



ПРОСПЕКТ СВОБОДНЫЙ-2016

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ СТУДЕНТОВ,
АСПИРАНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ

ЭЛЕКТРОННЫЙ СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ
МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ СТУДЕНТОВ,
АСПИРАНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ
«ПРОСПЕКТ СВОБОДНЫЙ-2016»,
ПОСВЯЩЁННОЙ ГОДУ ОБРАЗОВАНИЯ
В СОДРУЖЕСТВЕ НЕЗАВИСИМЫХ ГОСУДАРСТВ

КРАСНОЯРСК, СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

15-25 АПРЕЛЯ 2016 Г.

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Сборник материалов
Международной конференции студентов,
аспирантов и молодых учёных
«Перспектив Свободный-2016»,
посвящённой Году образования
в Содружестве Независимых Государств

Красноярск, Сибирский федеральный университет, 15-25 апреля
2016 г.

Красноярск, 2016



ПЕРСПЕКТИВ СВОБОДНЫЙ-2016

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ

Красноярск, Сибирский федеральный университет, 15-25 апреля 2016 г.

«Теплофизика»



**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ЗАКРУЧЕННОГО ТЕЧЕНИЯ В СИСТЕМЕ ГАЗОУДАЛЕНИЯ**

Горюнов Ю. Н., Жигарев В. А., Дектерев Д.А.
научный руководитель канд. физ.-мат. наук Минаков А.В.
Сибирский федеральный университет

В настоящее время одной из актуальных проблем на промышленных предприятиях является очистка воздушной среды от загрязнений газами, дымом или пылью, при этом наиболее эффективный способ вентиляции заключается в удалении экологически вредных веществ вблизи источника их выделения, так как предотвращается распространение загрязнений по всему помещению.

В настоящий момент существует большое количество концепций по удалению (аспирации) выбросов от источников их происхождения. Однако практика показывает, что в большинстве случаев их эффективность остается крайне низкой, поэтому для удаления вредных примесей приходится прокачивать большие объемы газов, что делает всю систему газоочистки очень дорогостоящей. Таким образом задача создания высокоэффективного способа газоудаления является чрезвычайно актуальной и с экологической точки зрения и с точки зрения снижения затрат на обслуживание систем газоочистки. В настоящее время очень перспективными считаются системы локального газоудаления с принудительной закруткой потока, которые при невысоких уровнях энергозатрат обеспечивают эффективное удаление экологически вредных газообразных или аэрозольных продуктов из зоны дыхания оператора без создания помех для технологического процесса. Повышение эффективности вентиляции достигается при помощи создания радиальной разомкнутой противоточной вихревой струи. В результате закрутки потока на оси вытяжного устройства формируется область пониженного давления (разрежение), в которую подсасываются вредные выбросы с большого объема и далее удаляются в вентиляцию. Обзор подобных исследований показал, что устройства с применением вихревой закрутки потока имеют наибольшую эффективность.[1-5]

Целью работы является разработка и расчетно-экспериментальное исследование вытяжного устройства с применением радиально разомкнутой противоточной вихревой струи.

На основе результатов предварительного численного моделирования была изготовлена система газоудаления для проведения экспериментальных исследований.

На рисунке 1 представлена схема экспериментальной установки. Для создания противоточной вихревой струи во вход 1 подается воздух со скоростью $U_3=8,78$ м/с, который закручивается в завихрителе 3, и дальше, двигаясь по кольцевому каналу 2, выходит в помещение. Удаление воздуха из помещения происходит через трубу 4 со скоростью $U_в=4,39$ м/с.

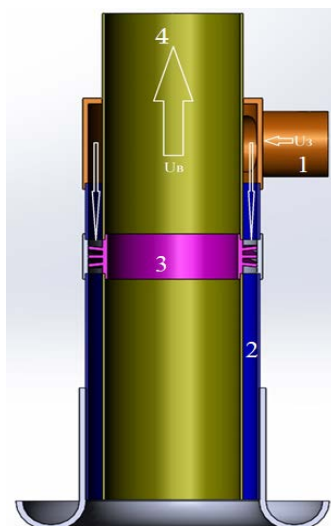


Рис.1 – Схема установки

Были исследованы варианты работы устройства без создания противоточной вихревой струи и с ее созданием. На рисунке 2 приведены примеры визуализации дымоудаления для этих двух случаев, которые позволяют провести качественную оценку эффективности работы устройства.



Без закрутки потока.



С закруткой потока.

Рис.2 – Визуализация течений при помощи дыма

Также с применением термоанемометра были проведены замеры скорости потока в нескольких сечениях, позволяющие оценить область газоудаления. В результате было установлено, что использование закрученного потока приводит к значительному увеличению области захвата, как по радиусу, так и по длине.

Полученные экспериментальные данные использовались для верификации математической модели.

Численное моделирование проводилось на сетке, состоящей из 385000 узлов. Для расчетов использовалась модель турбулентности $k-w$.

Расчетные картины течения представлены на рисунке 3.

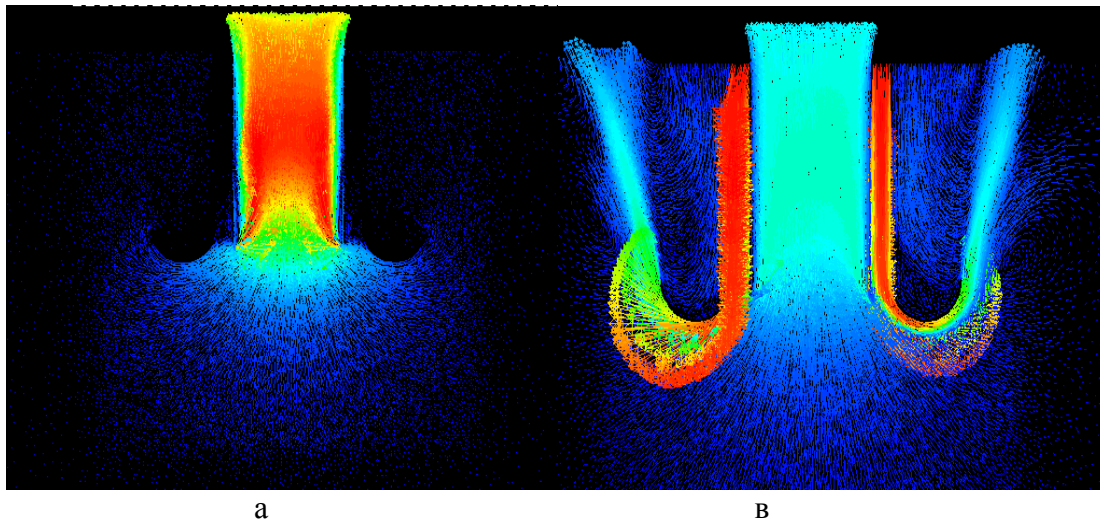


Рис.3 – Расчетное поле скоростей а) без закрутки потока, б) с закруткой потока

В ходе расчета были получены значения распределения скоростей, в сечениях, аналогичных эксперименту. На рисунке 4 приведен график сравнения экспериментальных и расчетных данных.

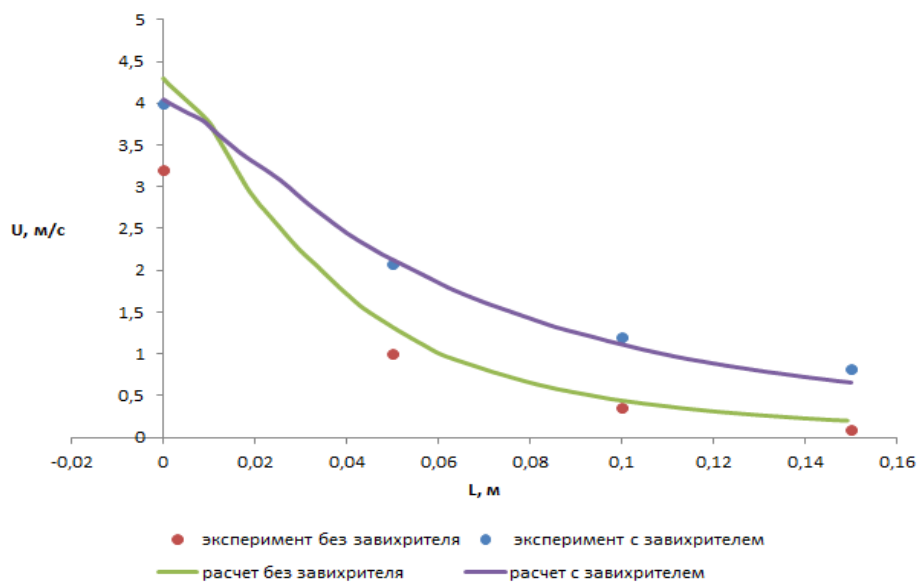


Рис.4 – График сравнения распределения скоростей U по оси центральной трубы, на расстоянии L от установки экспериментальных данных и расчета

Из графика видно хорошее соответствие экспериментальных данных с расчетными, что позволяет в дальнейшем использовать данную математическую модель для изучения различных модификаций установки, такие как: применение

разных углов и количества лопаток завихрителя, варьирование длины патрубков и отношения скоростей прямой и противоточной струй.

Предварительные исследования показали очень высокую эффективность устройства с вихревой закруткой потока. Представленная экспериментальная модель, несмотря на свою высокую эффективность, не является оптимальной и имеет существенный резерв для дальнейшего повышения эффективности. В дальнейшем планируется проведение численных расчетов с варьированием геометрии установки, проведение более детальных верификационных данных при лабораторном эксперименте и проведение экспериментов на промышленном предприятии с целью апробации установки в реальных рабочих условиях.

Список литературы

1. Lee, S.M., Lee, J.W., 2005. A new local ventilation system using a vortex flow generated with a finned rotating annular disk.
2. Lee, S.M., Lee, J.W., 2006. Performance of the vortex ventilator based on capture efficiency.
3. Shtern, V., Hussain, F., 1996. Hysteresis in swirling jets.
4. Spotar, S.Y., Terekhov, V.I., 1987. Two spontaneously alternating regimes of a vortex flow above a plane.
5. Spotar, S.Y., Chohar, I.A., Lukashov, V.V., Prozorov, D.S., 1994. A method and device for vortex suction of gases. RU patent 2046258.



ИССЛЕДОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕПЛООБМЕНА НАНОЖИДКОСТЕЙ И ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ ПОЛИМЕРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛООБМЕНА

Гузей Д.В., Жигарев В.А., Мешков К.Н.

научный руководитель канд.техн.наук Дектерев А.А.

Сибирский федеральный университет

Интенсификация теплообмена и связанные с ней задачи экспериментального и теоретического исследований приобретают в настоящее время значение самостоятельной, важной и быстро развивающейся области учения о теплообмене. Во всех машинах, оборудовании и технологиях возникает потребность интенсивного отведения тепла, для чего используется различного рода теплообменное оборудование. Одним из путей решения проблемы интенсификации процесса теплообмена является использование жидкостей с примесью наночастиц различного состава, получивших название «наножиждкости».

Термин «наножиждкость» был впервые предложен в работе [1] для обозначения двухфазной системы, состоящей из несущей жидкости и наночастиц высокотеплопроводного материала. Типичными несущими жидкостями являются вода, органические жидкости (этиленгликоль, масло), полимерные растворы. Материалом для наночастиц служат металлы, оксиды металлов, углеродные нанотрубки.

Целью настоящей работы являлось: Экспериментальное исследование способов снижения трения при турбулентном теплообмене наножиждкостей с помощью полимерных добавок, для создание наножиждкости с заданными транспортными свойствами и реологией.

Экспериментальная установка.

Изучение вынужденной конвекции наножиждкости в турбулентном режиме с добавками полимеров было проведено на экспериментальной установке схема, которой представлена на рисунке 1:

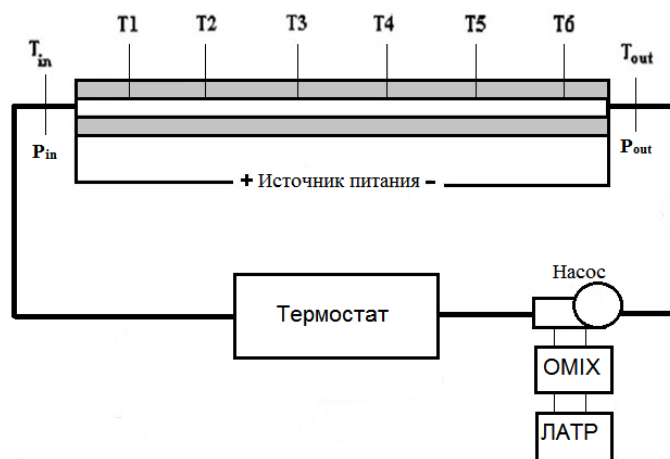


Рис.1 - Схема измерительной установки

Установка представляет собой замкнутый контур, с циркулирующим теплоносителем. С помощью насоса рабочая жидкость прокачивается через

измерительный обогреваемый участок после прохождения, которого, поступает в теплообменник, в котором отдает тепло термостату. Расход рабочей жидкости в контуре регулируется с помощью изменения мощности насоса. Мощность насоса регулируется ЛАТРОМ. Измерение мощности, подводимой к насосу осуществлялось при помощи измерителя Omix.

Обогреваемый участок представляет собой трубку из нержавеющей стали диаметром 5мм и длиной 1м. Толщина стенки трубки 0,5мм. Нагрев трубки осуществляется путем подачи электрического тока непосредственно на стенку трубки. Такой способ нагрева позволяет получить нагрев с постоянной плотностью теплового потока на стенке трубки.

Помимо этого, при помощи термопар измерялась температура на входе и выходе из обогреваемого участка. Измерения перепада давления проводились при помощи дифференциального манометра ОВЕН ПД200.

Созданная экспериментальная установка была протестирована на известных эмпирических данных и данных численного расчета для теплообмена чистой воды [2].

Результаты экспериментов.

Проведено расчетно-экспериментальное исследование влияние на характеристики турбулентного теплообмена наножидкостей добавки высокомолекулярных полимеров. Число Рейнольдса варьировалось от 2000 до 10000. В качестве базовой жидкости использовалась дистиллированная вода. В качестве полимеров использовалась линейка акриловых полимеров с молекулярной массой от 1 до 20МДа и анионным зарядом от 3 до 40%. В качестве наночастиц порошок оксида алюминия. Диаметр наночастиц варьировался от 10 до 100нм. Объемная концентрация наночастиц варьировалась в диапазоне от 0 до 2 объемных процентов. Полученные суспензии подвергались часовой обработки ультразвуком в ванне "Сапфир".

В результате экспериментов измерены средние и локальные величины коэффициента теплоотдачи на стенках канала, и величина перепада давления на входе и выходе из канала при различной концентрации полимера и наночастиц.

Было показано что добавка полимера, не снижает значение коэффициента теплоотдачи при вынужденной турбулентной конвекции наножидкости (см. рисунок 2).

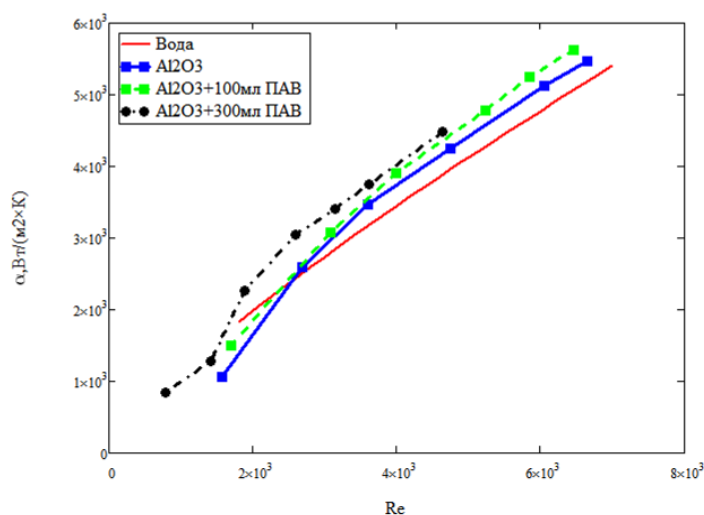


Рис.2 - Зависимость среднего коэффициента теплоотдачи от числа Рейнольдса и концентрации ПАВ. В качестве ПАВа используется AN945 (анионный полиакриламидный флокулянт, $M=20 \cdot 10^6 - 22 \cdot 10^6$, анионный заряд – 40%).

Измерены величины перепада давления в канале при турбулентном течении наножидкостей с добавками полимеров (см. рисунок 3). Экспериментально показано, что добавки высокомолекулярных полимеров способны снижать трение при турбулентном течении наножидкостей. Так в частности показано, что добавление полиакриламида в наножидкость снижает перепад давления в канале в турбулентном режиме примерно на 60% по сравнению с наножидкостью без полимера.

С увеличением концентрации полимера перепад давления монотонно снижается и далее выходит на уровень после которого не зависит от концентрации полимера. Данное снижение наблюдается только в турбулентном режиме течения, что говорит о том, что причина снижения обусловлена эффектом Томса.

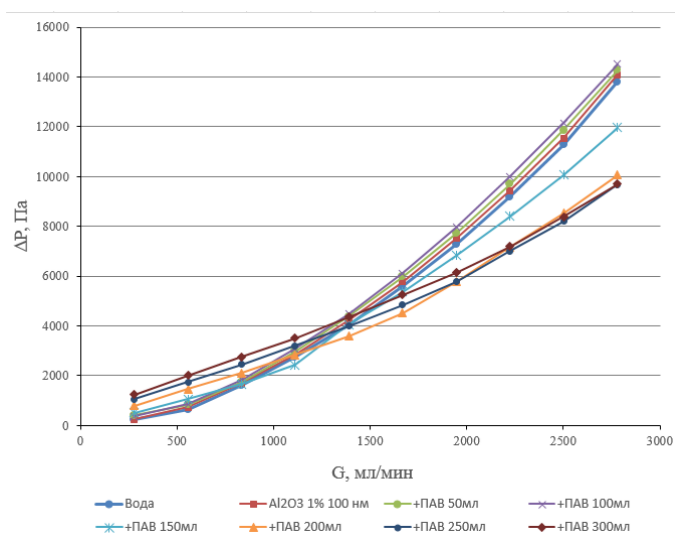


Рис.3 - Зависимость перепада давления для наножидкости на основе частиц Al_2O_3 от расхода и различной концентрации ПАВ. В качестве ПАВа используется AN945 (анионный полиакриламидный флокулянт, $M=20 \cdot 10^6 - 22 \cdot 10^6$, анионный заряд – 40%)

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-38-00569).

Список литературы

1. Choi S.U.S. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. Developments and applications of non-newtonian flows, ASME FED, 1995. V. 66, p. 3408–3416.
2. Минаков А.В., Гузей Д.В., Жигарев В.А. Турбулентная вынужденная конвекция наножидкостей в круглом канале. Учёные записки Казанского государственного университета. 2015. Т.157. №3. С. 85-96.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫНУЖДЕННОЙ КОНВЕКЦИИ В НАНОЖИДКОСТЯХ

Канцеров П. Н.

научный руководитель канд. техн. наук, ст.науч.сотр. Дектерев А. А.

Сибирский федеральный Университет

Интенсификация конвективного теплообмена и связанные с ней задачи исследований приобретают в настоящее время значение самостоятельной области учения о теплообмене. Актуальность этой проблемы определяется стремлением к повышению интенсивности работы теплообменных устройств с целью сокращения затрат энергии. Тем не менее, остается малоизученным влияние на теплообменные процессы введения в теплоноситель наночастиц.

Целью настоящей работы является исследование влияния наночастиц оксида меди на теплообмен при ламинарном течении жидкости.

На рисунке 1 приведена зависимость среднего коэффициента теплоотдачи от расхода для различных концентраций наножидкости.

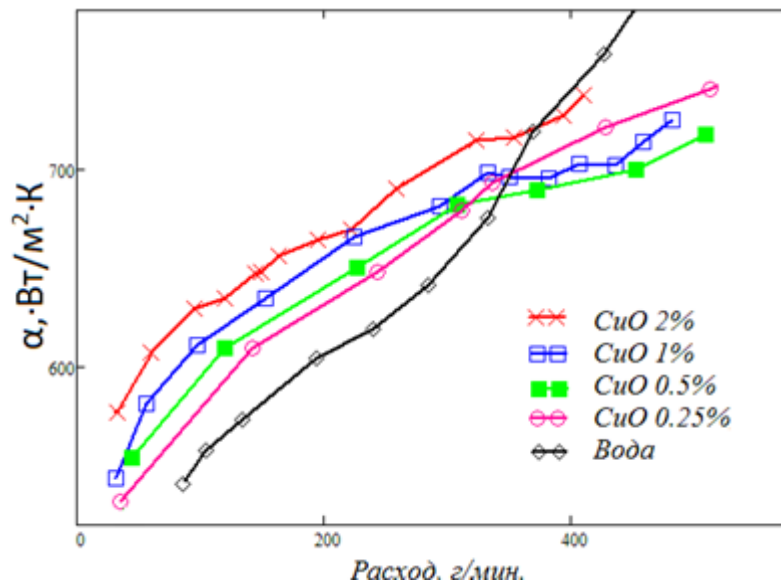


Рис.1- Зависимость коэффициента теплоотдачи от расхода теплоносителя в контуре

Видно, что зависимость среднего коэффициента теплоотдачи от расхода сильно зависит от концентрации наночастиц. При одинаковом значении расхода значение коэффициента теплоотдачи для двух процентной наножидкости примерно на 13 % выше аналогичного значения для воды. С уменьшением концентрации наночастиц величина коэффициента теплоотдачи монотонно стремится к значению соответствующему чистой воде.

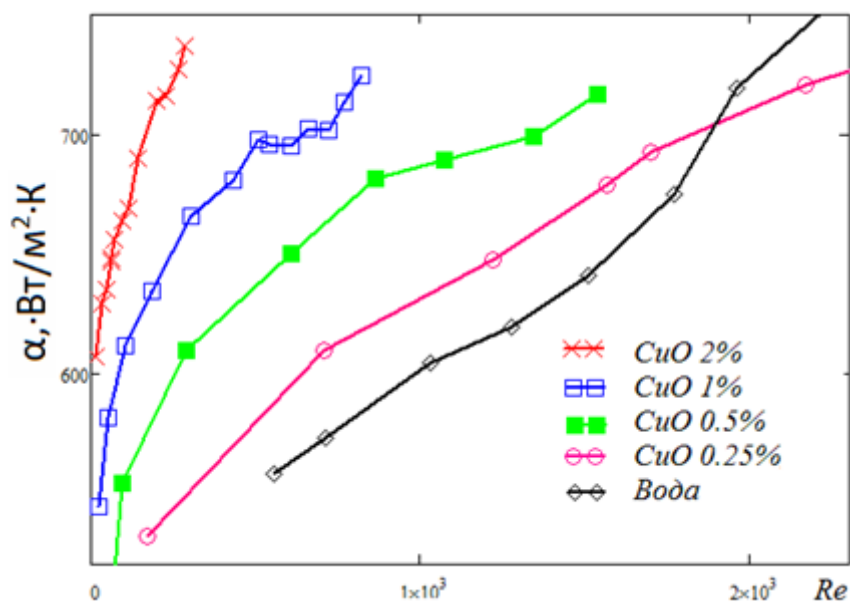


Рис.2- Зависимость коэффициента теплоотдачи от числа Рейнольдса

Из сравнения рисунка 1 и 2 видно, что наблюдаемая интенсификация теплообмена при фиксированном числе Рейнольдса существенно превосходит интенсификацию при фиксированном расходе жидкости. Так при фиксированном значении числа Рейнольдса значение коэффициента теплоотдачи для двух процентной наножидкости более чем на 40% выше аналогичного значения для воды. С уменьшением концентрации наночастиц величина коэффициента теплоотдачи также монотонно стремится к значению соответствующему чистой воде. При значении числа Рейнольдса более 2000, как и следовало ожидать, наблюдается ламинарно-турбулентный переход для чистой воды. Такое поведение соответствует результатам, полученным другими авторами[1].

Эксперименты показали, что применение в качестве теплоносителя наножидкости существенно сказывается на величине коэффициента теплоотдачи. Так, в частности, показано, что при фиксированном значении числа Рейнольдса 2% концентрация оксида меди позволяет более чем на 40% повысить средний по длине трубки коэффициент теплоотдачи по сравнению с чистой водой. Установлено, что с увеличением концентрации наночастиц, локальный и средний коэффициенты теплоотдачи возрастают.

Таким образом применение в качестве теплоносителя наножидкости на основе оксида меди достоверно позволяет интенсифицировать теплообмен при вынужденной конвекции, что открывает новые перспективы повышения эффективности теплообменных устройств.

Список литературы

1. Keblinski, P. Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids) / P. Keblinski, S. R. Phillpot, S. U. S. Choi, J. A. Eastman // Int. J. Heat Mass Transf. – 2002. – № 45. – P. 36-44.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ НА КОЭФФИЦИЕНТ ВЯЗКОСТИ НАНОЖИДКОСТЕЙ

Кистерская М. С., Пряжников М. И.

научный руководитель канд. физ.-мат. наук Минаков А. В.

Сибирский федеральный университет

Уникальные свойства наножидкостей резко расширяют границу их применимости. Сейчас происходит развитие теплообменных систем с микро- и наноразмерами, а также развиваются и исследования связанные с использованием в таких устройствах жидкостей с примесью наночастиц. Было показано, что наножидкости имеют коэффициент теплопроводности на десятки процентов выше, чем у их базовых жидкостей. В связи с этим, на сегодняшний день большинство работ посвящено изучению тепловых свойств наножидкостей (теплопроводность, теплоотдача), при этом уделяется недостаточно внимания их коэффициенту вязкости. Между тем вязкость играет ключевую роль во многих приложениях и оказывает значительное влияние, в частности, на турбулентную теплоотдачу [1-3].

До сих пор исследования, связанные с добавлением в наножидкости различных поверхностно-активных веществ, сводились к изучению их влияния на стабильность наножидкости. Известно, что полимеры очень широко используются для повышения коллоидной устойчивости наножидкостей, и концентрации полимеров порядка 50-200 мг/л и выше являются типичными значениями. При чем, в большинстве случаев, добавка полимера делается не контролируемо. А это, как показано в данной работе, может радикально изменить свойства наножидкости, в частности вязкость и реологию.

Экспериментальное измерение вязкости наножидкостей проводилось с помощью ротационного вискозиметра Брукфильда DV2T с адаптером для малых вязкостей ULA(0). Точность измерений в доверительном интервале не хуже чем три процента.

Исследования проводились на наножидкости на основе воды с добавлением частиц TiO_2 ($d=150$ нм, $\varphi=2\%$) и Al_2O_3 ($d=100$ нм, $\varphi=1\%$). В качестве ПАВ были выбраны анионный полиакриламидный флокулянт AN945 ($M=20$ МДа, анионный заряд 20% и 40%) и высокоочищенный ксантановый биополимер «ГАММАКСАН». Результаты представлены на Рис.1 и Рис.2.

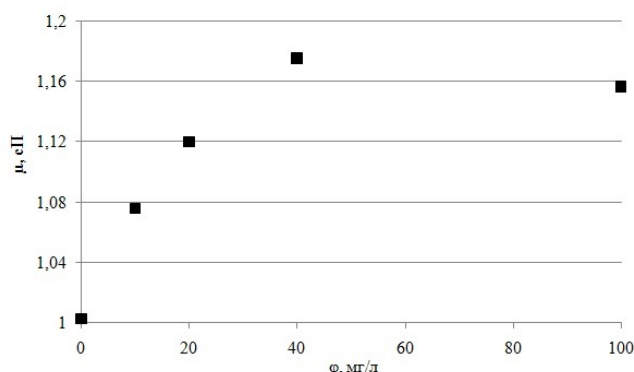


Рис.1 - Зависимость вязкости наножидкости на основе частиц TiO_2 /вода от концентрации ПАВ. В качестве ПАВ используется AN945

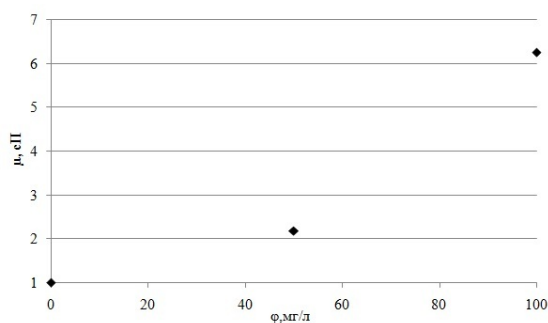


Рис.2 - Зависимость вязкости наножидкости на основе частиц TiO_2 /вода от концентрации ПАВ. В качестве ПАВ используется «ГАММАКСАН»

Установлено, что добавление ПАВ в наножидкость даже в очень малых концентрациях (начиная с 10мг/л) может значительно изменять ее вязкость. Так в частности, было показано, что концентрация анионный полиакриламидный флокулянт с молекулярной массой 20МДа и анионным зарядом 20% 40мг/л повышает вязкость наножидкости с частицами TiO_2 на 18%. Концентрация ксантановой камеди равная 50мг/л для той же наножидкости повышает вязкость в 2 раза. Кроме того, установлено, что при концентрациях полимера выше 100мг/л у наножидкости может изменяться реология. Наножидкость становится неньютоновской, что показано на Рис.3.

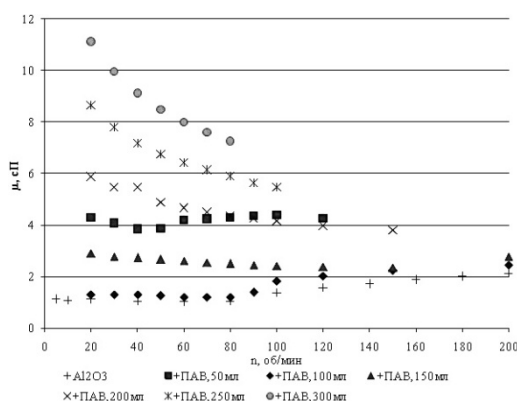


Рис.3 - Зависимость вязкости наножидкости на основе частиц Al_2O_3 /вода от числа оборотов шпинделя. В качестве ПАВ используется AN945

Все это сильно затрудняет интерпретацию экспериментальных данных различных авторов, а также может являться причиной разброса данных в литературе по вязкости наножидкости. Поэтому при использовании ПАВ для стабилизации наножидкостей нужно быть крайне аккуратным.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (соглашения № 16-38-00569 и № 16-38-00580).

Список литературы

1. Hosseini S.Sh., Shahrjerdi A.// Austr. J. Basic and Appl. Sci.2011. V. 5. № 10. P. 417–435.
2. Mahbubul I.M., Saidur R.// Intern. J. Heat and Mass Transfer. 2012. V. 55. P. 874–885.
3. Rudyak V.Ya.// Adv. Nanoparticles. 2013. V. 2. P. 266–279.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГАЗИФИКАЦИИ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ГАЗИФИКАТОРЕ EAGLE

Кузнецов В.А.

научный руководитель канд. тех. наук Чернецкий М.Ю.

Сибирский федеральный университет

Уголь продолжает оставаться важнейшим и наиболее перспективным источником энергии на Земле. Разведанных запасов нефти хватит на 40 лет, газа - на 60 и более лет, а угля минимум на 270 лет. Сегодня в мире угольная энергетика занимает 40% от всего электричества мира, в Китае и Индии - 70-80%, в США - порядка 40%, Германии - около 50%. По данным Международного энергетического агентства (МЭА), в ближайшие 20-25 лет уголь останется вторым по значимости топливно-энергетическим ресурсом после нефти. МЭА отмечает, что в условиях текущей политики потребления, спрос на уголь к 2035 году может вырасти на 70% с учетом расширения спектра технологий использования угля.

Газификация угольного топлива является одним из самых перспективных направлений переработки угля. Технология газификации позволяет перерабатывать любое углеродосодержащее сырье, включая уголь, нефтяной кокс, топочный мазут, биомассу и твердые бытовые отходы. При её применении значительно снижается уровень выбросов парниковых газов, а также несгоревших угольных микрочастиц, сажи и ртути.

Газификатор типа EAGLE является одним из оригинальных решений по повышению эффективности газификации топлива. Данный газификатор был разработан в Японии в рамках проекта «*Coal Energy Application for Gas, Liquid and Electricity*» (EAGLE) ^[1-3]. Принцип работы основан на разделении пылевоздушной смеси на два потока. Один поток, с соотношением кислорода и угля близкому к стехиометрическому, подается в нижнюю часть камеры газификации. Сгорая, он создает необходимые температуры для эффективного протекания реакций газификации. Второй поток, с недостатком воздуха, подается в верхнюю часть камеры, где он взаимодействует с высокотемпературным восходящим потоком продуктов сгорания. В результате недостатка кислорода для полного сгорания, происходит конверсия углеродного остатка в продукты реакций газификации (рис.1,2).

Проведение опытных сжиганий не может выявить в полной мере существующие зависимости процесса горения от качества топлива и физико-химических закономерностей процессов горения пылеугольных частиц. Вследствие этого, большую роль в разработке и совершенствовании технологий сжигания угольного топлива отводится численному моделированию.

В данной работе с использованием CFD-пакета FLUENT были проведены расчетные исследования газификации пылеугольного топлива в камере газификатора EAGLE. Для расчетов была выбрана математическая модель, которая включала в себя: описание движения несущей фазы на основе RANS подхода с двухпараметрической моделью турбулентности $k-\varepsilon$, перенос излучения на основе дискретно-ординатного метода, движение частиц на основе подхода Лагранжа, горение в газовой фазе на основе модели *eddy-dissipation concept*, горение угольной частицы включало в себя выход остаточной влаги, выход летучих и горение коксового остатка.

На начальном этапе была проведена верификация выбранной математической модели процессов горения и газификации пылеугольного топлива в прямоточном кислородном газификаторе ^[4]. Форма и размеры топочной камеры показаны на рисунке

1. В качестве граничных условий на входном внутреннем сечении задавался расход угля равный $66.34 \cdot 10^{-2}$ кг/с и расход кислорода (85%) - $72.8 \cdot 10^{-2}$ кг/с. Во внешнем кольцевом сечении задавался пар (100%) с расходом $18.4 \cdot 10^{-2}$ кг/с.

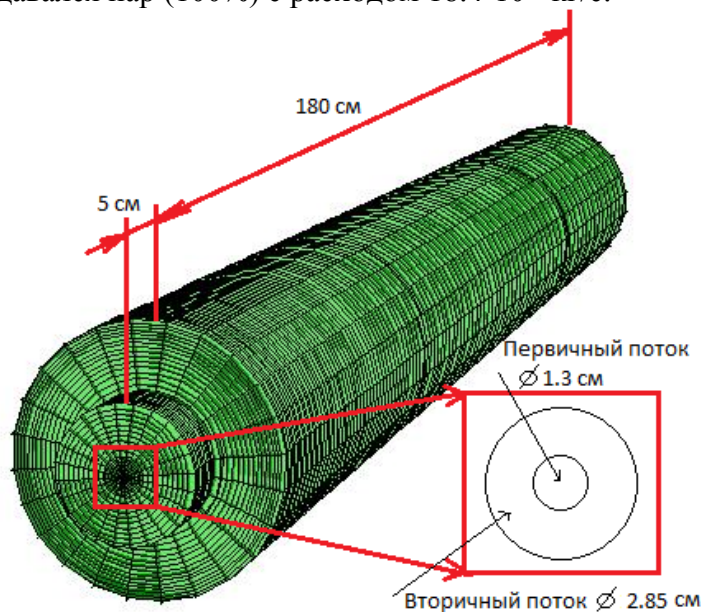


Рис.1 – Геометрия реактора

Ниже представлены результаты расчёта. Распределение концентраций монооксида углерода и водорода вдоль оси горелки показаны на графиках 1,2. Видно, что результаты расчётов удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

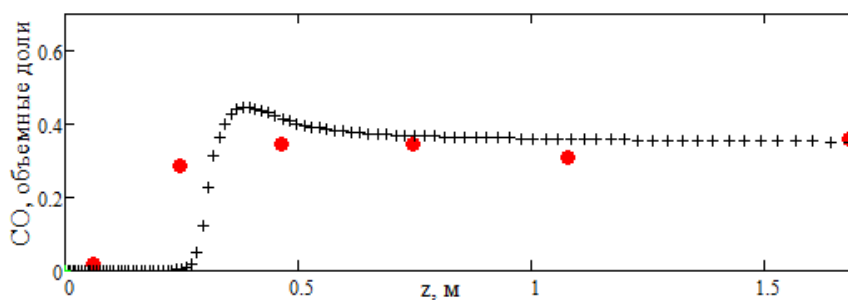


График 1 – Концентрация монооксида углерода

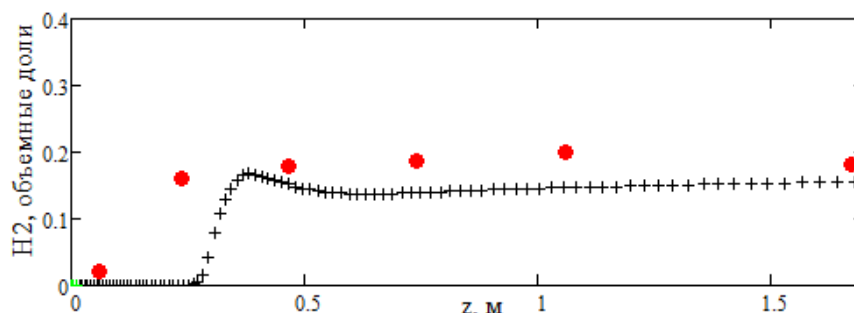


График 2 – Концентрация водорода

Расчетные исследования газификатора *EAGLE (Coal Energy Application for Gas Liquid and Electricity)* включали в себя оценку влияния различных параметров

газификатора (угол наклона горелок, коэффициент избытка воздуха, распределение расходов кислорода и угля между нижними и верхними горелками) на аэродинамику в топочной камере, температуру и состав газов. Параметры работы газификатора указаны в таблице 1. Форма и размеры камеры газификации – на рисунке 2а.

Результаты исследования влияния угла α (в горизонтальной плоскости) (рис. 2б) верхних горелок на результаты расчета представлены на графиках 3,4. Углы нижних горелок $\alpha=45^\circ$ и $\beta=0^\circ$. Для верхних $\beta=0$ и $\alpha = 60^\circ, 45^\circ, 30^\circ$.

Таблица 1 – Параметры горелочных устройств

	Расход угля, кг/с	Расход кислорода, кг/с	Скорость потока, м/с	Температура потока, К	Коэффициент избытка воздуха
Нижние горелки	2.89	3.64	28.7	350	0.6
Верхние горелки	8.67	3.64	58.6	350	

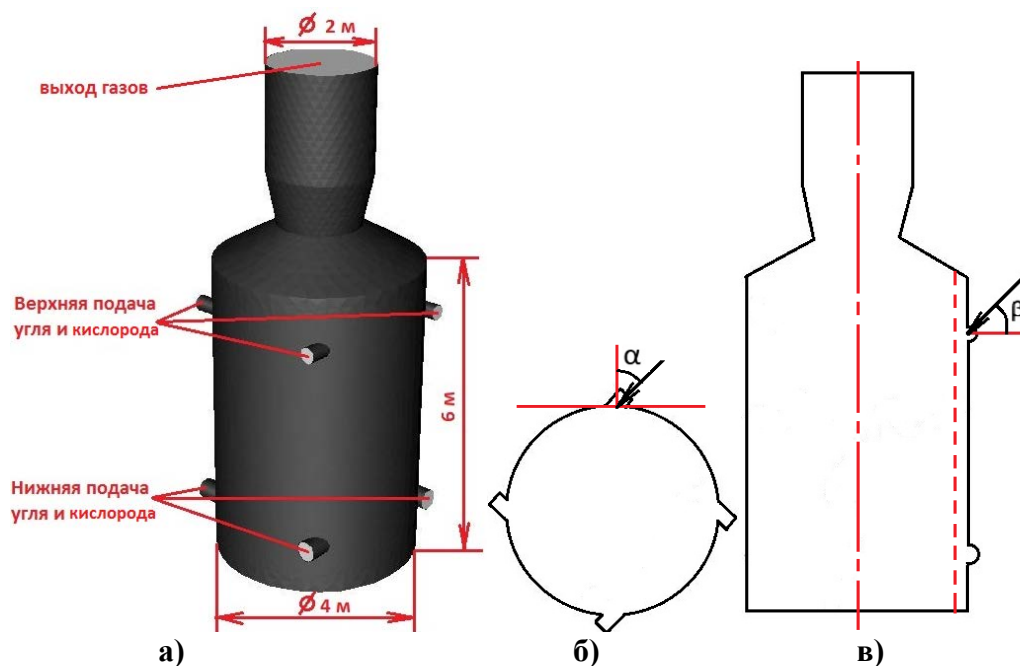


Рис.2 – Геометрия реактора

На графике 3 изображена составляющая скорости газа направленная по z. Можно видеть, что при увеличении угла α усиливается нисходящее движение газа. Это приводит к более длительному пребыванию частиц в камере, что способствует более эффективному протеканию эндотермических реакций с образованием продуктов процесса газификации. Так, при угле $\alpha = 60^\circ$ температура в нижней части камеры падает на 200°C (график 4а) по сравнению с $\alpha = 30^\circ$. При этом интенсивность образования CO в нижней части увеличивается на 20 % (график 4б).

Результаты расчетов и сравнение с экспериментальными данными показали, что выбранная математическая модель процесса газификации пылеугольного топлива и

численные методы ее решения, позволяют правильно описать процессы тепло- и массообмена, конверсию угля в горючие газы.

Расчетные исследования газификатора *EAGLE* показали, что угол наклона верхних горелок оказывает существенное влияние на аэродинамику и процессы газификации угольного топлива. Наилучшая степень конверсии наблюдается при угле наклона горелок 60° .

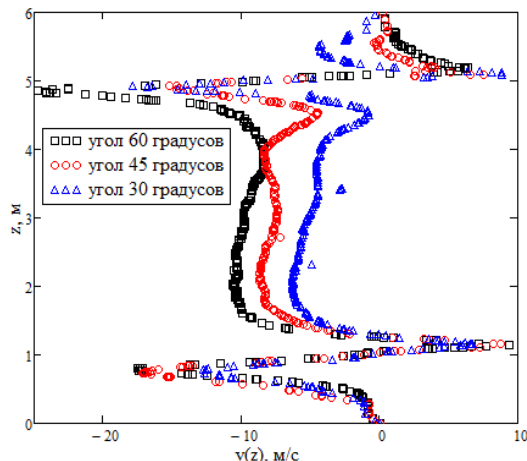


График 3 – Компонента скорости, направленная по *Z*

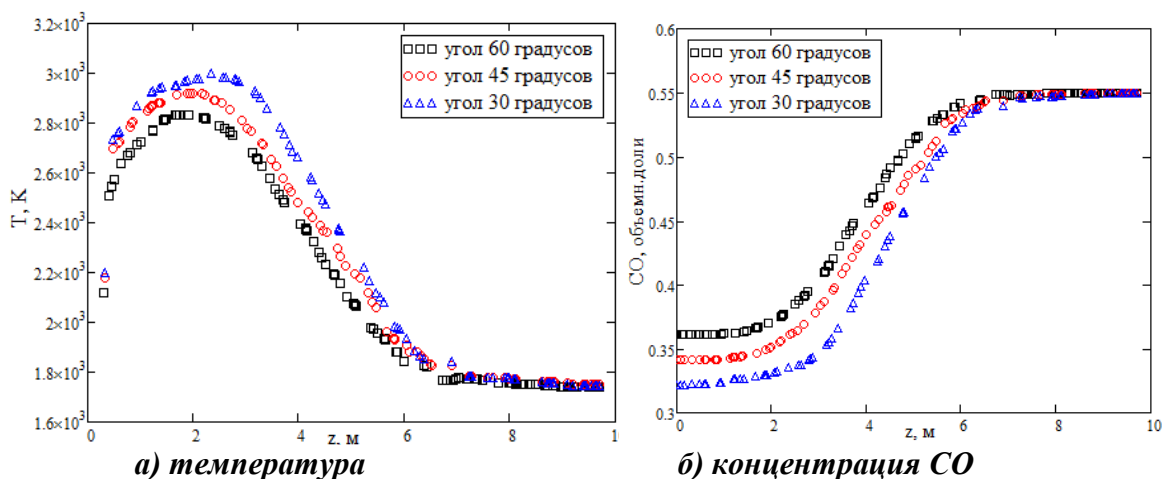


График 4 – Результаты расчета

Разработка численной методики расчета горения угольной пыли выполнены при поддержке РФФИ (грант № 15-38-20969).

Список литературы

1. Kiso F, Akiyama T, Morihara A, Takahashi K, Kida E, Iritani J, et al. EAGLE project for IGFC in Japan. 25th International conference on coal utilization & fuel systems; March 7-10, 2000. Clearwater, FL, USA.
2. Wasaka S, Suzuki E. Operational experience at the 150 t/d EAGLE gasification pilot plant. Gasification technologies conference; October 12-15, 2003. San Francisco, CA, USA.
3. Wasaka S, Sotooka M, Kobori K. The development of coal energy application for gas, liquid & electricity EAGLE. Kobe, Japan: ICOPE; November 9-13, 2003
4. Neerav Abani, Ahmed F. Ghoniem, Large eddy simulations of coal gasification in an entrained flow gasifier, Fuel 104 (2013) 664 – 680.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА САМОВОЗГОРАНИЯ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ

Магдеева О.Л.¹, Кузнецов В.А., Бурдуков Е.П.²
научный руководитель канд. техн. наук Чернецкий М. Ю.

¹Сибирский федеральный университет

²Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе

Проблема самовозгорания угля является общемировой, так ежегодные потери угольных ресурсов в результате самовозгорания составляют в Китае более 200 млн. тонн, что равно 7-й части годовой добычи, и помимо прямого экономического ущерба чревато серьезными экологическими последствиями. Самовозгорание является основной причиной пожаров на складах топлива и топливоподачах (50–60%), по этой причине происходит каждый шестой пожар на котельных и тепловых электростанциях. Существующие сегодня методы оценки пожаро и взрывоопасности углей, являются зачастую обобщенными, не отражающими реальные процессы, происходящие в твердом топливе с течением времени и в ходе его переработки. Целью данной работы являлось разработка расчетно-экспериментальной методики оценки самовозгорания угля основанной на изучении реакционных свойств угольного топлива и трехмерного моделирования процессов тепломассопереноса с учетом химического реагирования.

Для определения критических условий процессов самовозгорания протекающих по тепловому механизму использовалась экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 1 [1]. Установка предназначена для определения кинетических параметров процессов самонагрева. Основу установки составляет суховоздушный термостат специальной конструкции, позволяющий поддерживать температуру в диапазоне от 50 до 300 °С с точностью 0,5 °С. Реакционный сосуд (контейнер) выполнен в виде цилиндра, из тонкой латунной сетки. В ходе опытов регистрируется температура не менее чем в четырех точках (в термостате, вблизи стенки, в центре и на границе реакционного сосуда) с помощью хромель-алюмелевых термопар диаметром 0,3..0,5 мм. Для расчета эффективной энергии активации E и предэкспоненциального множителя C , полученные в ходе опыта термограммы обрабатываются и пересчитываются в аррениусовских координатах.

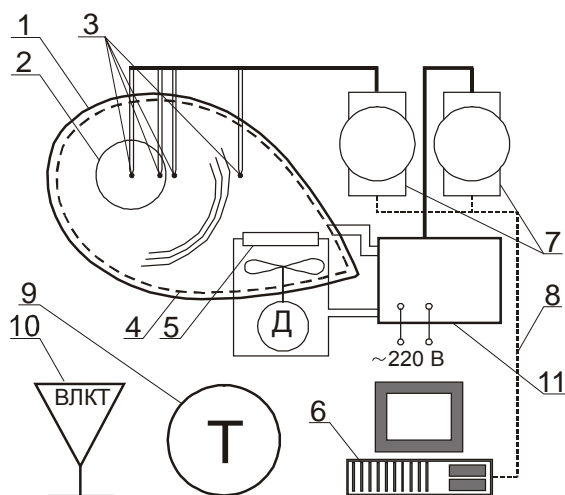


Рис.1 - Установка определения параметров самовозгорания [1]: 1 - корпус термостата; 2 - реакционный сосуд; 3 - теромпары; 4 - основной нагреватель; 5 - вспомогательный нагреватель; 6 - ПЭВМ; 7 - модули сбора данных и управления; 8 - линия связи RS-485; 9 - сушильный шкаф; 10 – весы; 11- модуль электропитания и управления

Процесс разогрева образца пыли бурого угля в термостате записывается в виде:

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{m}{C_m} (\dot{Q}_m + \dot{Q}_d + \dot{Q}_o), \quad (1)$$

\dot{Q}_m - тепловая мощность, обусловленная теплопроводностью, Вт; \dot{Q}_o - мощность тепловыделения при окисления угля, Вт;

C_m - теплоемкость кокса, Дж/(кг·К).

$$Q_m = \alpha S (T - T_o), \quad (2)$$

где α - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); S - площадь поверхности теплоотдачи, м²;

Тепловыделение при окислении угля учитывается посредством задания источника в виде:

$$C_p \rho \frac{dT}{dt} = C_p \rho \cdot n \cdot C \exp\left\{-\frac{E}{RT}\right\}, \quad (3)$$

На границах задается коэффициент теплоотдачи соответствующий постановки задачи.

Полученная математическая модель позволяет рассчитывать динамику разогрева (тепловыделения) пыли угля в процессе самовозгорания в зависимости от свойств угольной пыли и внешних факторов.

Геометрия, размеры и расчетная сетка вагона для хранения и транспортировки угля, а так же навески с углем использованной в эксперименте представлены на рисунке 2(а, б).

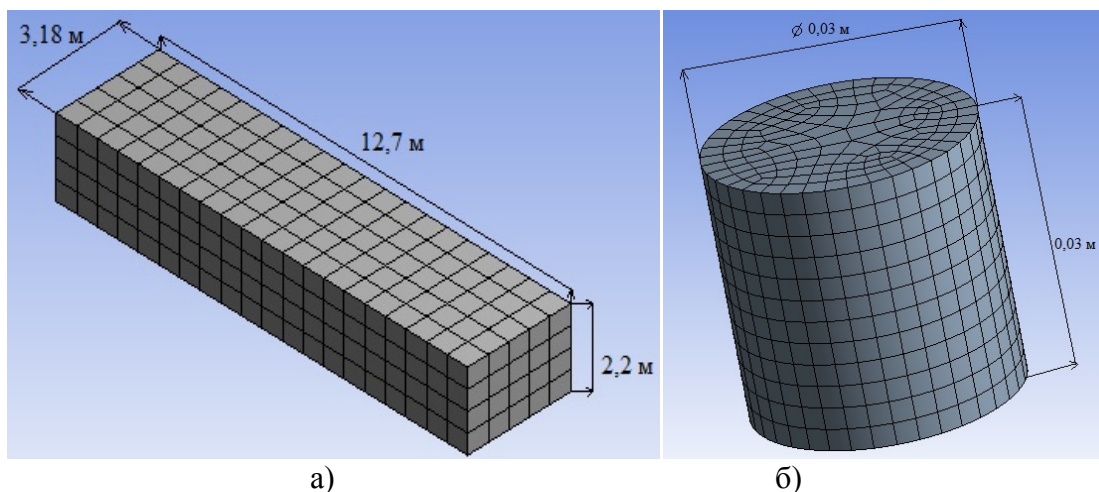


Рис.2 - Размеры, геометрическая модель и расчетная сетка вагона (а), навески (б) заполненного углем

Были выполнены оценки самовозгорания исходного угольного топлива. При моделировании использовались данные, полученные в ходе проведения экспериментальных работ (таблица 1). Эффективная энергия активации E и предэкспоненциальный множитель C были получены из опытов на установке, представленной на рисунке 1.

Таблица 1 – Свойства угольной пыли при моделировании процесса

C_p , Дж/кг·К	ρ , кг/м ³	α , Вт/(м ² ·К)	λ , Вт/м·К	E , Дж/моль	C , К/с
10 65	7 50	20	0. 1	108 846	$5.53 \cdot 10^{11}$

На рисунке 3 представлены результаты в виде временной зависимости нагрева бурого угля при хранении в кузове при начальной температуре окружающего воздуха 400, 407, 417 °К. При данной начальной температуре происходит самовозгорание угля с периодом индукции 99 часов (4.125 суток), 60 часов (2.51 суток) и 31 час (1.29 суток) соответственно.

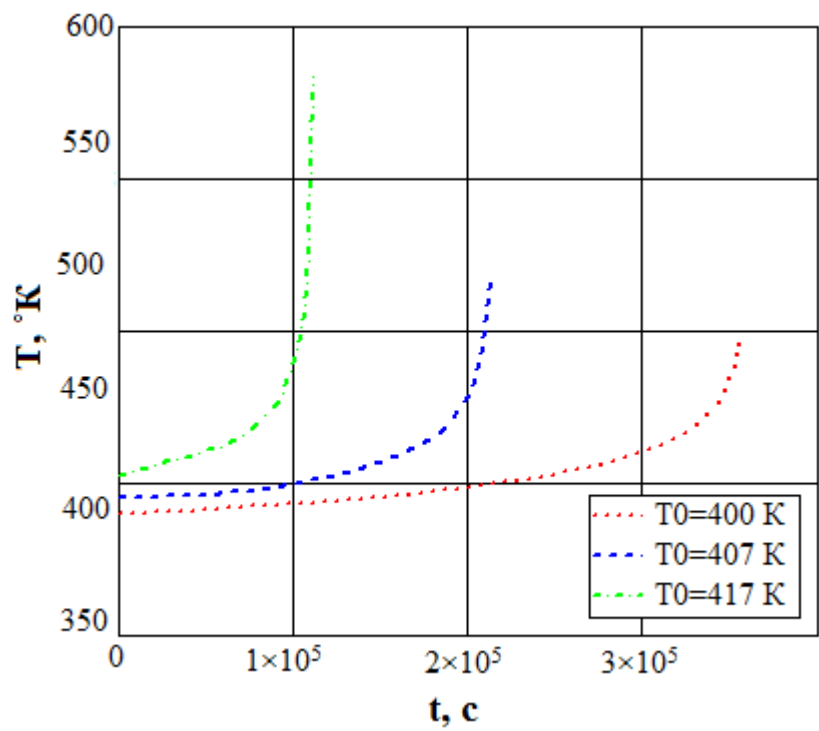


Рис.3 - Временная зависимость нагрева угля при хранении в вагоне при различных начальных температурах

На рисунке 4 представлены результаты сравнения, моделирования с экспериментом, временных зависимостей нагрева навески заполненной углем. При начальной температуре угля 323 °К, температуре окружающей среды 467 °К.

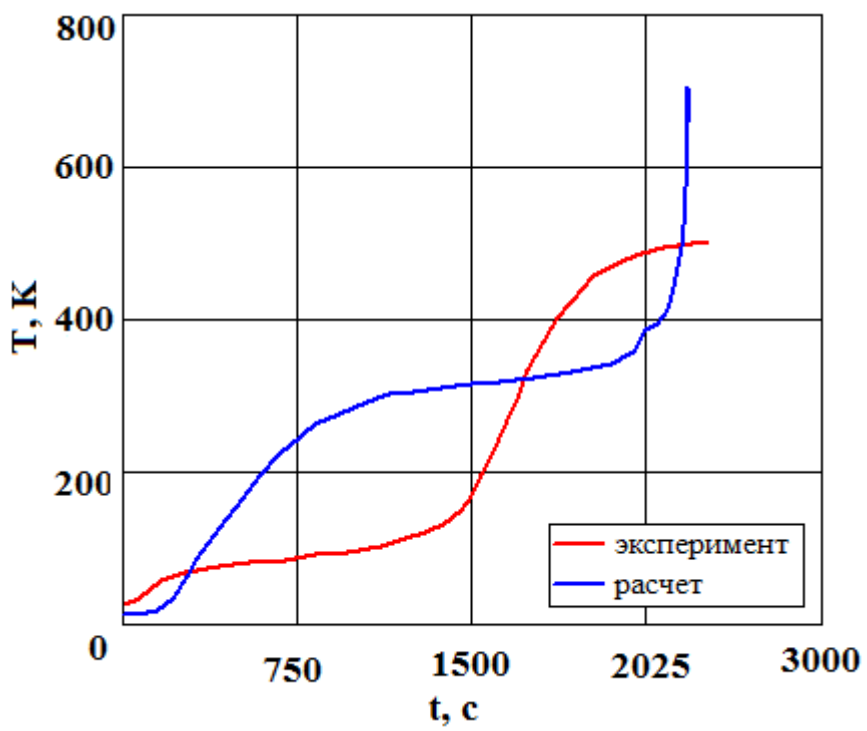


Рис.4 - Сравнение временной зависимости нагрева навески заполненной углем

Результаты моделирования хорошо согласуются с оценками, сделанными по теории Франк-Каменецкого [2] для параллелепипеда угля объемом 90.8 м³. Теория Франк-Каменецкого дает критическую температуру на 7°K выше, чем результаты моделирования.

Предлагаемая методика легко реализуема в производственных условиях, требует достаточно простой в изготовлении экспериментальной установки, наличие программного обеспечения, в основу которого положена математическая модель, представленная выше и задание необходимых для расчета параметров: температура окружающей среды, реакционных свойств угля, полученных предварительно, условия складирования или перевозки угля. С использованием предлагаемой методики можно исследовать факторы, влияющие на увеличение рисков самовозгорания, при его перевозке в полувагонах железнодорожным транспортом, а также при хранении на временных складах. Обосновать и разработать конструкции специализированных контейнеров, удовлетворяющие требованиям по самовозгоранию угля, а также продуктов переработки угля (кокс, полукокс) в нестандартных условиях.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ (грант № 15-38-20969).

Список литературы

1. Захаренко Д.М. Особенности развития теплофизических процессов самовозгорания и взрыва пыли бурых углей // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. - Красноярск: 2001. - с. 69 - 82.
2. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. - М.: Наука, 1967, - 491 с.



ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИЙ ВЫСОКОНАПОРНЫХ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Мешков К.Н.

научный руководитель канд. физ.-мат. наук Минаков А.В.

Сибирский федеральный университет

Ограниченность ресурсов ископаемого органического топлива стимулирует использование новых и возобновляемых источников энергии. В соответствии с энергетической стратегией России гидроэнергетика занимает существенный сегмент энергетической системы страны, практически весь сектор возобновляемых источников энергии в России занят гидроэнергетикой.

Несмотря на то, что современные высоконапорные гидроэлектростанции спроектированы и работают уже несколько десятков лет, до сих пор в гидроэнергетике существует ряд серьезных нерешенных проблем. Одной из таких проблем является чрезмерно высокий уровень пульсаций давлений в проточном тракте высоконапорных ГЭС. Одним из механизмов генерации низкочастотных пульсаций потока в гидротурбинах является прецессия вихревого жгута, образующегося за рабочим колесом гидротурбины в режимах недогрузки или перегрузки гидроагрегата, когда поток после прохождения через гидротурбину имеет достаточно большую остаточную закрутку. Прецессия вихревого жгута представляет серьезную опасность для гидротурбинного оборудования в связи с мощными пульсациями потока, которые приводят к сильным вибрациям конструкции гидротурбины и в случае резонанса могут привести к разрушению оборудования. Цель данной работы заключалась в том, чтобы рассчитать собственные частоты и динамические нагрузки в теле, возникающие из-за течения жидкости.

Для отработки алгоритма была решена модельная задача о нахождении собственных частот тонкого металлического стержня [1] с одним закрепленным концом (табл. 1), произведен расчет деформации тонкой перфорированной пластины, нагруженной равномерным растягивающим усилием, приложенным к верхней и нижней стороне пластины см. Рисунок 1, так же были рассчитаны собственные частоты данной пластины. Решена модельная, нестационарная задача об обтекании пластины в воздушном канале после начала обдува, найдены распределения напряжённостей в данной пластине, скорость потока в канале, и распределение давления в воздухе в течении первых 0,0075с., см. Рисунок 2.

Таблица 1 – собственные частоты тонкого металлического стержня

вычисленное значение частоты, рад/с	аналитическое значение частоты [2], рад/с
$1,328 \times 10^6$	$1,321 \times 10^6$
$3,963 \times 10^6$	$3,963 \times 10^6$
$6,602 \times 10^6$	$6,606 \times 10^6$

Из табл. 1 видно, что полученные значения хорошо коррелируют с аналитическим решением и можно сделать вывод, что наш подход к решению поставленной задачи – верный.

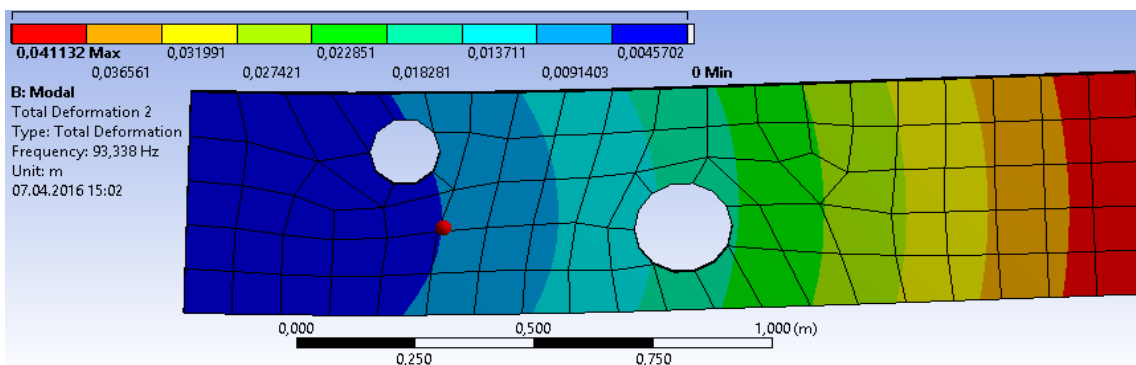


Рис.1 - Деформации нагруженной перфорированной пластины

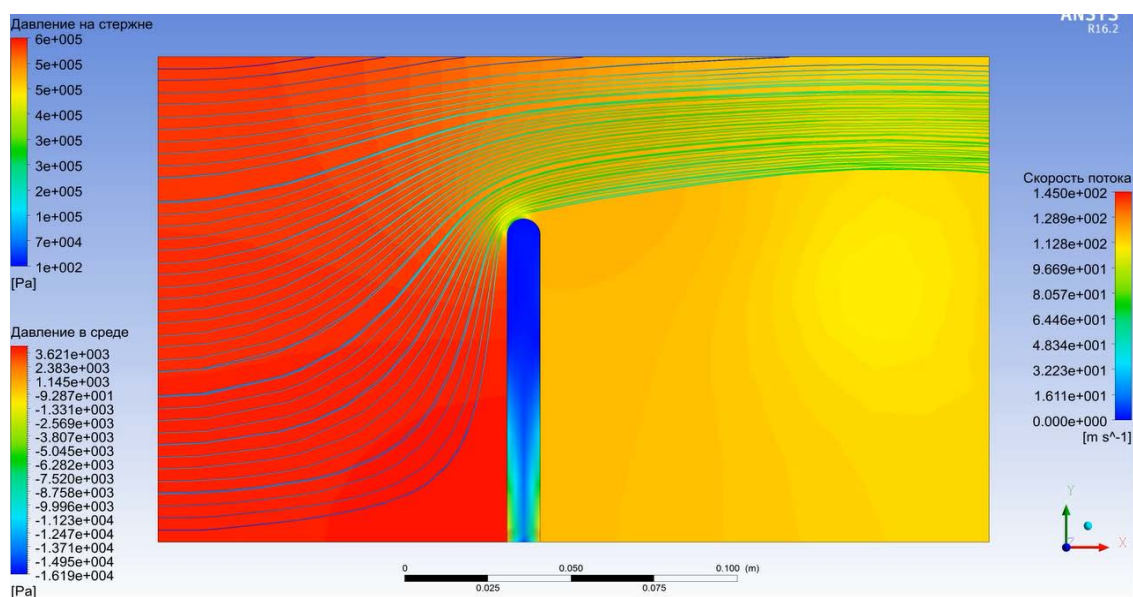


Рис.2 – Обтекание пластины в воздушном канале

В ходе работы были рассчитаны собственные частоты пустых труб, см. Рисунок 2, и труб, по которым течет вода. Было замечено, что при достаточном большом давлении воды, собственные частоты сдвигаются. Результаты исследования данного явления будут использоваться для модернизации стабилизирующих конструкций в элементах высоконапорных гидроэлектростанций.

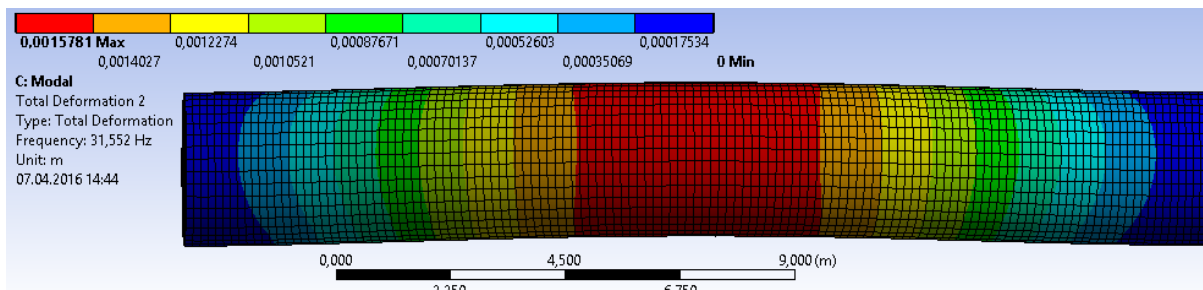


Рис.3 – Деформация трубы при резонансе

Список литературы

1. Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц. Гидродинамика. М. Наука.1986.
2. Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц. Теория упругости. М. Наука.1986.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ
ПРОЦЕССОВ В ПРОТОЧНОМ ТРАКТЕ ГИДРОТУРБИН
ВЫСОКОНАПОРНЫХ ГЭС С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ИХ
РАБОТЫ**

Нелюб А.Э., Платонов Д.В.

научный руководитель канд. физ.-мат. наук Минаков А.В.

Сибирский федеральный университет

Гидравлические турбины предназначаются для установки на гидроэлектрических станциях, где они служат для привода электрических генераторов. В турбине энергия воды преобразуется в механическую энергию вращения вала, от которого приводится во вращение ротор электрогенератора (гидрогенератора), преобразующий механическую энергию в электрическую. Электрическая энергия по линиям электропередачи передается в районы потребления, иногда на очень длинные расстояния – до 1000 км и более. Турбина, соединенная с генератором, представляет агрегат ГЭС или гидроагрегат [1]. Гидроэлектростанции (ГЭС) – один из основных источников энергии в современном мире, поэтому повышение надежности и прочности проточного тракта ГЭС актуальная проблема.

Повышение устойчивости работы, увеличение КПД гидромашин невозможно без изучения физических механизмов гидродинамических процессов, существенную роль среди которых играют нестационарные явления, связанные с образованием крупномасштабных вихревых структур. Одним из механизмов генерации пульсаций потока является прецессия вихревого жгута, образующегося за рабочим колесом гидротурбины в режимах недогрузки или перегрузки работы гидротурбины, когда поток после прохождения через гидротурбину имеет достаточно большую остаточную закрутку.

Прецессия вихревого жгута представляет серьезную опасность для гидротурбинного оборудования в связи с мощными пульсациями потока, которые приводят к сильным вибрациям конструкции гидротурбины и в случае резонанса могут привести к разрушению оборудования. Пульсации давления, генерируемые прецессирующим вихревым жгутом, могут также воздействовать на процессы кавитации, усиливая кавитационную эрозию. Кавитация – явление парообразования и выделения воздуха, обусловленное понижением давления в жидкости. Причиной ее возникновения служит кипение жидкости при нормальной температуре и низком давлении [2].

Для прогнозирования резонансных явлений и кавитационной эрозии, поиска методов подавления неустойчивости и кавитации необходима детальная информация о характеристиках пульсационных режимов и структуре потока (распределения мгновенных полей скоростей и давлений). Необходимо отметить, что разрабатываемые подходы для ухода от кавитирующих и нестационарных режимов должны отвечать требованиям минимизации потерь энергии (увеличения КПД гидротурбины), что также может быть реализовано только на основе углубленного понимания гидродинамических процессов, имеющих место в проточных частях гидротурбины.

На кафедре «Теплофизики» СФУ, спроектирован и изготовлен уникальный экспериментальный стенд, в масштабе 1/67.6, воспроизводящий полный проточный тракт гидроагрегата действующей электростанции. Аэродинамический контур стенда содержит в себе все основные функциональные узлы гидротурбины: рабочее колесо, улитку, направляющий аппарат, отсасывающую трубу. Для исследований был выбран

режим работы без рабочего колеса, так называемый холостой пропуск через гидроагрегат. В данном режиме пульсации давления в проточном тракте максимально возможные, во всем диапазоне работы турбины. Помимо всего постройка эксперимента без рабочего колеса значительно упрощает его выполнение, и позволяет провести более качественные измерения.

В ходе работы были изготовлены три различных направляющих аппарата, с разным открытием, для моделирования различных режимов работы. Исследования были проведены для четырех различных расходов (70, 90, 110 и 130 м³/ч), расход варьировался с помощью частотного преобразователя и измерялся с помощью ультразвукового расходомера.

Пульсации давления измерялись с помощью микрофонов в диффузоре отсасывающей трубы.

Предложено несколько конструктивных средств по стабилизации потока:

- Установка крестовины
- Установка ребер



Рис.1 – Общий вид макета гидроагрегата и крестовины с ребрами

Ниже в графиках приведены полученные данные, величина открытия направляющего аппарата значения расхода и посчитанное среднее квадратичное отклонение пульсаций давления для каждого режима.

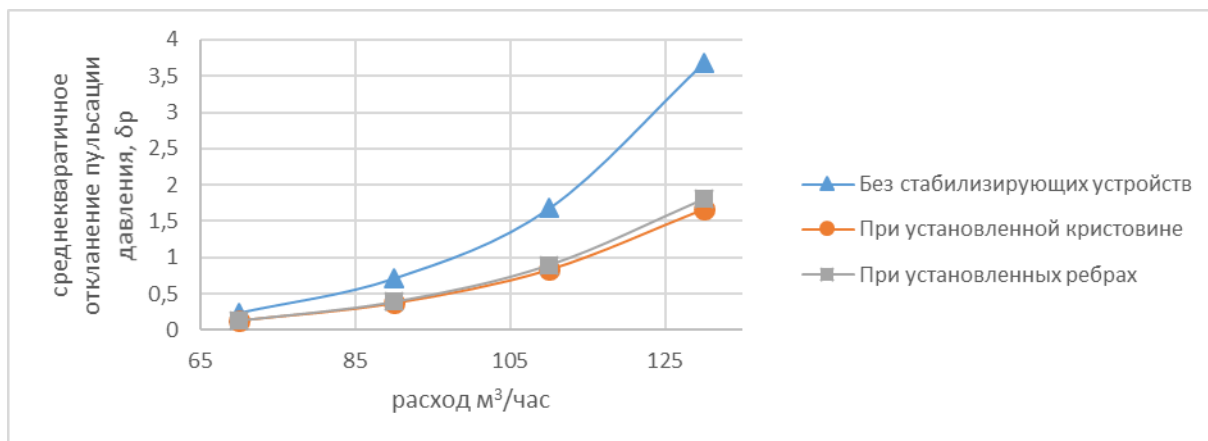


График 1 – Зависимость среднеквадратичного отклонения пульсации давления от расхода, при открытии направляющего аппарата на 18 мм.

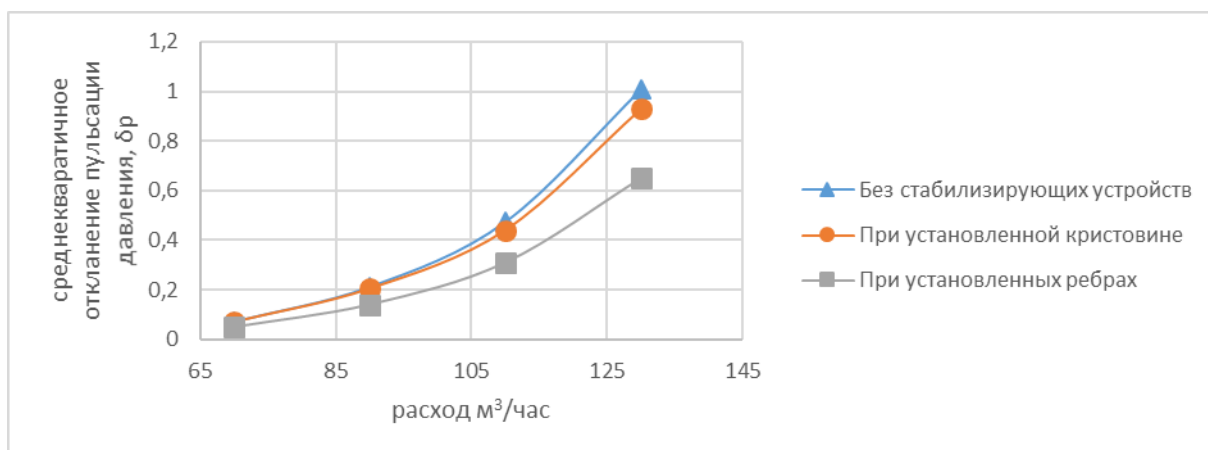


График 2 – Зависимость среднеквадратичного отклонения пульсации давления от расхода, при открытии направляющего аппарата на 24 мм.

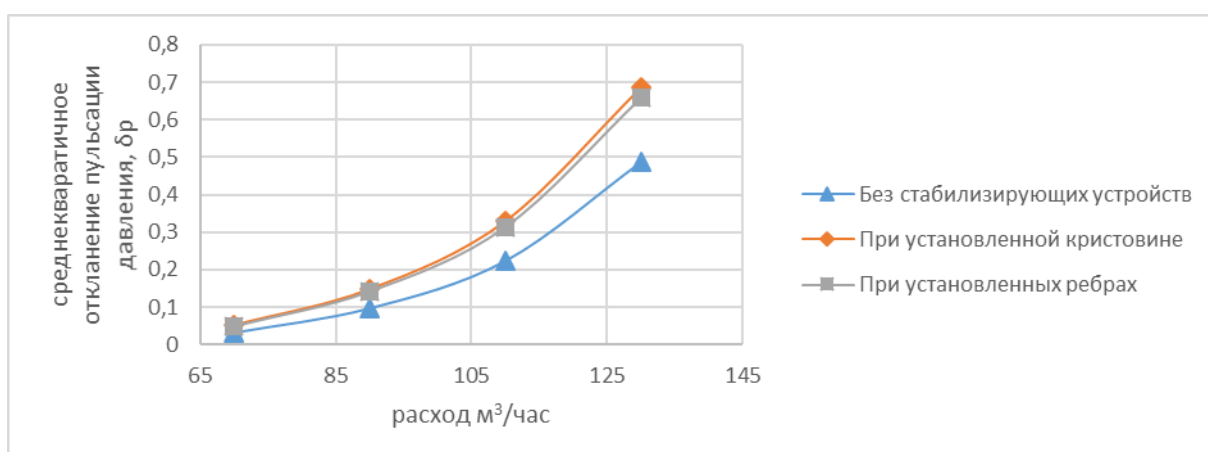


График 3 – Зависимость среднеквадратичного отклонения пульсации давления от расхода, при открытии направляющего аппарата на 34 мм.

Необходимо учитывать, что стабилизирующие конструкции не только подавляют низкочастотные пульсации, но и генерируют мелкие вихри, порождающие значительные пульсации давления более высокой частоты. В связи с этим нецелесообразно использовать ребра большой ширины. Оптимальное значение ширины ребер лежит в диапазоне 7 – 15% от радиуса входа, дальнейшее увеличение ведет к росту пульсаций.

В результате отрыва течения от задней кромки ребра распределение интенсивности пульсаций давления по стенке отсасывающей трубы становится сильно неравномерным: перед ребром пульсации значительно снижаются, а за ним появляется область, подвергающаяся пульсациям в зоне отрыва от ребра. В данной области возможно развитие кавитации, и как следствие, кавитационной эрозии. Эти обстоятельства необходимо учитывать при анализе эффективности стабилизирующих конструкций. В частности, нецелесообразно использовать больше шести ребер, так как зоны отрыва в этом случае занимают около половины площади стенки участка отсасывающей трубы, на котором расположены ребра

Экспериментально показано, что и ребра, и крестовина существенно снижают пульсации давления в диффузоре отсасывающей трубы. В частности, установка в диффузор отсасывающей трубы шести ребер для открытия направляющего аппарата $A_0 = 18$ мм приводит к снижению пульсаций давления для всех расходов на 40 – 45%, для открытия $A_0 = 24$ мм снижение составляет 25 – 30%. Для открытия направляющего аппарата $A_0 = 34$ мм установка ребер дает небольшое повышение пульсаций давления, и показывает значения на уровне $A_0 = 24$ мм с использованием ребер. Данный факт можно объяснить тем что для открытия $A_0 = 34$ мм наблюдается минимальная закрутка потока и пульсации давления так же минимальны среди всех режимов даже без использования ребер. Установка же стабилизирующих конструкций на данных режимах может наоборот вносить дополнительное возмущение потока при обтекании.

Крестовина показывает результат немного хуже, уже для открытия $A_0 = 24$ мм, результаты с крестовиной и без неё практически не отличаются друг от друга. Однако, как уже было сказано выше пульсации на данных режимах даже без использования стабилизирующих средств, достаточно низкие и их рост незначительный.

В целом по итогам эксперимента можно сказать что стабилизирующие конструкции показали себя очень хорошо, и подтвердили свою эффективность, и их можно рекомендовать для эксплуатации на реальных гидроагрегатах.

Список литературы:

1. Кривченко Г. Гидравлические машины, турбины и насосы.
2. Персол И. Кавитация. Под редакцией, с предисловием и дополнением д-ра техн. наук, проф. Л. А. Эпштейна.
3. А.В. Минаков, Д.В. Платонов, А.В. Сентябов, И.М. Пылев, А.В. Захаров, Применение методов математического моделирования для анализа низкочастотных пульсаций давления в проточном тракте высоконапорной ГЭС / А. В. Минаков [и др.] // Гидротехническое строительство. - 2015. - № 1. - С. 29-36



ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОДЪЕМА ПОДОВЫХ БЛОКОВ В КАТОДНЫХ УСТРОЙСТВАХ АЛЮМИНИЕВЫХ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Орлов А.С.

научный руководитель д-р тех. наук Прошкин А.В.

Сибирский федеральный университет

Подъем подовых блоков в промышленных алюминиевых электролизерах вызывается несколькими механизмами. Одним из основных механизмов является образование солевой линзы между подовыми блоками и огнеупорным материалом. Рост этой линзы приводит к ускорению процесса эрозии катодных блоков и как следствие снижению срока службы самого электролизера. Солевые линзы оказывают эффект выталкивания, вызванного кристаллизационным давлением («подъем вымораживанием»). Механизм их образования не изучен до конца, но главной причиной, вероятно, является реакция между жидким электролитом, фильтрующимся через поры, с углеродом и жидким алюминием, попавшим через трещины [1]. Механическое разрушение катодных блоков, приводящее к остановке электролизера, будет происходить, если это избыточное давление превосходит прочность пористого материала. Вместе с этим подъем катодных блоков может вызвать значительную деформацию блюмсов. Наибольшие деформации обычно наблюдаются в точке, где блюмс выходит из подового блока и где имеется также достаточно высокая температура, чтобы сделать сталь легкодеформируемой [2].

Целью данной работы является исследование процесса подъема подовых блоков, и минимизации роста солевой линзы с помощью математического моделирования. Математическое моделирование является ценным инструментом, который может помочь в оптимизации конструкции футеровки катодного устройства, что позволит минимизировать рост линзы в течение всего периода эксплуатации электролизера, что повысит его срок службы.

В процессе работы электролизера происходит непрерывная фильтрация электролита в подину катода. Под действием гидростатического давления и капиллярных сил электролит вытесняет воздух из пор футеровочных материалов. Расплав внедряется через угольный блок и реагирует в определенных пределах с огнеупорным материалом с образованием плотного стекловидного и непроницаемого барьера при 800-840 °С, что останавливает или существенно сдерживает дальнейшее внедрение в подину. В расчете этот процесс учитывался повышением вязкости электролита при его прохождении через огнеупорный слой. Для решения задачи использовался VOF метод [3]. Далее представлены полученные результаты:

На рисунке 1 представлено сравнение результатов расчета с данными SINTEF и с натурными данными для некоторых промышленных ванн. Поскольку ванны отличаются по своим размерам, сопоставление данных производилось по массе расплава, проникающего через единичную площадку. Видно, что расчет качественно совпадает с натурными данными. Также по расчетной линии видно, что активное проникновение электролита в огнеупорный материал начинается после двух месяцев работы электролизера. За это время идет пропитка электролитом только подовых блоков. Моделирование таким образом дает возможность прогнозирования только до 1,5 лет эксплуатации ванн.

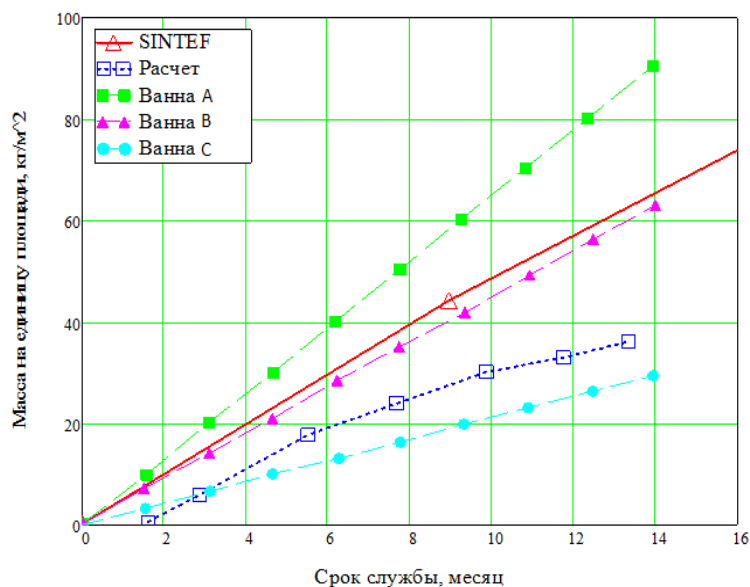


Рис.1- Динамика поступления расплава в катодное устройство

На рисунке 2 представлено сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными (SINTEF) для роста линзы со скоростью проникновения электролита в подину. Вязкость электролита варьировалась от 30 до 55 П·с. Видно, что расчеты, проведенные таким образом позволяют довольно качественно охарактеризовать динамику роста линзы.

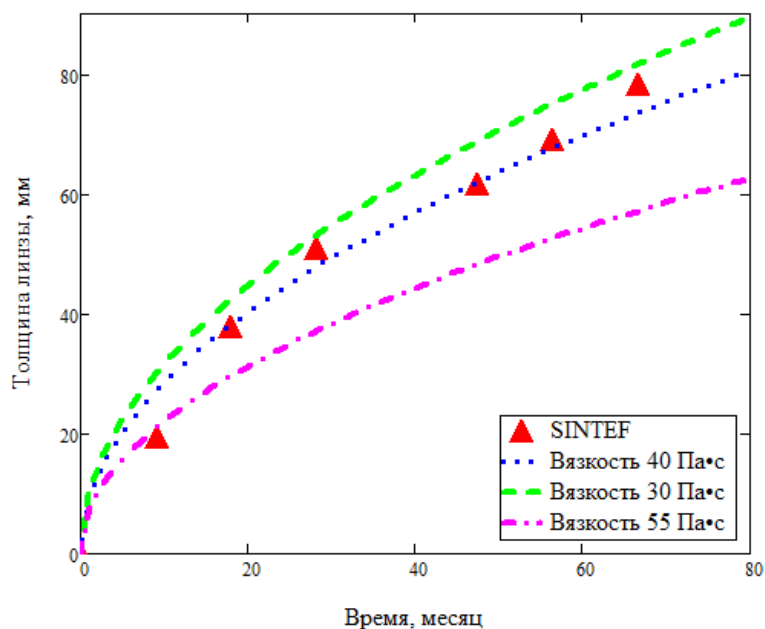


Рис.2 - Динамика роста линзы

Разработанная математическая модель, позволяет моделировать теплофизические процессы проникновения электролита и образования линзы вплоть до 1,5 лет эксплуатации электролизера. Для прогнозирования динамики роста линза после

полтора лет требуется корректировка модели, которая бы позволила осуществлять изменение расчетной области в процессе моделирования.

Список литературы

1. Мартен Сорлье. Харальд А. Ойя. Катоды алюминиевого электролизера // Пер. с английского П.В. Полякова; Красноярск: Версо, 2013.
2. S. Pietrzyk, P. Palimaka, W. Gebarowski, The Effect of Liquid Aluminium on the Corrosion of Carbonaceous Materials // Archives of Metallurgy and Materials, volume 59, 2014.
3. Hirt C.W. Volume of fluid (VOF). Method for the dynamics of free boundaries. / C.W. Hirt, B.D. Nichols // Journal of computational physics. 1981. № 39. P.-201-226.



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССООБМЕНА В МАГНИТНЫХ НАНОЖИДКОСТЯХ.

Родионова Т.О., Пряжников М.И.

научный руководитель канд. физ.-мат. наук Минаков А.В.

Сибирский федеральный университет

Наножидкости на основе ферромагнитных материалов могут быть крайне интересными и полезными во многих приложениях. Свойства этих жидкостей существенно меняются под действием электромагнитного поля. [1-2]. Это открывает широкие возможности по управлению процессами теплообмена. Поэтому изучение процессов теплообмена в магнитных наножидкостях, является крайне актуальной задачей.

В данной работе проведено экспериментальное исследование поведения ферромагнитной наножидкости в постоянном магнитном поле. Установка по исследованию представляет собой цилиндрический канал, выполненный из стекла, с внутренним диаметром 6 мм и длиной 50 см. Трубка с помощью шлангов соединена с насосом и с ёмкостью с жидкостью. Снизу к стеклянной трубке подносится постоянный неодимовый магнит, размерами 50x30x10 мм. По трубке прокачивалась дистиллированная вода с наночастицами. Частицы взаимодействовали с магнитным полем и осаждались на стенку трубки.

Исследование процесса осаждения частиц проводилось для ферромагнитной жидкости на основе воды с частицами Fe_3O_4 . Концентрация частиц была очень низкая, и была равна 10^{-3} %. Таким образом, что жидкость являлась практически прозрачной. В работе было рассмотрено два размера наночастиц 50 нм и 100 нм. Электронная микроскопия порошков показана на рис.1. Электронная микроскопия выполнена в ЦКП СФУ.

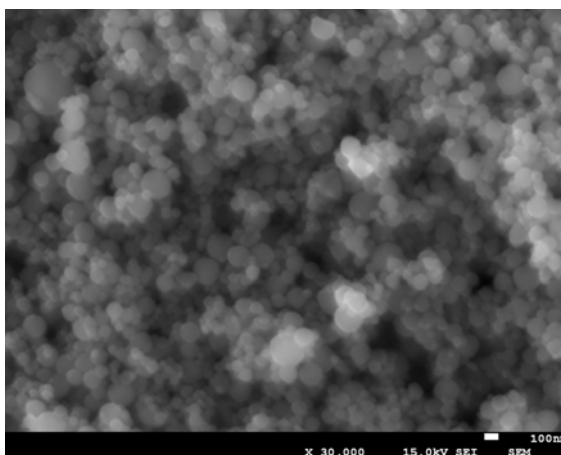


Рис. 1 - Электронная микроскопия

Для приготовления наножидкостей применялся стандартный двухшаговый метод. Необходимое количество порошка добавлялось в жидкость, после чего полученная суспензия тщательно механически перемешивалась. Чтобы разрушить конгломераты наночастиц суспензии подвергались обработке в ультразвуковой ванне «Сапфир ТЦ-10338» в течение 45 минут.

Рассматривалось постоянное магнитное поле, создаваемое неодимовым магнитом (рис. 2). Видно, что вблизи поверхности магнита поле достигает порядка 0,2Тл.

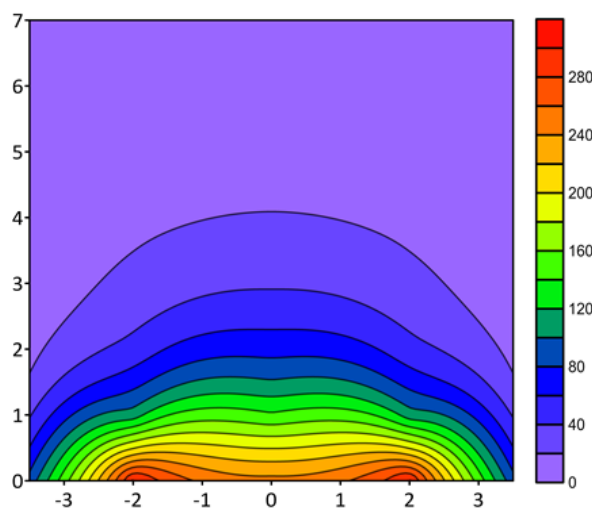


Рис.2 - Измеренная магнитная индукция над магнитом (в мТ)

Для фиксации процесса осаждения частиц по трубке в постоянном магнитном поле использовалась высокоскоростная камера. Жидкость прокачивалась с постоянным расходом, значение которого соответствовало числу Рейнольдса $Re=1665$. Было рассмотрено три варианта положения магнита y_m : под трубкой $y_m=0$, ниже трубки на $y_m=14$ мм и $y_m=28$ мм. Результаты исследования представлены в виде последовательных кадров (через каждые 10 секунд) на рис. 3-5.

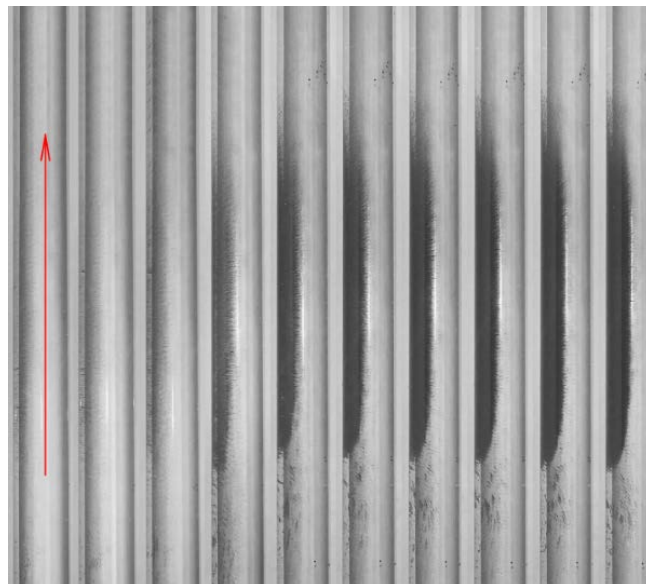


Рис.3 - Осаждение частиц в постоянном магнитном поле при $y_m=0$

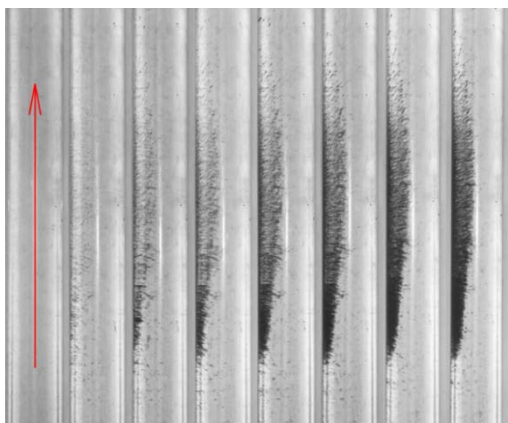


Рис.4 - Осаждение частиц в постоянном магнитном поле при $y_m=14$ мм

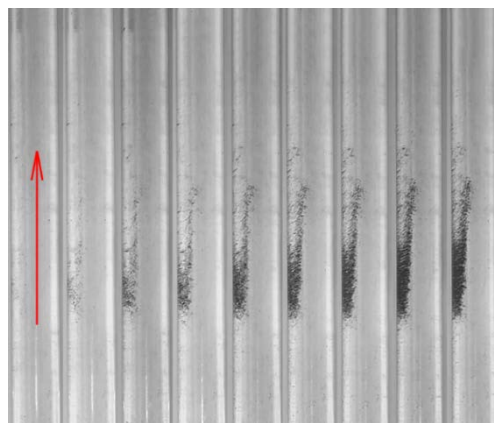


Рис.5 - Осаждение частиц в постоянном магнитном поле при $y_m=28$ мм

На рис. 6 представлен график динамики высоты осаждения частиц в постоянном магнитном поле при разном положении магнита. Высота осаждения представлена в относительных единицах (по отношению к диаметру трубки). Из графика видно, что с ослаблением поля высота осадений снижается.

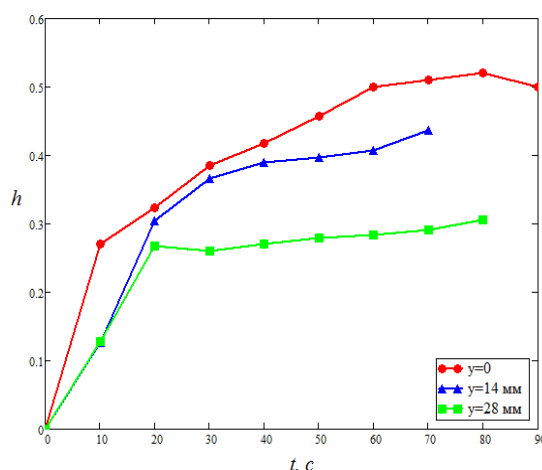


Рис.6 - Динамика роста высоты осаждения частиц в постоянном магнитном поле при разном положении магнита

Из выше представленных данных (рис.3-6) можно сделать вывод, что с течением времени высота осаждения частиц растёт. Примерно через минут с начала эксперимента достигает максимума. Далее устанавливается динамическое равновесие между осаждением и уносом частиц, и форма отложений стабилизируется. Также очевидно, что положение магнита (магнитное поле) влияет на форму осаждения частиц: чем меньше магнитное поле, тем больше частиц уносится потоком и тем меньше их оседает на трубке.

Список литературы

1. Рудяк В.Я. Моделирование коэффициентов переноса наножидкостей. Наносистемы: физика, химия, математика, С. 156–177
2. Фокин Б.С. Письма в ЖТФ. Журнал технической физики, № 10. С. 1–5

МЕТОД РЕГИСТРАЦИИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ И ВЕРХОВЫХ ПОЖАРОВ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

Усатая Ю. О.

научный руководитель канд. техн. наук, ст. науч. сотр. Пономарев Е. И.

Сибирский федеральный университет

На территории Сибири ежегодно фиксируются лесные пожары (ЛП) на площадях до 17 млн. га [1]. Прогнозируется дальнейшее возрастание частоты возникновения и интенсивности пожаров, в том числе в зоне бореальных лесов Сибири [2, 3]. В связи с этим актуальна разработка новых методов детектирования пожаров и прогнозирования уровня воздействия на леса. В частности, – детектирование верховые пожаров и пожаров экстремальной интенсивности позволит прогнозировать уровень послепожарных изменений.

В связи с большим охватом территории, оперативный мониторинг ЛП в современных условиях может быть проведен только с использованием спутниковых систем. Сегодня официально до 51% лесов отнесено под спутниковые методы мониторинга. Данная работа выполнена с использованием банка данных лесных пожаров Сибири за период 1996 – 2015 гг. Института леса им. В.Н Сукачева СО РАН.

Основная цель работы – разработка технологии детектирования экстремальных и верховых пожаров дистанционными методами и адаптация имеющихся подходов для условий Сибири.

Исходная информация включала динамику 20 пожаров, для которых была восстановлена динамика мощности теплоизлучения активных зон на основе более ста наблюдений для каждого случая пожара. Выборка пожаров охватывала период 2012 – 2015 гг., были представлены данные для различных лесорастительных районов Сибири.

На основе спутниковой съемки TERRA/Modis в среднем инфракрасном ($\lambda \sim 4$ мкм) диапазоне для активной зоны пожара вычислялся показатель мощности теплоизлучения. В зарубежных публикациях такая характеристика известна как Fire Radiative Power (FRP) [4]. Мощность тепловыделения, связанная с количеством сгорающей растительной биомассы, может рассматриваться как критерий при оценках уровня воздействия огня на древостой. Особенно эффективно такой показатель применим в случаях пожаров с экстремальной мощностью теплоизлучения, включая верховые

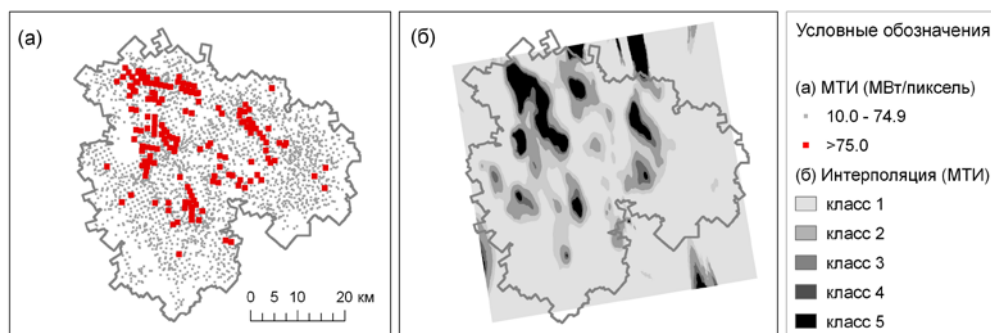


Рис.1 - Пример обработки данных о динамике мощности тепловыделения на различных стадиях развития пожара. (а) исходный набор попиксельных измерений, красным выделены точки с экстремальными значениями МТИ; (б) результат интерполяции по уровню МТИ

Классификация отдельных участков пожаров по мощности позволяет в перспективе перейти к решению обратной задачи оценки количества сгорающих горючих материалов и уровня воздействия огня на древостой. Такая информация позволит повысить точность оценок пожарных эмиссий, воздействия огня на древостой на локальном и на глобальном уровне.

На основе метеорологических данных, установили динамику показателя пожароопасности ПВ-1 в районе действия лесного пожара

Получены следующие результаты.

Впервые для пожаров на территории Сибири адаптирована технология оценки мощности теплоизлучения от активной зоны пожара на основе спутниковых съемок TERRA/Modis. Установлено, что доля пожаров с экстремальными характеристиками тепловыделения составляет $8,0 \pm 2,18\%$ от общего числа. Не менее 15% от среднегодовой площади лесных пожаров площади составляют участки, пройденные высокоэнергетическими и/или верховыми пожарами.

Установлен уровень зависимости мощность теплоизлучения от пожара от внешних факторов (уровень пожарной опасности по условиям погоды, преобладающий древостой). В первом приближении эта связь описывается экспоненциальной функцией с достоверностью аппроксимации на уровне 0,94.

Дано количественное описание различий мощности теплоизлучения от активной зоны пожара в лесах Сибири с преобладанием сосновых и лиственничных насаждений.

Список литературы

1. Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г. Климатические изменения и лесные пожары в России // Лесоведение, 2013, 5. С. 50–61.
2. De Groot W.J., Cantin A.S., Flannigan M.D., Soja A.J., Gowman L.M., Newbery A. A comparison of Canadian and Russian boreal forest fire regimes // For. Ecol. and Manag., 2013. 294. P. 23–34. DOI:10.1016/j.foreco.2012.07.033.
3. Forkel M., Thonicke K., Beer C., Cramer W., Bartalev S., Schmullius C. Extreme fire events are related to previous-year surface moisture conditions in permafrost-underlain larch forests of Siberia // Environ. Res. Lett., 2012, 7, 044021: 9. DOI:10.1088/1748-9326/7/4/044021.
4. Kaufman Y., Remer L., Ottmar R., Ward D., Rong-R L., Kleidman R., Fraser R., Flynn L., McDougal D., Shelton G. Relationship between remotely sensed fire intensity and rate of emission of smoke: SCAR-C experiment // In J. Levine (Ed.), Global biomass burning. MA: MIT Press. 1996. P. 685– 696.



ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ ПОРЯДОК-БЕСПОРЯДОК И БАРОКАЛОРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В ОКСИФТОРИДАХ

Цыганков Р.В.

научный руководитель д-р физ.-мат. наук Флёров И.Н.

Сибирский федеральный университет

В последние годы наряду с модернизацией рефрижераторных устройств различного масштаба, работающих на газообразных хладагентах, научным и инженерным сообществами развивается направление, связанное с использованием калорических эффектов различной физической природы в твердотельных материалах [1,2]. Это связано, в частности, с опасностью большинства жидких хладагентов: они могут отрицательно влиять как на здоровье человека (вследствие токсичности), так и на окружающую природу в целом, разрушая озоновый слой и увеличивая количество парниковых газов в атмосфере.

Калорический эффект (КЭ) - процесс обратимого изменения энтропии (экстенсивный КЭ) или температуры (интенсивный КЭ) вещества в условиях изотермического или адиабатного изменения внешнего поля Y (магнитного H , электрического E , механических напряжений или давления p). Это явление обусловлено взаимодействием поля с микроструктурными составляющими самого тела (ионами, ядрами, диполями и т.д.). В зависимости от природы внешнего воздействия можно выделить магнето- (МКЭ), электро- (ЭКЭ) и баро- (БКЭ) калорические эффекты.

При наложении внешнего поля Y происходит упорядочение микроструктурных составляющих, что в свою очередь приводит к изменению энтропии или температуры тела в целом (Рис. 1)

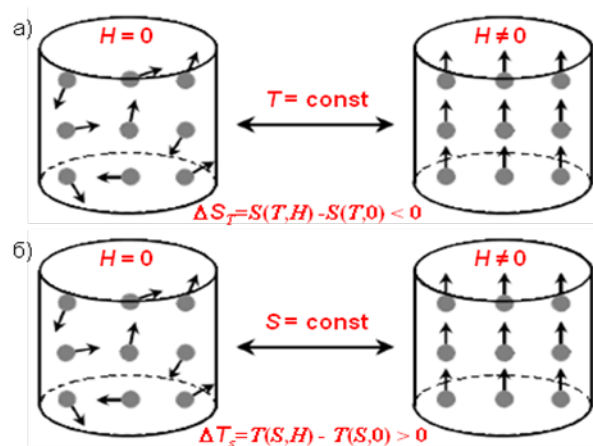


Рис.1 - Схематическое изображение влияния внешнего поля в: а) изотермическом и б) адиабатическом процессах (ΔT_{ad} – интенсивный КЭ; ΔS – экстенсивный КЭ.)

Физическая сущность КЭ в твердых телах заключается в следующем:

в адиабатном процессе изменения Y энтропия твердого тела S_{ss} , представляющая собой сумму решеточной энтропии S_{LAT} и энтропии ферроидной подсистемы S_{FER} , остается постоянной.

$$S_{ss} = S_{LAT} + S_{FER} = const$$

$$dS_{ss} = d(S_{LAT} + S_{FER}) = 0$$

Изменение внешнего поля вызывает изменение обобщенной координаты X (параметра фазового перехода – поляризации, намагниченности, упругой деформации или объема)

$$dY > 0 \rightarrow dX \neq 0$$

$$dS_{FER} < 0, dS_{LAT} > 0$$

$$\Delta T > 0$$

При адиабатном изменении $\pm dX$ происходит обратимая перекачка энтропии (теплоты) между решеточной и ферроидной подсистемами.

В течение долгого времени исследование КЭ считалось малоперспективным в силу незначительности проявления данного эффекта. Однако в соответствии с уравнениями Максвелла изменение энтропии под влиянием внешнего поля определяется температурной производной параметра порядка (1)-(3):

$$\left(\frac{\partial S}{\partial E}\right)_{T,p,H} = \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_{E,p,H} \quad (1); \quad \left(\frac{\partial S}{\partial p}\right)_{T,E,H} = \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_{p,E,H} \quad (2);$$

$$\left(\frac{\partial S}{\partial H}\right)_{T,p,E} = \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_{H,p,E} \quad (3).$$

Величина этой производной является максимальной в окрестностях температуры перехода. Отсюда очевидно, что перспективными являются материалы, испытывающие фазовые переходы. Более того, значительное изменение энтропии тела происходит при превращениях типа порядок-беспорядок., которые, в частности, имеют место во фтор-кислородных соединениях.

Настоящая работа посвящена исследованию БКЭ в двух оксифторидах $Rb_2KMoO_3F_3$ и $(NH_4)_2KW_0_3F_3$, относящихся к семейству эльпасолита (K_2NaAlF_6 , пр. гр. Fm-3m, Z=4) и испытывающих при понижении температуры сегнетоэластические превращения, сопровождающиеся упорядочением структурных элементов. Показана существенная зависимость барокалорической эффективности материалов от степени разупорядочения структурных элементов в исходной кубической фазе и величины барического коэффициента dT/dp .

Для определения величин интенсивного и экстенсивного БКЭ использованы экспериментальные данные о температурных зависимостях изобарной теплоемкости при атмосферном давлении, влиянии давления на энтропии и температуры фазовых переходов.

Так как в структуре фторкислородных кристаллов преобладают ионные связи, то вполне обоснованно можно предположить, что внешнее давление оказывает основное влияние на поведение энтропии структурного фазового перехода ΔS . Существенное изменение остальных составляющих энтропии, в том числе и решеточной, в исследуемом диапазоне сравнительно невысоких давлений, практически отсутствует. Температурные зависимости решеточной энтропии $S_{LAT}(T)$ и аномальной составляющей $\Delta S(T)$ получены интегрированием функций $(C_{Lat}/T)(T)$ и $[(C_p/T) - (C_{Lat}/T)](T)$, соответственно. Изменение полной энтропии как функции температуры и давления определялось суммированием энтропий $S_{LAT}(T)$ (не зависящей от давления) и $\Delta S(T)$, сдвинутой по температуре в соответствии с барическим коэффициентом dT_0/dp , определяемым из фазовой T - p диаграммы: $S(T,p) = S_{LAT}(T) + \Delta S(T + pdT_0/dp)$. Давление не меняет и энтропию фазового перехода ΔS , поскольку не меняется число возможных состояний для упорядочивающихся элементов до и после перехода.

Величина экстенсивного БКЭ для каждого давления определялась как разность энтропий под давлением и при $p=0$ $\Delta S_{\text{BCE}}(T,p)=S(T,p)-S(T,0)$ из данных, показанных на рис. 2а и 3а. Так как интенсивный БКЭ реализуется при $S=\text{const}$, то зависимости $\Delta T_{\text{AD}}(T,p)$ были определены с использованием данных о $S(T,p)$, исходя из условия $S(T,p)=S(T+\Delta T_{\text{AD}},0)$.

Результаты исследований представлены на рисунках и в Таблице 1.

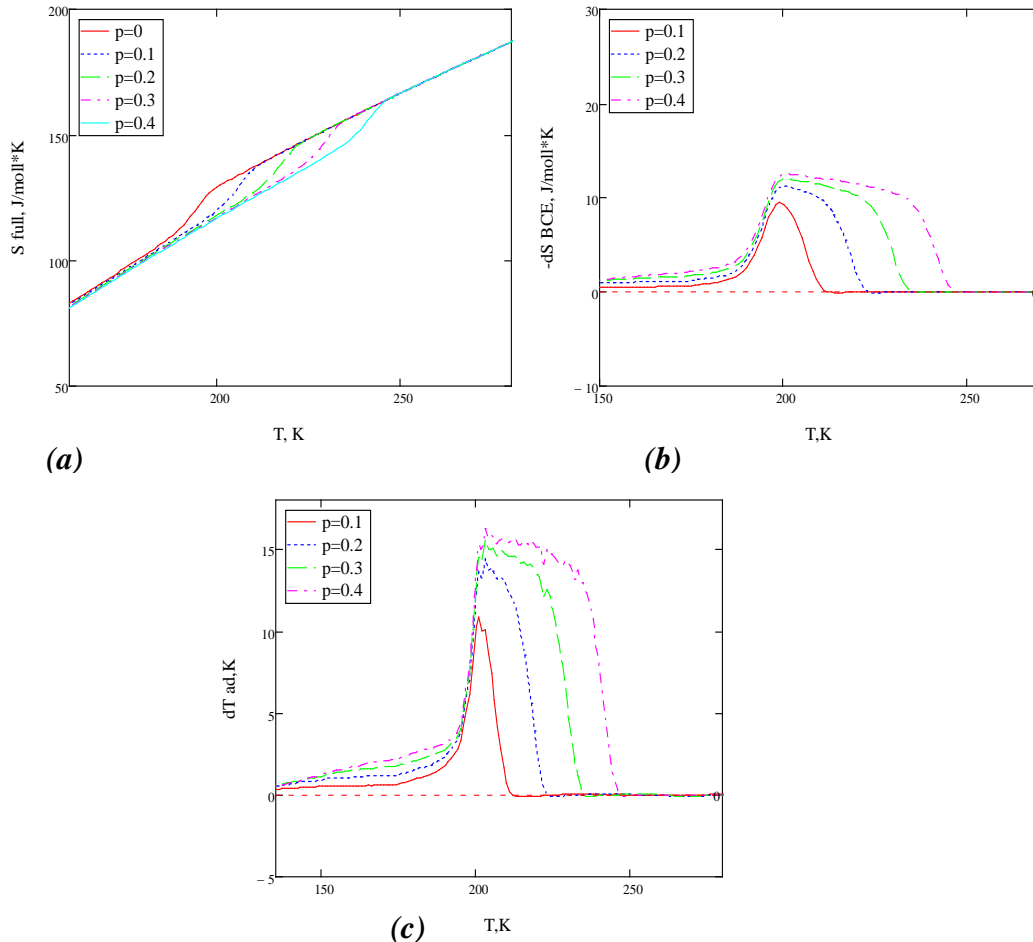
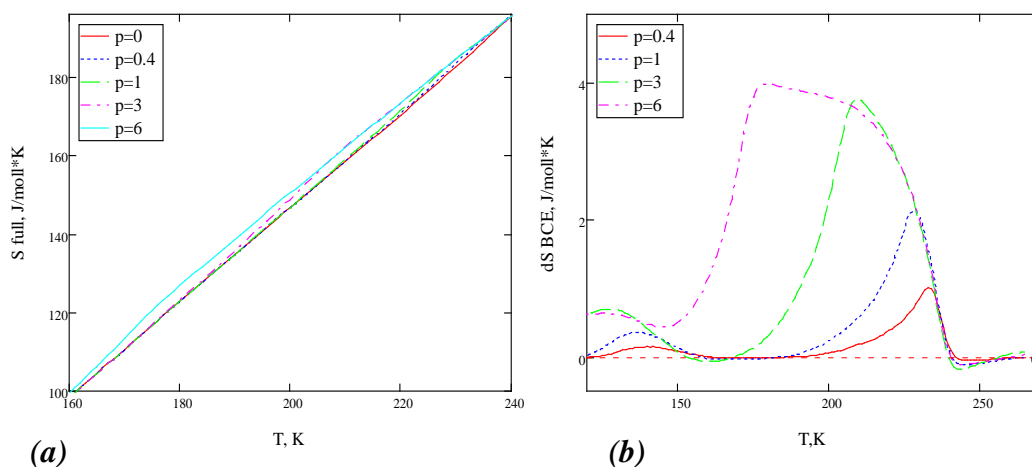


Рис.2. Зависимости от температуры и давления (ГПа) полной энтропии (а), экстенсивного (б) и интенсивного (с) КЭ в $\text{Rb}_2\text{KMoO}_3\text{F}_3$.



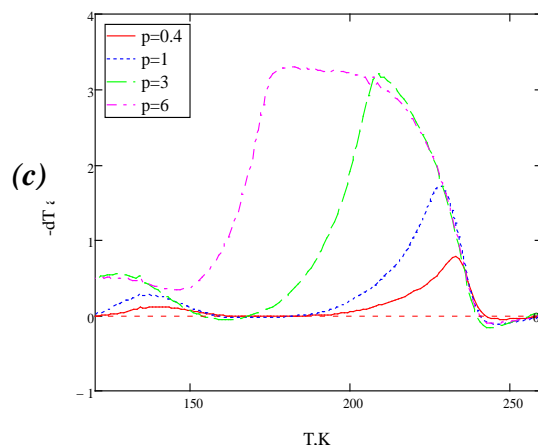


Рис.3 - Зависимости от температуры и давления (ГПа) полной энтропии (а), экстенсивного (б) и интенсивного (с) КЭ в $(NH_4)_2KW_03F_3$

Таблица 1. Сравнение $\Delta S_{BKЭ}$ и ΔT_{AD} некоторых эльпасолитов при $p = 0.4$ ГПа.

Кристалл	T_0, K	$\Delta S,$ Дж/(моль К)	$dT_0/dp,$ К/ГПа	$\Delta S_{BKЭ},$ Дж/(моль К)	$\Delta T_{AD}, K$
$Rb_2KMoO_3F_3$	195	13.9	117	- 12	15
$(NH_4)_2KW_03F_3$	235	4.4	-10.8	1.01	-0.78
Rb_2KTiOF_5 [1]	215	17	110	- 16	15
Rb_2KFeF_6 [2]	180	15.6	132	- 16	18

Как видно из Рисунков 2б и 2с, при увеличении давления замедляется рост значений энтропии $\Delta S_{BKЭ}$ и изменения температуры ΔT_{AD} $Rb_2KMoO_3F_3$, но, расширяется область температур, в которой проявляется данный КЭ. Из этого следует, что уже при невысоких давлениях можно получить БКЭ, близкий к максимально возможной величине. Значительно меньшие величины БКЭ для $(NH_4)_2KW_03F_3$ обусловлены меньшей величиной энтропии фазового перехода и значительно меньшим барическим коэффициентом (Таблица 1).

Таблица 1 также показывает, что в соединениях с одинаковым составом одновалентных катионов Rb_2K , но существенно различающихся композицией анионных групп MeO_xF_{6-x} , реализуются близкие по величине БКЭ при одном и том же давлении.

Список литературы

1. X. Moya, S. Kar-Narayan and N. D. Mathur, Nature Materials **13**, 439 (2014).
2. И.Н. Флёргов, Е.А. Михалёва, М.В. Горев, А.В. Карташев, ФТТ, **57**. 421 (2015).
3. V.D. Fokina, I.N. Flerov, M.S. Molokeev, E.I. Pogorel'tsev, E.V. Bogdanov, A.S. Krylov, A. F.Bovina, V.N. Voronov, and N.M. Laptash, Fiz. Tverd. Tela(St. Petersburg) **50** (11), 2084 (2008) [Phys. Solid State **50** (11), 2175 (2008)].
4. M.V. Gorev, I. N. Flerov, V.N. Voronov, A. Tressaud, J. Grannec, and J. P. Chaminade, Fiz. Tverd. Tela(St. Petersburg) **36** (4), 1121 (1994) [Phys. Solid State **36** (4), 609 (1994)].

ВЛИЯНИЕ ДЕТАЛИЗАЦИИ РАЗНОСТНОЙ СЕТКИ НА РАЗРЕШЕНИЕ ТУРБУЛЕНТНОЙ ВИХРЕВОЙ ДОРОЖКИ ЗА ПОЛУЦИЛИНДРИЧЕСКИМ ТЕЛОМ

Шебелев А.В.

научный руководитель канд. физ.-мат. наук Гаврилов А.А.

Сибирский федеральный университет

В настоящее время, практический интерес к моделированию турбулентных высокорейнольдсовых отрывных течений связан с разрешением вихревой структуры, влияющей на интегральные характеристики течения. Для вычислительной гидродинамики данный класс течений является сложно прогнозируемым по причине нефиксированной точки отрыва потока и развитию нестационарной картины обтекания.

В данной работе было численно исследовано обтекание полуцилиндрического профиля при нулевом угле атаки. Для данного течения имеются экспериментальные данные по силовым характеристикам и распределению давления по контуру [1]. Расчёты выполнены в плоской постановке. Длина хорды – $L=1$ м, число Рейнольдса $Re = \rho UL/\mu = 45000$. Высота расчётной области – $40L$, длина – $20L$, ширина в третьем направлении – $H=1 L$.

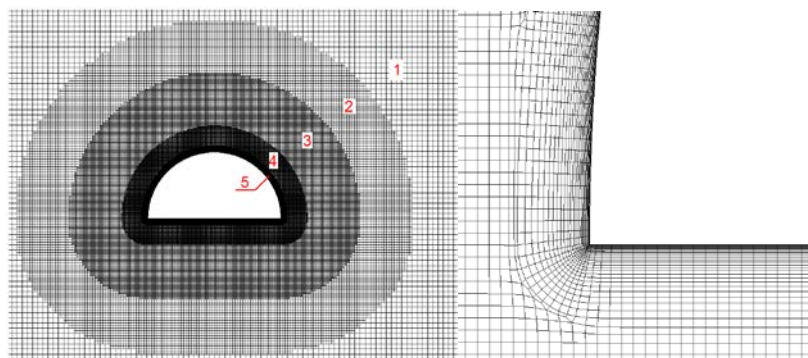


Рис.1 – Визуальное представление сетки.

Расчёт выполнялся на равномерной сетке с выделением вокруг обтекаемого тела 3 дополнительных и одного пристеночного слоя (рис.1). Также для выявления зависимости коэффициентов подъемной силы (C_y) и лобового сопротивления (C_x) от детализации сетки в следе за обтекаемым телом было построено 4 сетки, отличающиеся детализацией в следе. Параметры сеток указаны в таблице 1.

Таблица 1 - Параметры расчётных сеток

Сетка	шаг сетки в области следа	количество ячеек, тыс.
M1	0.02	250
M2	0.04	150
M3	0.08	126
M4	0.16	121

Расчёты выполнялись в программном комплексе *SigmaFlow* [2] в нестационарной постановке, временной шаг составил $0.01 L/U$.

Параметры турбулентного потока задавался масштабом турбулентности $L_t=0.1L$ и интенсивностью турбулентности $u/U=0.015$.

На выходе заданы неотражающие граничные условия, на поверхности обтекаемого тела – условия прилипания, на боковых гранях – условия симметрии. Детализация сетки вблизи стенок достаточна для полного разрешения пристеночного турбулентного слоя без введения пристеночных функций. Для расчета использовались следующие модели турбулентности, основанные на осреднении по Рейнольдсу (RANS): $k-\omega$ SST с поправкой на кривизну линий тока [3] и модели с эллиптической релаксацией $k-\varepsilon-\zeta-a$ и $k-\varepsilon-\zeta-f$ [4].

Результаты и выводы

Приведены результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных для различных моделей турбулентности на сетке M1.

Таблица 2 - Интегральные результаты

Модель турбулентности	Период	C_x	C_y	$rms(C_x)$	$rms(C_y)$
$k-\omega$ SST cc	2.2	0.488	-0.89	0.046	0.314
$k-\varepsilon-\zeta-a$	2.2	0.526	-1.014	0.064	0.252
$k-\varepsilon-\zeta-f$	2.3	0.54	-0.944	0.064	0.208
Эксперимент	–	0.3	-1.1	–	–

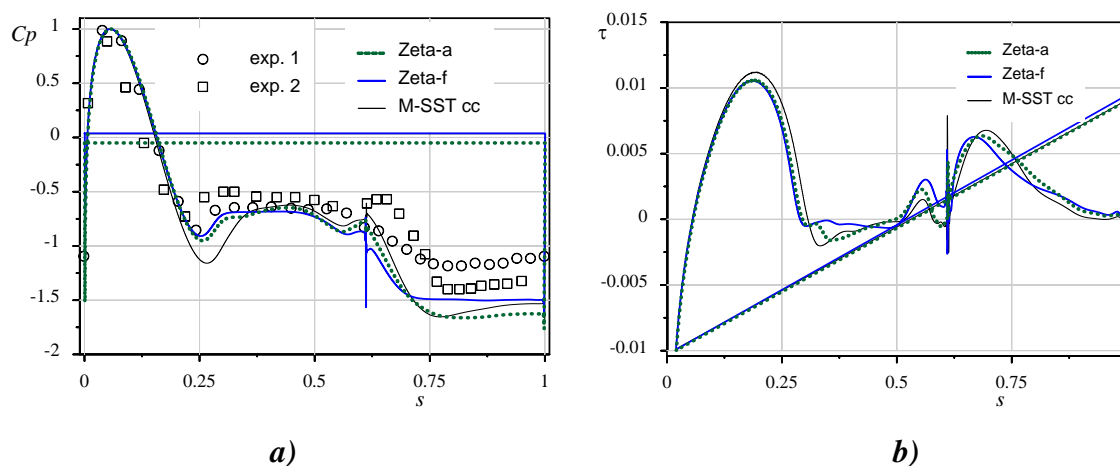


Рис. 2 – Сравнение моделей турбулентности: Распределение осредненного давления (а) и вязкого трения (б) на поверхности

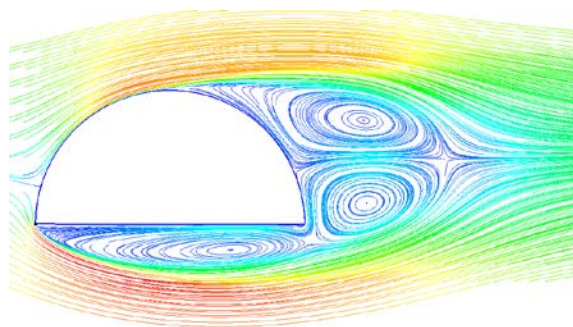


Рис.3 – Линии тока осредненного течения для модели $k-\varepsilon-\zeta-f$.

Модели с эллиптической релаксацией лучше описывают положение точки отрыва потока и корректно воспроизводят величину осредненного давления в точке отрыва (рис.2а). На нижней грани полуцилиндра все модели турбулентности занижают значения давления, что связано с высокой интенсивностью вихревого течения, образующегося под обтекаемым телом (рис. 3). При этом все модели турбулентности сильно завышают коэффициент лобового сопротивления C_x , по коэффициенту подъемной силы C_y немного лучшие результаты дают модели с эллиптической релаксацией и дают погрешность с экспериментальным значением в районе 10%.

В целом моделирование отрывного обтекания с использованием полуэмпирических моделей турбулентности в нестационарной постановке, позволяющей разрешить развитие вихревой дорожки за телом, демонстрирует хорошее совпадение с имеющимися экспериментальными данными.

Таблица 3- Влияние детализации следа. Модель $k-\varepsilon-\zeta-f$.

Сетка	C_x	C_y	rms(C_x)	rms(C_y)
M1	0.5912	-0.96	0.0532	0.318
M2	0.5914	-0.96	0.0532	0.318
M3	0.5914	-0.96	0.0534	0.318
M4	0.5916	-0.958	0.0532	0.318
Эксперимент	0.3	-1.1	—	—

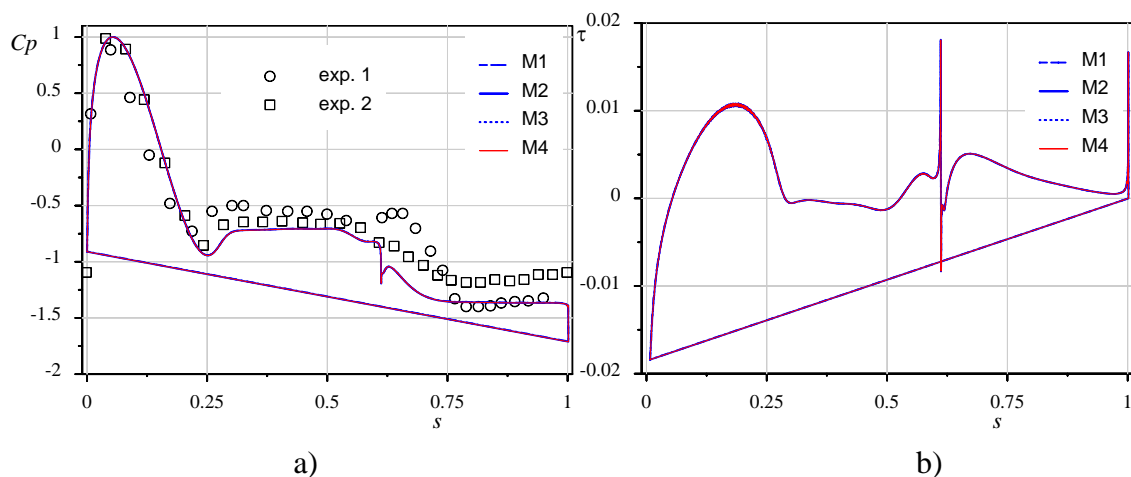


Рис. 4 – Влияние детализации следа за телом на примере модели турбулентности $k-\varepsilon-\zeta-f$. Распределения осредненного давления (а) и вязкого трения (б) на поверхности

Из рис.4 и таблицы 3 можно увидеть, что разрешение следа за телом на расстоянии более $2L$ от тела не влияет на интегральные силы, действующие на обтекаемое тело. Также в ходе вариации сетки в следе за телом было установлено что достаточный размер ячейки для разрешения вихревой дорожки составил $\sim 0.04L$.

Список литературы

- 1) Случановская З.П., Научные труды Института механики. (1973) № 24. С. 52–60.
- 2) Гаврилов А.А., Минаков А.В., Дектерев А.А., Рудяк В.Я. Численный алгоритм для моделирования ламинарных течений в кольцевом канале с эксцентриситетом // Сибирский журнал индустриальной математики. 2010. Т. 13. № 4. С. 3-14.
- 3) Isaev S.A., Baranov P.A., Zhukova Yu.V., Usachov A.E., Kharchenko V.B. J. Engineering Physics and Thermophysics. 2014. V. 87. Iss. 4. P. 1002–1015.
- 4) Hanjalić K., Popovac M. and Hadžiabdić M. A robust near-wall elliptic relaxation eddy viscosity turbulence model for CFD. Int. J. Heat Fluid Flow, (2004) 25(6):1047-1051.



ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ КАПЛИ ВОДЫ В ПОТОКЕ ГАЗА

Шебелева А.А., Чернецкий М.Ю.

научный руководитель канд. физ.-мат. наук Минаков А.В.

Сибирский федеральный университет

Поведение формы капли в потоке газа имеет важное значение для ряда практических приложений, например в области медицинской диагностики, сельского хозяйства, улучшения и оптимизации форсунок грелочных устройств, струйной печати и т.д.

Проведенный литературный обзор показал, что в настоящее время существует достаточно большое количество публикаций, посвященных исследованию формирования капель, их деформации, столкновения и испарения [1-4]. При деформации капли в полете происходит непрерывное изменение ее формы и площади поверхности. Это приводит к изменению интегральных характеристик теплообмена между поверхностью капли и окружающим воздухом. В работе [5], было выявлено, что использование только чисел Вебера и Рейнольдса не позволяет в полной мере описать закономерности деформации капель. Характерные времена и другие основные характеристики «циклов деформации» капель представляют достаточно сложные зависимости, от начальных размеров капли, скоростей капли u , температуры газов, а также свойств жидкости (плотности, вязкости и поверхностного натяжения). Данная особенность должна учитываться при моделировании деформации капель в потоке газа.

Целью настоящей работы являлось: тестирование численной методики и исследование особенностей процессов деформации капель воды, при их движении в потоке газа (воздухе), которая бы учитывала влияние начального размера капель, скоростей, свойств жидкости и газовой среды.

Математическая модель

В данной работе, для моделирования двухфазных течений использовалась численная методика, основанная на методе жидкости в ячейках (VOF метод), которая хорошо зарекомендовала себя для расчета макроскопических течений со свободной поверхностью [6-7]. Для моделирования поверхностного натяжения использовался CSF (continuum surface force) алгоритм. Суть, которого состоит во введении в уравнения движения дополнительной объемной силы F_S - величина, которая определяется из соотношения:

$$F_S = \sigma k \nabla F, \quad (1)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения, k – кривизна свободной поверхности, которая определяется как дивергенция вектора нормали:

$$k = \nabla \left(\frac{n}{|n|} \right), \quad (2)$$

Нормаль к свободной поверхности вычисляется, в свою очередь, как градиент объемной доли жидкой фазы в ячейке:

$$n = \nabla F, \quad (3)$$

При этом на твердой стенке, величина вектора нормали определяется по краевому углу θ смачивания:

$$n = n_w \cos \theta + \tau_w \sin \theta, \quad (4)$$

где n_w , τ_w - нормальный и тангенциальный к стенке вектора.

Постановка задачи и результаты

В данном исследовании была протестирована численная методика расчета двухфазных течений со свободной поверхностью. Для тестирования были взяты экспериментальные данные из работы [5]. На рис.1 представлена геометрия задачи, которая представляет собой прямоугольник с трубкой, из которой вытекает вода. Использовалась осесимметричная постановка. Внутренний диаметр сопла дозатора составляет 2,5 мм.

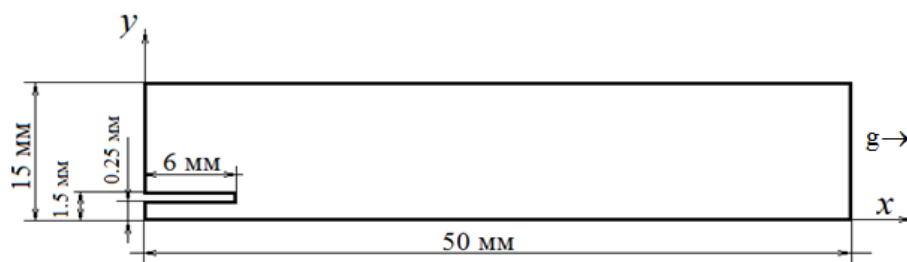


Рис.1 – Геометрия задачи

Процесс движения капле представляет определенную последовательность «деформационных циклов», которая характеризуется кратным повторением их форм. Особую сложность представляет моделирование формирования капле на начальном этапе истечения струи из сопла. Для адекватного описания этого процесса необходимо учитывать геометрию сопла, скорость дозирования жидкости, краевой угол смачивания. На рис.2 представлено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными [5] на этапе формирования капле. Как видно, наблюдается вполне удовлетворительное согласие расчета и эксперимента по динамике формирования капли и форме свободной поверхности.

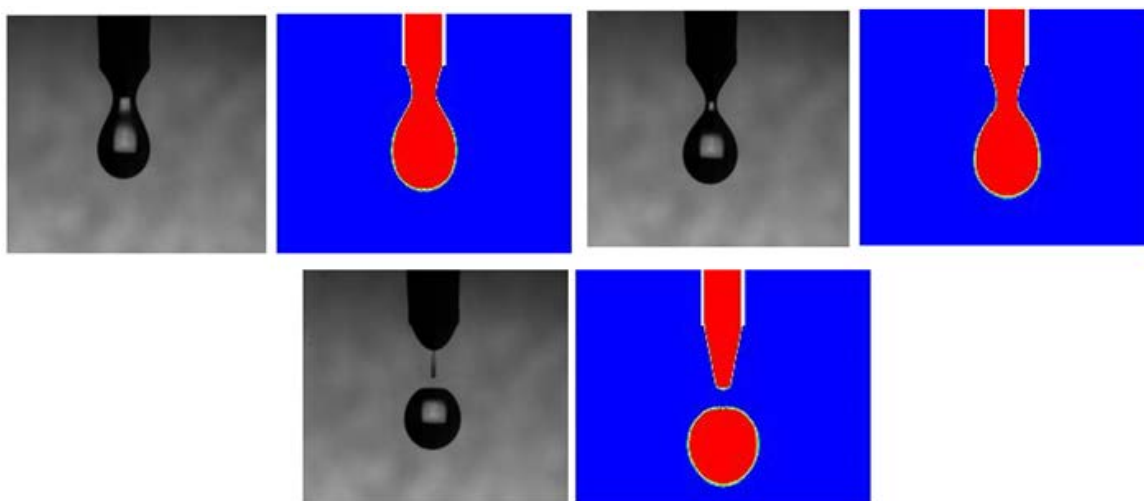


Рис.2 – Эволюция поведения капли на начальном этапе

После того как капля сформировалась, движение капли в потоке сопровождается периодическими колебаниями ее формы. На рис.3. показано сопоставление динамики поведения капли в расчете и эксперименте. Можно отметить, что в целом в сходные моменты времени форма каплей в расчете и эксперименте хорошо согласуется.

Сравнение расчетной формы капли с экспериментальными фотографиями в различные моменты времени показано на рис.4. В расчете мы визуализируем каплю в сечении, в то время как в эксперименте мы видим трехмерную форму капли в перспективе. Тем не менее расчетные формы капли, в основных моментах, похожи на соответствующие экспериментальные фотографии.

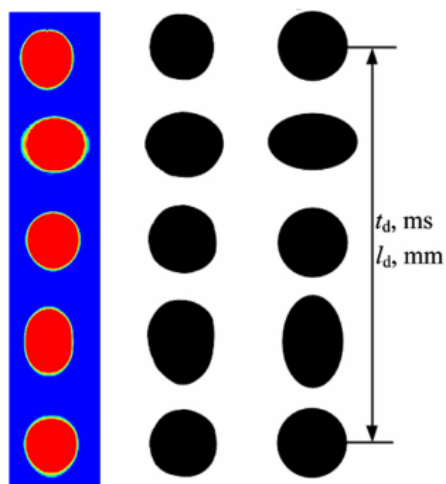


Рис.3 - Типичные формы капель воды а) Результаты расчета; б) Реальная форма капли [5];; в) Идеальная форма капли [5];;

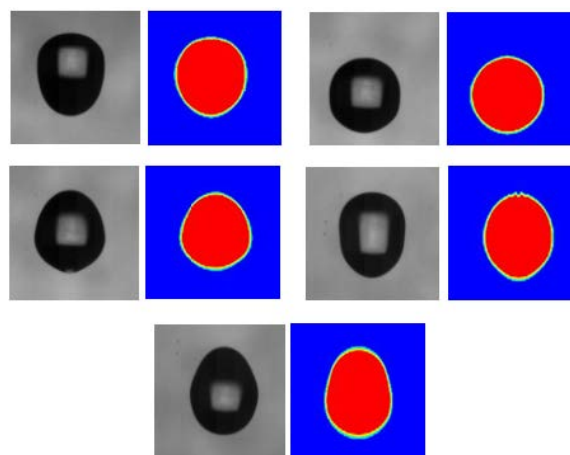


Рис.4 - Форма поверхности капель в расчете и эксперименте в различные моменты времени

Количественное сопоставление расчета и эксперимента показано на рис.5. На графике показано поведение относительной амплитуды вертикальных колебаний капли во времени, отнесенного к периоду колебаний. Как видно, амплитуда колебаний со временем затухает. Частота и амплитуда колебаний в расчете и эксперименте совпадают.

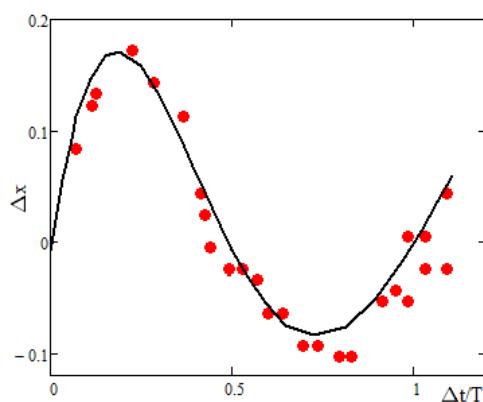


Рис.5 - Зависимость вертикальной относительной амплитуды колебания капли в потоке. Красные точки -расчет

Заключение

Разработана математическая модель и численная методика расчета деформирования капель в потоке газа. Модель основана на методе жидкости в ячейках и алгоритме CSF (continuum surface force) для расчета поверхностного натяжения. Проведена серия расчетов падения и деформирования капель воды. Результаты моделирования сопоставлены с данными натурального эксперимента. Получено удовлетворительное согласие. В дальнейшем, планируется развитие данной модели на задачу деформации капель водоугольной суспензии.

Исследование выполнено за счет средств Российского научного фонда (проект № 15–19–10003).

Список литературы

1. S.K. Aggarwal, F. Peng. A review of droplet dynamics and vaporization modeling for engineering calculations. J. Eng. Gas Turbines Power № 117 (1995). P. 453–461
2. R.S. Volkov, A.O. Zhdanova, M.V. Zabelin, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak. Definition of water droplets “strain cycles” in air times dependences on their sizes and movement velocities. Eur. Phys. J. Web Conf. №76 (2014). P. 1–7
3. G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak. Evaporation of single droplets and dispersed liquid flow in motion through high temperature combustion products. High Temp. № 52 (4) (2014). P. 568–575
4. R.S. Volkov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak. The influence of initial sizes and velocities of water droplets on transfer characteristics at high-temperature gas flow. Int. J. Heat Mass Transfer № 79 (2014). P. 838–845
5. Roman S. Volkov, Geniy V. Kuznetsov, Pavel A. Strizhak. Water droplet deformation in gas stream: Impact of temperature difference between liquid and gas. International Journal of Heat and Mass Transfer № 85 (2015). P. 1–11
6. Minakov A.V. Numerical algorithm for moving boundary fluid dynamics problems and its testing. Computational Mathematics and Mathematical Physics. № 10 (2014). P. 1560 – 1570
7. Минаков А.В. Численный алгоритм решения пространственных задач гидродинамики с подвижными твердыми телами и свободной поверхностью. Сибирский журнал индустриальной математики. N 4 (36) 2008. С. 95 – 105

