гибанов Н.С.</i> Увеличение эффективности активных систем охлаждения с помощью пористых теплоотводящих ребер и поверхностей нагревательных элементов	75
<i>Гриненко А.С., Ненарокомов А.В., Ревизников Д.Л., Николитчев И.А.</i> Проектирование абляционной тепловой защиты автоматического космического аппарата для маневрирования в атмосфере Венеры	78
<i>Губайдуллин Д.А., Шайдуллин Л.Р., Фадеев С.А.</i> Вынужденные колебания газа и осаждение аэрозоля в резонаторах различной геометрии	82
<i>Дмитрачкова А.П., Пантелеев С.А., Зарипов Д.И.</i> Применение нейронных сетей для идентификации режима течения жидкости в круглой трубе.....	85
<i>Ермакова К.К., Засимова М.А.</i> Численное моделирование эволюции вихревых структур, сформированных импульсной струей, на основе URANS- и LES-подходов	88
<i>Жигарев В.А., Минаков А.В., Скоробогатова А.Д.</i> Повышение нефтеотдачи пласта наноэмульсиями на основе растительного масла	91
<i>Заграй И.А., Кузьмин В.А., Шмакова Н.А.</i> Спектральные характеристики теплового излучения гетерогенной среды при факельном сжигании твердых топлив.....	94

<i>Зайнутдинова Д.А., Павлов Г.И.</i> О термоанемометрическом методе определения пульсаций скорости в неизотермической струе, создаваемых резонатором Гельмгольца	97
<i>Знамеровский М.Д., Петров Л.В.</i> Моделирование изменения параметров парогазовой среды в защитной оболочке АЭС на примере эксперимента НУКА	102
<i>Золоторёв Н.Н., Костюшин К.В., Ларкин Д.О.</i> Метод и результаты измерения пространственного распределения плотности орошения при сбросе жидкости с борта БПЛА.....	105
<i>Ильинков А.В., Стародумов А.В., Такмовцев В.В., Шукин А.В., Киселев А.А.</i> Особенности оптимизации рабочих процессов в системах конвективно-пленочного охлаждения турбинных лопаток	108
<i>Кашанов Н.А., Птахин А.В., Крылов В.С., Мильман О.О.</i> Обзор зарубежных и отечественных методик испытаний воздушно-конденсационных установок	114
<i>Каюмова Л.Р., Калинин Е.И., Молочников В.М., Пашкова Н.Д.</i> Численное моделирование закрученного течения в гладкой трубе при умеренных числах Рейнольдса.....	117
<i>Клименко А., Шуляев С.А., Кропотова С.С.</i> Влияние поверхностно-активных веществ на характеристики взаимодействия капель с пористым слоем угольных частиц	122
<i>Клочков К.Д., Козлов П.В., Левашов Ю.В.</i> Исследование тепловых потоков от ударно нагретых газов термоэлектрическим детектором.....	125
<i>Кравченко А.В., Рудинский А.В., Арефьев К.Ю., Ананян М.В., Остроухов А.А.</i> Анализ винтовых устройств для интенсификации теплообмена в трубках	128
<i>Курышев И.М., Худякова А.Д., Сапронов Д.В.</i> Учет технологической анизотропии свойств изделий из никелевого сплава при анализе их напряженно-деформированного состояния.....	131

<i>Куомалибиекэ Аэрайгули, Андрианова К.А., Амирова Л.М.</i>	
Теплофизические аспекты получения новых эпоксидных пенопластов	134
<i>Кучкарова М.Р., Пантелеев С.А., Шакиров Р.Р., Михеев Н.И.</i>	
Турбулизация и ламинаризация в стационарном и пульсирующем потоке	137
<i>Кучкарова М.Р., Пантелеев С.А., Шакиров Р.Р., Михеев Н.И.</i>	
Изменение гидравлического сопротивления в условиях пульсирующего течения в канале	141
<i>Лазарев И.С.</i> О выпадении парафина при заводнении нефтяных пластов	144
<i>Ларкин Д., Костюшин К.В.</i> Исследование нестационарных газодинамических процессов в осесимметричных двигателях с подвижным центральным телом	147
<i>Ларкин Д., Ерёмин И.В.</i> Влияние начальной функции распределения конденсированной фазы на распределение газодинамических параметров в осесимметричных соплах	150
<i>Леухин Ю.Л., Федотова С.А., Алексеев П.Д.</i> Влияние сносящего потока на теплоотдачу вогнутой поверхности, обдуваемой импактными струями	153
<i>Лоцманов М.В., Рахимов Р.Ф., Балабаев Н.Е., Беляев И.А.</i> Методы получения статистических характеристик в быстроизменяющихся электромагнитных условиях	160
<i>Лукьянов А.А., Ничик М.Ю., Лебедев А.С., Добросельский К.Г., Дулин В.М.</i> Управление турбулентным течением в следе за круговым цилиндром с помощью сквозных отверстий при больших числах Рейнольдса	163
<i>Лукьянов А.А., Зарипов Д.И.</i> Экспериментальное исследование процесса ламинаризации турбулентного течения в круглой трубе со встроенным устройством	166
	315

<i>Маршалова Г.С., Островская Д.В., Данильчик Е.С.</i> Выбор оптимальной высоты вытяжной шахты для аппарата воздушного охлаждения с учетом внешнего аэродисперсного загрязнения теплообменных поверхностей	169
<i>Мильман О.О., Перов В.Б., Крылов В.С., Птахин А.В., Брдынкевич Д.В., Железнов А.П., Чергинец Е.С., Зайцев С.А.</i> Методы оценки загрязнения теплообменной поверхности на сухой вентиляторной градирне	172
<i>Минаков А.В., Пряжников М.И., Пряжников А.И., Жигарев В.А., Якимов А.С.</i> Разработка микрофлюидных чипов-сенсоров для нефтепромысловых флюидов	175
<i>Миндубаев А.З., Бабынин Э.В., Бабаев В.М.</i> Штамм <i>Aspergillus Niger</i> F-4815D в роли деструктора нефти	178
<i>Митрофанов А.А., Моисеева К.М., Крайнов А.Ю.</i> Исследование горения смесового твердого топлива при изменении давления над его поверхностью	181
<i>Мошин А.А., Храпцов Д.П., Некрасов К.Д., Румянцев Н.Г., Михайлова И.А., Вязьмин А.В.</i> Оценка времени тепловой релаксации гидрогелей при 3D-печати	184
<i>Назаров Н.А., Герасимов А.С., Терехов В.И.</i> Касательные напряжения на стенке плоского канала в пульсирующем потоке	188
<i>Назарова С.А., Засимова М.А.</i> Оценка эффективности охлаждения вентилируемого помещения при стационарной и нестационарной подаче приточного воздуха	191
<i>Нигай Н.А., Сыродой С.В., Солодовникова Ж.А., Познахарев А.С.</i> Влияние толщины диспергированного слоя древесины на механизмы тепломассопереноса в процессе сушки	195
<i>Никифоров И.В., Душин Н.С.</i> Течение в структурированном канале с перспективными формами овально-траншейных углублений	198

<i>Новошконов А.С., Маластовский Н.С., Киселёв Н.А.</i> Оценка параметров теплообменного аппарата на основе эффекта Эккерта – Вайзе	201
<i>Оришина В.А., Панкратов Е.В.</i> Исследование структуры закрученного турбулентного потока в кольцевом канале методом лазерной доплеровской анемометрии	208
<i>Панкратов Е.В.</i> Исследование локальной инверсии теплового потока в разворотной зоне байонетных теплообменников.....	215
<i>Пантелеев С.А., Дмитрачкова А.П., Габдулхакова Д.И., Зарипов Д.И.</i> Режимы течения потока с наложенными периодическими возмущениями в круглой трубе	222
<i>Пантелеев С.А., Кучкарова М.Р., Михеев Н.И.</i> Вторичные течения Прандтля 2-го рода в пульсирующем потоке в прямоугольном канале.....	225
<i>Пащикова Н.Д., Молочников В.М.</i> Турбулизация закрученного течения в канале с наличием внезапного расширения	229
<i>Писарев Д.С., Антаненков А.А., Антаненкова И.С.</i> Теплоотдача и потери давления в подогревателе термомасляной ОРС-установки	235
<i>Рахимов Р.Ф., Лоцманов М.В., Беляев И.А.</i> Экспериментальное исследование импульсного воздействия на электропроводящую среду в поперечном магнитном поле	238
<i>Романов И.С., Попов А.П.</i> Измерение температуры спонтанного вскипания и критических параметров термонестабильных веществ.....	242
<i>Сабирзянов А.Н., Меньшиков М.Н., Мурашев К.Е.</i> Численное исследование влияния размеров частиц и скорости сверхзвукового потока на равномерность распределения коэффициента теплоотдачи.....	245
<i>Сабирзянов А.Н., Ахметзянов А.Р., Бекеров А.Р.</i> Исследование состава газообразных продуктов разложения резиноподобных теплозащитных материалов	248

<i>Саушин И.И., Гольцман А.Е., Телешов М.И.</i> Внедрение системы рециркуляции дымовых газов в блочных горелках ЕММА-N для промышленных котлов	253
<i>Селезнев М.А., Кучумов А.Г.</i> Сравнение гемодинамических характеристик при транскатетерном протезировании аортального клапана.....	256
<i>Селиванов Г.Д., Кучумов А.Г.</i> Численный анализ влияния геометрических параметров протезов ТИАК на механические характеристики сетчатой конструкции каркаса.....	259
<i>Сидоркина О.А., Тимофеева С.С., Караева Ю.В.</i> Исследование термохимической конверсии биомассы и органических отходов....	262
<i>Смирнов А.В., Муслаев А.В., Дергунов И.М.</i> Инженерная модель пристеночного кипения на основе модели Ягова с гомогенным описанием дрейфа фаз для мультифизических САЕ-расчетов ...	265
<i>Соловьев Р.И., Марфин Е.А.</i> Исследование влияния акустического воздействия на свойства нефти в задачах интенсификации добычи.....	269
<i>Сыродой С.В., Солодовникова Ж.А., Замалтдинов Р.Р.</i> Совместное дробление капель водоугольного топлива	272
<i>Трегуб Д.С., Бахарев А.А., Мельников И.А.</i> О расчете теплоотдачи в оксидном тепловыделяющем слое	275
<i>Халилов Р.И., Фрик П.Г., Колесниченко И.В., Мамыкин А.Д., Балашов В.А.</i> Натриевый испытательный стенд. Методика измерений и оценка погрешности	278
<i>Хамидуллин Р.М.</i> Моделирование доминирующих механизмов разрушения никелевого сплава ХН73М в терминах фазовых полей	281
<i>Чижиков Д.А., Рахимов Р.Ф., Белавина Е.А.</i> Численное моделирование мгд-течения щелочного раствора в магнитном поле	285
<i>Чукалин А.В.</i> Минимально-параметризованная актуаторно-дисковая вычислительная модель ветроэнергетической установки	288

<i>Чура Е.С., Моисеева К.М.</i> Численное моделирование горения водородо-воздушной смеси в узком канале	291
<i>Шайхутдинов Я.О., Павлов Г.И., Теляшов Д.А.</i> Модернизация соплового блока горелки с осевым вентилятором путем установки конфузора для интенсификации смесеобразования.....	294
<i>Шакиров Р.Р., Давлетишин И.А., Михеев Н.И.</i> Влияние вторичных течений на теплообмен и гидравлическое сопротивление в канале с шероховатой стенкой	299
<i>Шекенов М.Ж., Попович С.С., Егоров К.С.</i> Разработка цифровой модели сопла аэродинамической установки	302
<i>Шульженко П.Д., Мешкова В.Д., Литвинцев К.Ю., Дектерев А.А.</i> Численная оценка формирования биоклиматического комфорта в городском пространстве.....	305
<i>Шуляев С.А., Клименко А.О., Кропотова С.С., Исламова А.Г.</i> Динамика растекания капель растворов поверхностно-активных веществ по твердым поверхностям	308

ПРОБЛЕМЫ ТЕПЛОМАССОБМЕНА И ГИДРОДИНАМИКИ В ЭНЕРГОМАШИНОСТРОЕНИИ

Казань, 25-30 мая 2026 г.

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Ответственные секретари оргкомитета Н.Д. Пашкова, А.В. Щелчков
Редактор Н.И. Данич
Компьютерная верстка – С.В. Филаретов, А.А. Золина

Подписано в печать 15.05.2026.
Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл.печ.л. 18,6. Тираж 35 экз. Заказ А11.

Издательство КНИТУ-КАИ
420111, Казань, К. Маркса, 10

ISBN 978-5-7579-2782-4

