## 21 - Теплофизика

Ахмедов Энвер Нариманович, м.н.с.
Махачкала, Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра, лаб. математического моделирования
**Расчет теплофизических характеристик инертных газов**
e-mail: *ramazan_magomedov@rambler.ru* стр. 583

Бабич Дмитрий Сергеевич, 4 курс
Томск, Национальный исследовательский Томский государственный университет, физико-технический
**Процесс рекристаллизации в вершине горячей трещины в термобарьерном покрытии на основе титана: моделирование методом клеточных автоматов**
Моисеенко Дмитрий Давидович, к.ф.-м.н.
e-mail: *dmitriy18197@gmail.com* стр. 584

Батищева Ксения Артуровна, 2 курс
Томск, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, инженерная школа энергетики
**Смачивание алюминиевого сплава после обработки лазером**
Феоктистов Дмитрий Владимирович, к.т.н.
e-mail: *bka1801@mail.ru* стр. 585

Болгова Дарья Леонидовна, 4 курс
Томск, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, инженерная школа энергетики
**Совершенствование тепловых схем российских атомных ледоколов**
Кузьмин Ариан Валерьевич, к.т.н.
e-mail: *da-ria-chan@mail.ru* стр. 586

Жданова Валентина Вячеславовна, 4 курс
Томск, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, инженерная школа энергетики
**Особенности модификации топлива для ледоколов нового поколения**
Кузьмин Ариан Валерьевич, к.т.н.
e-mail*: zhdanovagerchet@gmail.com* стр. 587

Исламова Анастасия Гомильевна, аспирант 1 года обучения
Томск, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, инженерная школа энергетики
**Испарение капель водно-солевых растворов на твердой металлической поверхности**
Кузнецов Гений Владимирович, д.ф.-м.н.
e-mail: *anastasya.Isl@gmail.com* стр. 588

Карпенко Анастасия Сергеевна, 4 курс
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический
**Особенности влияния теплоты фазовых переходов на скорость миграции плоских прослоек в кристалле при нестационарных тепловых условиях**
Гармашов Сергей Иванович, к.ф.-м.н.
e-mail: *as.karpenko911@yandex.ru* стр. 590

Кудров Александр Иванович, ассистент
Томск, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, инженерная школа энергетики
**Исследование изменения эффективной температуры топлива высокого выгорания ВВЭР-1000 с учетом rim-эффекта**
Кузьмин Ариан Валерьевич, к.т.н.
e-mail: *alex12kudrow@gmail.com* стр. 591

Миниярова Гульнур Сабирьяновна, магистрант 2 года обучения
Уфа, Башкирский государственный университет, физико-технический институт
**Исследование восстановления температуры в скважине после прекращения закачки жидкости в пласте с трещиной ГРП**
Шарафутдинов Рамиль Фаизырович, д.ф.-м.н.
e-mail: *miniarova.gula@yandex.ru* стр. 593

Морозов Андрей Владимирович, в.н.с., д.т.н.
Обнинск, "Государственный научный центр Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского", теплофизическое отделение
**Экспериментальное исследование высококонцентрированных водных растворов борной кислоты при** температуре 298-363 К
e-mail: *morozovandrey.email@gmail.com* стр. 594

Мухамбеталин Данышпан Болатулы, 4 курс
Томск, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, физико-технический
**Расчет теплогидравлических параметров тепловыделяющего элемента тепловыделяющей сборки типа ИРТ-3М**
Наймушин Артем Георгиевич, к.ф.-м.н.
e-mail: *dan_1196@mail.ru* стр. 595

Орлова Евгения Георгиевна, аспирант 4 года обучения
Томск, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Инженерная школа энергетики
**Движение жидкости по текстурированным лазерным излучением металлическим поверхностям в системах капельного охлаждения**
Кузнецов Гений Владимирович, д.ф.-м.н.
e-mail: *lafleur@tpu.ru* стр. 596

Панков Артем Сергеевич, м.н.с.
Екатеринбург, Институт теплофизики УрО РАН, -
**Достижимый перегрев раствора 90%$N_2$+10%$CH_4$**
Байдаков Владимир Георгиевич, д.ф.-м.н.
e-mail: *artem_pankov1987@mail.ru* стр. 598

Працюк Кирилл Михайлович, 4 курс
Томск, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, инженерная школа энергетики
**Особенности процессов теплообмена и конструкции основных теплообменных аппаратов в космосе**
Кузьмин Ариан Вальеревич, к.т.н.
e-mail: *k.m.pratsyuk@mail.ru* стр. 598

Чернов Андрей Александрович, в.н.с., профессор РАН
Новосибирск, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, отдел теплофизики многофазных систем
**Фазовые переходы при больших отклонениях от равновесия**
Чернов Андрей Александрович, д.ф.-м.н.
e-mail: *chernov@itp.nsc.ru* стр. 599

Ильин Владимир Алексеевич, к.ф.-м.н., доцент
Пермский государственный национальный исследовательский университет, физический, фазовых переходов
**Гистерезисные переходы между стационарными режимами электроконвекции жидкого диэлектрика в горизонтальном конденсаторе**
e-mail: *ilin1@psu.ru* стр. 603

# Расчет теплофизических характеристик инертных газов

***Ахмедов Энвер Нариманович*** [1]
***Магомедов Рамазан Абдуллаевич*** [1], ***Мейланов Рашид Русланович*** [1]
***Бейбалаев Ветлугин Джабраилович*** [1,2], ***Аливердиев Абутраб Александрович*** [1,2]
[1] *Институт проблем геотермии Дагестанского НЦ РАН*
[2] *Дагестанский государственный университет*
** ramazan_magomedov@rambler.ru*

Исследования по определению теплофизических параметров веществ и выводу уравнений состояний веществ [1] привели к развитию методов расчета теплофизических свойств веществ, а также использованию различных программных сред [2] для расчета свойств веществ, в связи с возможностью расчета систем уравнений состояний с несколькими десятками коэффициентов на современных компьютерах. Сокращение числа коэффициентов, равно как и объяснение физического смысла всех используемых параметров при расчете, обуславливает поиск новых моделей и подходов.

Переход от обычных производных к производным дробного порядка [3-7] представляет собой один из естественных способов учета принципа локального неравновесия. Реализуя его на основе экспериментально измеренных значений $P,V,T$ и полученного однопараметрического «фрактального» уравнения состояния можно определить значение показателя производной дробного порядка по термодинамическим параметрам и далее рассчитать термодинамические характеристики, пользуясь полученными аналитическими выражениями. Это позволяет учесть нелокальные эффекты в термодинамических процессах. Более того, переход к производным дробного порядка не является формальным математическим переходом, а связан с фундаментальными аспектами физики многочастичных систем. Учет нелокальных эффектов обычно приводит к представлению интегральных операторов в виде рядов дифференциальных операторов с дробным показателем порядка дифференцирования, позволяющего ограничиться несколькими членами такого ряда. Причем переход к традиционной (классической) термодинамике Карно, Клаузиуса и Гельмгольца получается в частном случае, когда показатель производной дробного порядка равен единице, что и было исследовано в наших недавних работах [8, 9].

В докладе представлены аналитические выражения на основе однопараметрическое «фрактальное» уравнение состояния с учетом второго вириального коэффициента и проведен расчет теплофизических параметров инертных газов: коэффициента сжимаемости z, энтропии $S$ и изохорной теплоемкости $C_V$ при различных температурах.

Результаты, частично представленные к публикации в рецензируемых журналах [10, 11], достаточно хорошо согласуются с табличными (справочными) данными, что позволяет надеяться на перспективность предлагаемого метода для расчета термодинамических характеристик. Таким образом, имеются все основания полагать, что предлагаемый метод расчета на основе дифференцирования дробного порядка и фрактального уравнения состояния позволяет достоверно определить значения термодинамических характеристик в широком $PV$-диапазоне, включающим околокритические области.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 16-08-00067а.

Список публикаций:

*[1] Фортов В. Е. Уравнения состояния вещества от идеального газа до кварк-глюонной плазмы. Физматлит. 2013. 492 с.*
*[2] Программы расчета данных: REFPROP Национального института стандартов и технологий США; www.wsp.ru, Mathcad и др.*
*[3] Самко С. Г., Килбас А. А., Маричев О. И. Интегралы и производные дробного порядка и некоторые их приложения. Минск: Наука и техника. 1987. 688 с.*
*[4] Jeynes E. T. // Phys.Rev. 1957. V.106. P. 620.*
*[5] Соболев С. Л. // УФН. 1997. Т. 167. № 10. С. 1095.*
*[6] Meilanov R. P., Shabanova M, R, Akhmedov E. N. // Chaos Soliton. Fract. 2015. V. 75. P. 29.*
*[7] Meilanov R. R., Akhmedov E. N., Beybalaev V. D., Magomedov R. A., Ragimkhanov G. B., Aliverdiev A. A. // JPCS. 2017. V. 94. 012076.*
*[8] Мейланов Р. П., Магомедов Р. А. // ИФЖ. 2014. Т. 87. № 6. С. 1455.*
*[9] Magomedov R. A., Meilanov R. P., Akhmedov E. N., and Aliverdiev A. A. // JPCS. 2016. V. 774. 012025.*
*[10] Магомедов Р. А., Мейланов Р. Р., Ахмедов Э. Н., Бейбалаев В. Д., Аливердиев А. А. // Вестник Дагестанского государственного унив-та. Серия 1: Естественные науки. Махачкала: Изд Дагестанского гос. ун-та. 2017. Т. 32, В. 1. С. 6.*
*[11] Magomedov R. A., Meilanov R. R., Akhmedov E. N., Beybalaev V. D., Aliverdiev, A. A. // JTAC. 2018 (accepted) doi: 10.1007/s10973-018-7024-2.*

# Процесс рекристаллизации в вершине горячей трещины в термобарьерном покрытии на основе титана: моделирование методом клеточных автоматов

***Бабич Дмитрий Сергеевич***

***Моисеенко Дмитрий Давидович, Максимов Павел Васильевич, Панин Сергей Викторович, Панин Виктор Евгеньевич***

*Национальный исследовательский Томский государственный университет*

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН*

*Моисеенко Дмитрий Давидович, к.ф.-м.н.*

dmitriy18197@gmail.com

Высокие требования, предъявляемые к новым материалам, диктуют необходимость создания и развития современных методов компьютерного моделирования поведения сред со структурой в экстремальных условиях нагружения. Большие градиенты температур, циклическая ударная нагрузка, могут приводить к катастрофической деградации материала. Экспериментальные исследования модельных образцов и последующие натурные испытания готовых конструкций весьма трудоемки и дорогостоящи. В связи с этим теоретическое прогнозирование поведения материалов в реальных условиях эксплуатации является весьма актуальным, в особенности – на базе компьютерного эксперимента.

Применение хорошо зарекомендовавших себя методов механики сплошных сред к компьютерному моделированию динамики изменения внутренней структуры материала крайне осложнено необходимостью перестройки расчетной сетки, добавлением/удалением расчетных ячеек, и пр. Так как в данных задачах рассматривается не только наличие внутренней структуры, влияющей на перенос энергии, но и динамическая перестройка, как самой зеренной структуры, так и внутренних границ раздела. Понятие сплошной среды подразумевает, что ее свойства непрерывно меняются от точки к точке. Эта идеализация приводит к тому, что рассматриваемые структуры весьма проблематично моделировать в рамках исключительно механики сплошных сред. Таким образом, для моделирования поведения материалов со сложной структурой, имеющей тенденцию к перестроению, наряду с классическими методами необходимо привлекать дискретные подходы. Наиболее известными дискретными методами являются методы молекулярной динамики и клеточных автоматов.

Методы клеточных автоматов за последние десятилетия существенно расширили область своих применений и успешно используются для решения широкого спектра задач – от газодинамики до проблем роста костной ткани, взаимодействия клеток организма, кинетики распространения волн горения и образования дендритных структур при кристаллизации. Применительно к задачам механики прочности и разрушения твердого тела, структурно-имитационное моделирование позволяет имитировать такие процессы, как накопление микроповреждений, рост локальных очагов пластической деформации, формирование дефектных ансамблей и дальнейший переход к полному разрушению материала. Клеточными автоматами принято называть сети из элементов, меняющих свое состояние в дискретные моменты времени по определенному набору правил в зависимости от того, каким было состояние самого элемента и его ближайших соседей по сети в предыдущий дискретный момент времени.

В рамках данной работы на базе клеточных автоматов развит новый подход для моделирования процесса рекристаллизации с учетом возможности двойникового роста кристаллитов. Метод включает в себя алгоритмы для моделирования трансформации структуры, переноса тепловой энергии, процесса теплового расширения и зарождения дефектов. В методе явно учитывается пористость и неоднородность структуры материала.

На первом этапе исследований моделировался образец технического титана с характерным размером элементов 1 мкм. Размеры образца $80 \times 120 \times 10$ мкм$^3$. Начальная температура каждого элемента задавалась 300 К, начальные значения деформации напряжений были нулевыми. Величина временного шага – 1 нс.

В результате проведенной серии численных экспериментов было показано, что в результате действия интенсивной термической нагрузки в материале по берегам трещины имеет место процесс рекристаллизации. Сильный градиент температур порождает специфический столбчатый характер роста зеренной структуры, направленный от области повышенных температур в сторону более холодной основной части материала. Наряду с зарождением и столбчатым ростом новых зерен наблюдается рост старых зерен вдали от трещины. Отметим, что в рамках данного подхода моделируется тепловое расширение материала, инициирующее возникновение термических напряжений. В свою очередь, неоднородное поле термических напряжений порождает возникновение локальных моментов сил, являющихся источником кривизны кристаллической решетки. В дальнейшем кривизна решетки релаксирует на микроротациях, приводящих к увеличению плотности дефектов в материале. Данный процесс заканчивается разрушением. Исследованию возможностей компьютерного моделирования для прогнозирования ресурса работы материала в экстремальных условиях будут посвящены следующие работы авторов.

# Смачивание алюминиевого сплава после обработки лазером

***Батищева Ксения Артуровна***
***Феоктистов Дмитрий Владимирович***
*Национальный исследовательский Томский политехнический университет*
*Феоктистов Дмитрий Владимирович*
bka1801@mail.ru

Актуальность научных исследований в области поверхностных явлений обусловлена перспективностью применения результатов. Современное состояние и тенденции развития электронной, авиационной, космической, автомобильной, нефтехимической и другой техники требуют разработки новых технологий с использованием металлов, характеризуемых малыми (менее 10) или большими (более 120) контактными углами смачивания. Изменить свойства смачиваемости можно модификацией поверхности, придав ей многомодальную шероховатость, или формированием покрытия, уменьшающего свободную поверхностную энергию [1]. Из известных способов изменения текстуры: литография, травление, химическое осаждение из газовой фазы, темплатный способ, лазерная обработка является наиболее перспективным [2], обладает явными преимуществами по сравнению с остальными. Лазерная обработка применима к металлическим и неметаллическим поверхностям в условиях окружающей среды, легко масштабирована для деталей сложного профиля, имеет не высокую стоимость эксплуатационных затрат, быстрый и простой технологический процесс.

Цель работы – определение смачивающих свойств алюминиевой поверхности после ее обработки лазером. В качестве обрабатываемого металла использован сплав алюминия АМГ-6 (ГОСТ 4784-97). Образцы, представляющие собой пластины толщиной 5 мм, после полировки исследованы на профилометре HOMMEL TESTER T1000. Среднее арифметическое отклонение профиля Ra не превышало 1 мкм. Текстура подложек изменялась с помощью иттербиевого импульсного волоконного лазера «IPG Photonics», с длинной волны 1064 нм, мощностью 20 Вт, частотой 20 кГц, временем воздействия 200 нс. Во время обработки подложка находилась на расстоянии 0,25 м от объектива лазера размером 110x110 мм. Сгенерированный луч воздействовал на полированную поверхность одиночными импульсами. Головка лазера перемещалась с помощью двухосевого гальваносканера со скоростью 2000 мм/с. Трехмерное изображение текстуры (*рис.1*) получено с помощью профилометра.

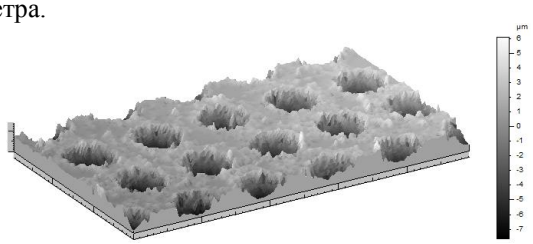


*рис.1. Трехмерное изображение поверхности*

Скорость перемещения головки лазера выбрана таким образом, чтобы расстояние между соседними кратерами не превышало половины диаметра. Контактные углы капель дистиллированной воды объемом 10 мкл на поверхности подложек определены на установке, принцип действия которой подробно представлен в [3]. Контактный угол, измеренный на полированной поверхности подложки 90 градусов. После создания текстуры лазерным излучением контактный угол составил менее 10 градусов. Капля растекалась по подложке в ассиметричное пятно. Измерения проводились в первый день и спустя 30 дней после нанесения текстуры. Спустя 30 дней после нанесения текстуры, проведен низкотемпературный отжиг подложки в течении 6 часов при 100 градусах Цельсия. После охлаждения подложка демонстрировала супергидрофобные свойства (контактный угол 175 градусов). Через 7 дней супергидрофобные свойства сохранились.

Проведены исследования по изменению смачиваемости полированной алюминиевой подложки после низкотемпературного отжига в течении 6 часов при 100 градусах Цельсия. Установлено, что низкотемпературный отжиг не влияет на свойства смачиваемости без предварительного текстурирования лазерным излучением. Контактный угол не изменился. Предполагается, что в результате отжига происходят изменения кристаллической решетки и (или) химического состава поверхностного слоя подложки.

Заключение. Установлено, что алюминиевый сплав АМГ-6 текстурированный лазером демонстрирует гидрофильные свойства. После низкотемпературный отжига в течении 6 при 100ºС происходит инверсия свойств смачиваемости. Поверхность становится супергидрофобной.

Список публикаций:

*[1] Бойнович Л.Б., Емельяненко А.М. // Успехи химии. 2008 . Т. 77. С. 619.*
*[2] Ali T. Abdulhusseia, Ganesh K. Kannarpady, Andrew B. Wright, Anindya Ghosh, Alexandru S. Biris. // Applied Surface Science. 2016. Т. 384. С. 311.*
*[3] Кузнецов Г.В., Орлова Е.Г. // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23. №1. С. 17.*

# Совершенствование тепловых схем российских атомных ледоколов

***Болгова Дарья Леонидовна***
***Глухий Дмитрий Игоревич***
*Национальный исследовательский Томский политехнический университет*
*Кузьмин Ариан Валерьевич, к.т.н.*
da-ria-chan@mail.ru

Надежность работы атомного ледокола (АЛ) во многом определяется надежностью и экономичностью работы его главной энергетической установки (ГЭУ). В эволюционном развитии ГЭУ АЛ можно выделить четыре поколения судовых ядерных энергетических установок (ЯЭУ).

К первому поколению принадлежит установка ОК-150 АЛ «Ленин». При создании этой установки большое внимание уделялось резервированию оборудования. Паропроизводящая установка (ППУ) включала три реакторных установки (РУ) с водо-водяными реакторами под давлением, каждый из которых имел две циркуляционные петли с двумя главными и одним аварийным насосами. Тепловая мощность реакторов составляла 90 МВт. В процессе эксплуатации установки был выявлен ряд недостатков: недостаточная ремонтопригодность; быстрый износ главных циркуляционных насосов (ГЦН), подшипников и электронагревателей компенсаторов давления; загрязнение первого контура кобальтом; коррозионное разрушение трубной системы парогенератора; несовершенство системы аварийной защиты реактора.

В последствии ППУ была заменена на более совершенную, относящуюся ко второму поколению, двухреакторню установку блочного типа ОК-900, которая была разработана для серии новых АЛ. Реакторы ОК-900 имели тепловой мощностью 159 МВт. Число циркуляционных петель увеличилось до четырех, в каждой петле был предусмотрен один вертикальный двухскоростной насос. Полностью учтен опыт ремонта установки ОК-150: объем требуемых для ремонта демонтажных работ сокращен; материал трубной системы заменен на коррозионностойкий; для второго контура введено секционирование. Петлевая компоновка основного оборудования была заменена на блочную, благодаря чему уменьшилась разветвленность первого контура РУ и задвижки большого диаметра удалось исключить.

На АЛ «Арктика» и «Сибирь» впервые была применена двухреакторная ППУ ОК-900А блочного типа, номинальная тепловая мощность реакторов 171 МВт. Начиная с АЛ «Россия», патрубки, предназначенные для обслуживающих систем, оборудованы сужающими устройствами для уменьшения расхода в случае течи. Установка ОК-900А также принадлежат ко второму поколению ЯЭУ.

С учетом опыта создания и эксплуатации АЛ «Арктика» и «Сибирь» был разработан усовершенствованный проект линейных АЛ «Россия», «Советский Союз», «Ямал», «50 лет Победы». Основной особенностью данных АЛ является оснащение системой пневмообмыва корпуса судна, что увеличило ледопроходимость. Пневмоомывающее устройство (ПОУ) содержит два турбонаддувочных агрегата ТНА-5 (один резервный). Кроме того, АЛ «50 лет Победы» имеет некоторые отличия, а именно усовершенствованные системы безопасности и система управления ЯЭУ, что еще более улучшает его ледопроходимость и безопасность. Применение ОК-900А привело к значительному возрастанию эксплуатационных периодов АЛ, что позволило добиться практически круглогодичного использования АЛ в условиях Арктики.

К третьему поколению ЯЭУ принадлежит ППУ с РУ КЛТ-40. Данная установка спроектирована на базе унифицированного оборудования и компоновки ОК-900А с учетом международных требований по ядерной безопасности судовых ЯЭУ. На мелкосидящих АЛ «Таймыр» и «Вайгач» был применен модифицированный вариант этой установки – однореакторная ППУ КЛТ-40М мощностью 171 МВт. В качестве главного двигателя судна применен главный турбозубчатый агрегат (ГТЗА) с прямой передачей мощности на винт регулируемого шага. ГТЗА включает в себя двухкорпусную турбину с тремя регенеративными отборами пара, одноходовой двухпроточный конденсатор и двухступенчатый восьмипоточный редуктор. В ГТЗА имеется сепаратор пара жалюзийного типа, снижающий влажность перед турбиной низкого давления до 0,5 %. Также используется регенеративный цикл, обеспечивающий подогрев питательной воды в подогревателе низкого давления, деаэраторе (рис.1) и подогревателе высокого давления паром от трех отборов ГТЗА и отработавшим паром турбопитательных насосов. В качестве резервного источника энергии, независимого от ядерной ППУ, в состав установки включен котел аварийного хода. На ледоколе предусмотрено ПОУ, обеспечивающее подачу воздуха от двух электрокомпрессоров (один резервный) мощностью 2 МВт.

В 2013 г. начато строительство серии из трех универсальных атомных ледоколов (УАЛ), которые представляют новейшее, четвертое поколение ЯЭУ АЛ. На УАЛ применены две РУ РИТМ-200 интегральной компоновки с мощностью 175 МВт. Интегральная компоновка состоит в локализации оборудования первого контура в одном корпусе с большим объемом воды, что уменьшает вероятность возникновения течи теплоносителя, при этом заметно снижается гидравлическое сопротивление при движении теплоносителя. На порядок по сравнению с блочной компоновкой уменьшается поток нейтронов за счет большого водяного

пространства между активной зоной и стенкой корпуса моноблока, что в свою очередь увеличивает радиационный ресурс корпуса РУ. Недостаток интегральной компоновки состоит в снижении ремонтопригодности моноблока, что накладывает ограничение на размещение некоторого оборудования в корпусе реактора. Анализ различных принципиальных схем ПТУ показал, что оптимальной является схема с полностью электрифицированными вспомогательными механизмами и с подогревом питательной воды паром, отбираемым от ГТА, что и было применено в новом проекте. Замена турбопривода мощных вспомогательных механизмов на электропривод с частотным регулированием не только облегчает эксплуатацию, но и несколько повышает тепловую эффективность установки. В схеме имеет место регенеративный подогрев с двумя ступенями – ПНД и деаэратор (*рис. 1*), что обеспечивает удовлетворительную экономичность ЯЭУ, работающей при частых изменениях мощности.

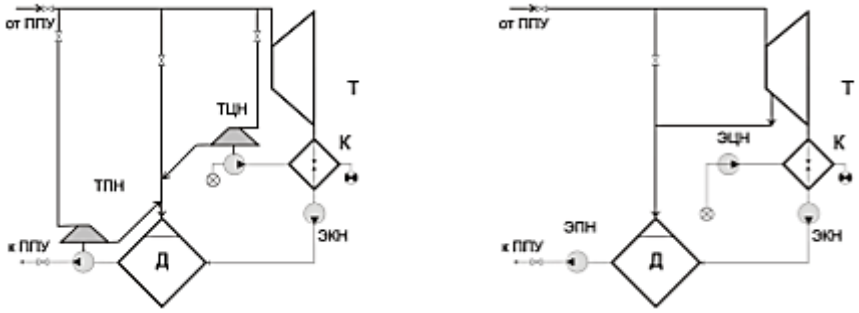


*рис.1. Схема регенеративного подогрева питательной воды в деаэраторе для установок АЛ ОК-900А, КЛТ-40 (слева) и РИТМ-200 (справа)*

Создание установки РИТМ-200 стало значительным шагом в развитии ЯЭУ АЛ. Конструктивные решения, принятые для РИТМ-200, значительно повышают ее безопасность, надежность и экономичность. Данная установка, обладая возможностями дальнейшей модернизации, станет основой для создания проектов перспективных судовых ЯЭУ.

## Особенности модификации топлива для ледоколов нового поколения

***Жданова Валентина Вячеславовна***
***Глухий Дмитрий Игоревич***
*Национальный исследовательский Томский политехнический университет*
*Кузьмин Ариан Валерьевич, к.т.н.*
zhdanovagerchet@gmail.com

На замену существующих судовых реакторных установок была спроектирована установка четвертого поколения РИТМ-200, обладающая более высокими технико-экономическими показателями. Наибольшее изменение претерпела активная зона нового реактора.

В первых судовых реакторах ледокола «Ленин» использовались твэлы с керамическим топливом в виде таблеток из диоксида урана со средним обогащением 5% по U235 и оболочками из циркониевого сплава Э110 или нержавеющей стали 026Х16Н15М3. Компенсация избыточной реактивности осуществлялась применением выгорающего поглотителя (бора), что позволило увеличить кампанию активной зоны до 4800 часов (энергоресурс 0,43 ТВт·ч).

В активных зонах реакторов ППУ типа ОК-900 применяются дисперсионные твэлы, в которых в качестве топлива использовался интерметаллид урана высокого обогащения, а в качестве матрицы – сплав алюминия. Последовательное улучшение конструкции твэлов (разработка ВНИИНМ) и активной зоны (оптимизация выгорающих поглотителей) позволило увеличить энергоресурс, вырабатываемый активными зонами, более чем в четыре раза. В 1996 г. были внедрены в эксплуатацию серийные активные зоны типа 14-10-3 на базе твэлов в циркониевых оболочках (сплав Э110) с энергоресурсом 1,8 – 2,1 ТВт·ч, которые обеспечивали 4 – 5 летнюю непрерывную эксплуатацию ледоколов. На действующих атомных ледоколах применяются канальные активные зоны *(рис.1)* с относительно большой долей межканального пространства, в котором размещаются поглощающие элементы органов компенсации реактивности.

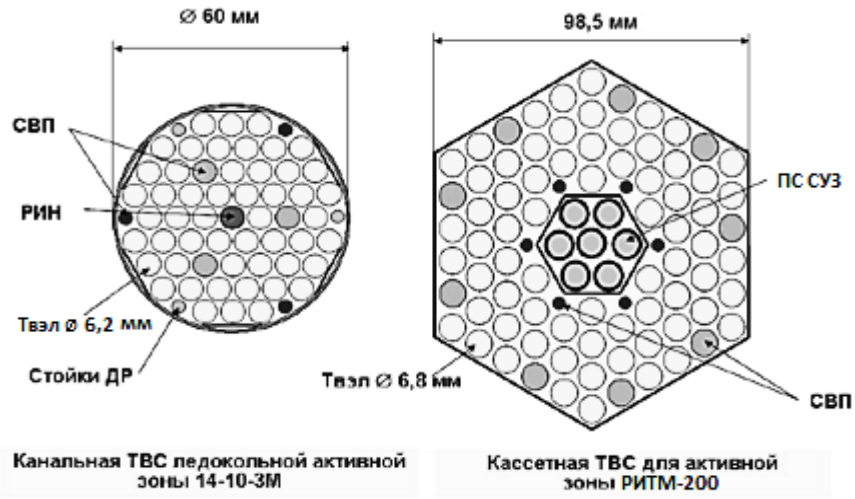


*рис.1. Поперечное сечение ТВС*

При разработке перспективных активных зон с увеличенным энергоресурсом реактора использованы новые технические решения: увеличение доли топлива за счет перехода на кассетную активную зону с шестигранной ТВС *(рис. 1)*, при которой количество межканальной воды существенно уменьшается; размещение поглощающих элементов органов компенсации реактивности внутри ТВС и их заменой при перегрузке активной зоны; переход на новый материал для оболочек твэл – хромоникелевый сплав 42ХНМ, обладающий высокой коррозионной стойкостью. В случае реализации требования по ограничению максимального обогащения топлива (не более 20 % по U235), предлагается использовать керметное топливо (оксид урана+силумин), обладающее повышенной ураноёмкостью. Относительно большие размеры активной зоны реактора РИТМ-200 (высота 1,2 или 1,65 м, описанный диаметр 1,6 м) по сравнению с реактором ОК-900 (высота 0,92 м, описанный диаметр 1,21 м) позволили снизить ее энергонапряженность и увеличить загрузку топлива. В результате появилась возможность создать активную зону с энергоресурсом 4,5 или 7 ТВт·ч (в зависимости от высоты активной зоны), что в несколько раз превышает ресурсные характеристики активных зон действующих ледоколов.

В данной работе был произведен физический расчет активной зоны для ректора РИТМ-200. Полученный результаты свидетельствуют о возможности получения проектной кампании при среднем обогащении 12,7% при этом глубина выгорания составит 86,6 МВт·сут/кгU. Максимальные глубины выгорания, достигнутые для данных топливных композиций без разрушения, составляют около 160 МВт·сут/кгU. Следовательно для данной активной зоны возможно получение кампании около 10 лет при обогащении 17%.

В перспективе перехода на более ураноёмкое топливо кампания активной зоны может быть продлена вплоть до 15 лет. С ураноёмкостью топлива 10 г/см$^3$ и обогащением 17% глубина выгорания составит 110 МВт·сут/кгU. При этом необходимо повышение энергонапряженности активной зоны для более эффективного выгорания топлива.

## Испарение капель водно-солевых растворов на твердой металлической поверхности

***Исламова Анастасия Гомильевна***

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет*

*Кузнецов Гений Владимирович, д.ф.-м.н.*

anastasya.isl@gmail.com

Теплота фазового перехода капель используется в различных технологических процессах, например, при отводе тепла от устройств печати, в микроэлектронике, при спреевом охлаждении. Одной из актуальных проблем является исследование фазовых переходов при испарении многокомпонентных жидких смесей. Основными параметрами, которые характеризуют поведение капли в процессе испарения, являются скорость испарения и контактный угол. Скорость испарения является фактором эффективности всей системы (от нее зависят скорости тепло- и массопереноса). Известно, что скорость испарения капель зависит от: динамики движения контактной линии [1-2], структуры [3] и теплопроводности поверхности [4], конвекции [5], теплофизических свойств жидкости.

Целью настоящей работы является экспериментальное определение влияния начальной концентрации водно-солевого раствора LiBr на изменение удельной скорости испарения в процессе испарения капли, лежащей на нагретой твердой поверхности.

Экспериментальные исследования проводились на установке с использованием оборудования теневой системы [6]. Капля заданным объемом помещалась на поверхность электронным дозатором. Геометрические параметры капли получены после обработки фотокадров теневых изображений в программном обеспечении.

Удельная скорость испарения капли определялась по уравнению [7]:

$$ES = \frac{(V_i - V_{i+1})}{\Delta t \cdot \left(A_i + A_{i+1}\right) / 2}, \quad \frac{мкл}{с \cdot мм^2} \tag{1}$$

где $V_i$, $V_{i+1}$, $A_{i+1}$, $A_i$ – объем (мкл) и площадь поверхности капли (мм$^2$) в момент времени $t_i$ и $t_{i+1}$, соответственно. Данная величина характеризует количество вещества, испарившегося с единицы площади поверхности капли за единицу времени.

На *рис.1* представлены типичные графические зависимости удельной скорости испарения капли водно-солевого раствора LiBr объемом 10 мкл при концентрациях 10 и 30% (масс.) на алюминиевой и латунной подложках при температуре поверхности 60 ˚С.

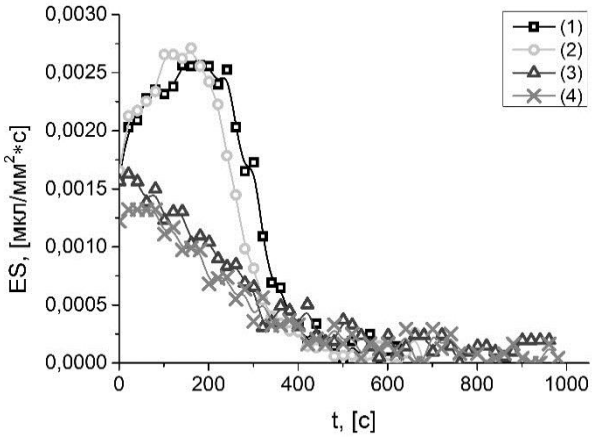


*рис. 1. Изменение удельной скорости испарения капли водно-солевого раствора LiBr объемом 10 мкл с концентрацией: 1,2 – 10%; 3,4 – 30% (масс.), на алюминиевой (1,3) и латунной (2,4) подложках при температуре поверхности 60 ˚С.*

По результатам анализа графической зависимости (*рис.1*) установлено, что с увеличением начальной концентрации соли в растворе удельная скорость испарения будет ниже. Как известно, в водных растворах солей с повышением концентрации теплота парообразования увеличивается, повышается количество теплоты необходимой для испарения. Данный факт объясняет снижение скорости испарения капель с большим начальным содержанием солей. Скорость испарения капли зависит от движения линии трехфазного контакта. Если контактная линия не закреплена (отсутствует депиннинг) во время испарения, то ES вдоль границы раздела постоянна. В условиях испарения режима пининга (площадь контакта не изменяется, линия трехфазного контакта не движется) локальное давление паров над каплей не равномерно. Давление в центральной части выше, чем давление вдоль контактной линии. Это приводит к тому, что локальная скорость испарения на линии контакта выше, чем в центральной части капли.

Список публикаций:

*[1] Putnam S.A., Briones A.M., Byrd L.W., Ervin J.S., Hanchak M.S., White A., Jones J.G. // Int. J. Heat Mass Transfer. 2012. Vol. 55. P. 5793.*
*[2] Pittoni P.G., Chang C.-C., Yu T.-S., Lin S.-Y. // Colloids Surf. A. 2013. Vol. 432. P. 89.*
*[3] Miljkovic N., Enright R., Maroo S.C., Cho H.J., Wang E.N. // J. Heat Transfer. 2011. Vol. 133. № 8. P. 080903.*
*[4] Saada M.A., Chikh S., Tadrist L. // Int. J. Heat Mass Transfer. 2013. Vol. 58. N. 1. P.197.*
*[5] Carle F., Sobac B., Brutin D. // Appl. Phys. Lett. 2013. Vol. 102. P.061603.*
*[6] Кузнецов Г.В., Феоктистов Д.В., Орлова Е.Г., Батищева К.А. // Колл. ж. 2016. Т. 78. № 3. С. 17.*
*[7] Gatapovaa E. Ya., Semenov A. A., Zaitsev D. V., Kabov O. A. // Colloids Surf. A. 2014. Vol. 441. P. 776.*

# Особенности влияния теплоты фазовых переходов на скорость миграции плоских прослоек в кристалле при нестационарных тепловых условиях

***Карпенко Анастасия Сергеевна***
*Южный федеральный университет*
*Гармашов Сергей Иванович, к.ф.-м.н.*
*as.karpenko911@yandex.ru.*

Термомиграция – явление миграции жидких включений в кристалле под воздействием градиента температуры – применяется в полупроводниковой электронике в качестве метода создания глубоких p-n переходов [1]. Движение включений происходит за счет непрерывного растворения вещества твердой фазы на более нагретой границе включения и диффузии растворенного вещества в объеме включения к более холодной границе, где оно кристаллизуется. Процессы кристаллизации и растворения сопровождаются выделением (поглощением) тепла, которое влияет на распределение температуры в области включения, вследствие чего может изменяться и скорость этих процессов и самого включения в целом.

В настоящей работе рассматривается следующая модель термомиграции. Жидкое включение представляет собой раствор вещества кристалла в некотором растворителе, заключённый между двумя плоскопараллельными кристаллическими пластинами. Вся композиция находится в вакууме и односторонне нагревается тепловым излучением для создания градиента температуры в прослойке жидкой фазы.

На *рис.1* представлена зависимость отношения скоростей термомиграции, рассчитанных по формулам из [1] с учётом ($V_{\Delta H}$) и без учёта ($V_0$) теплоты фазовых переходов (ФП), от толщины прослойки жидкой фазы в стационарных тепловых условиях (кривые 1 и 2). Из этих зависимостей следует, что эффект теплоты ФП приводит к снижению скорости термомиграции, причём сильнее сказывается при относительно больших толщинах прослоек, то есть в режиме, близком к диффузионному [1], когда влиянием межфазной кинетики на массоперенос в жидкой фазе можно пренебречь. Это связано с тем, что в этом режиме скорость термомиграции максимальна и соответствует так называемой диффузионной скорости [1]. С уменьшением толщины прослойки влияние межфазных ограничений на массоперенос в жидкой фазе усиливается, скорость миграции снижается, а эффект теплоты ФП исчезает (отношение $V_{\Delta H}/V_0$ стремится к 1, см. рис. 1, кривые 1, 2 при $l < 50$ мкм).

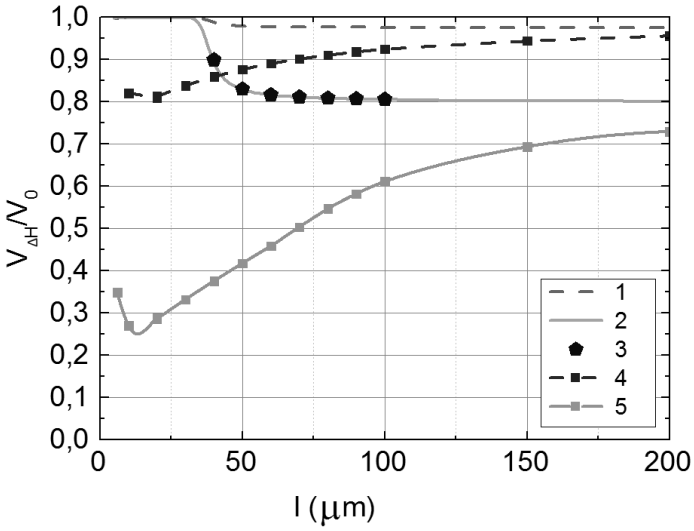


*рис.1. Зависимость отношения скоростей термомиграции с учётом ($V_{\Delta H}$) и без учёта ($V_0$) теплоты ФП ($\Delta H$) от толщины прослойки в различных тепловых режимах (стационарный режим: расчёты по формулам из [1] при $\Delta H$=10(кривая 1) и 100 (кривая 2) кДж/см$^3$, кривая 3 – расчёт по настоящей (численной) модели при $\Delta H$=100 кДж/см$^3$; нестационарный режим (частота импульсов излучения 200 Гц): расчёты по настоящей (численной) модели при $\Delta H$=10 (кривая 4) и 100(кривая 5) кДж/см$^3$)*

В настоящей работе нас интересовало поведение зависимости $V_{\Delta H}/V_0=f(l)$ в случае нестационарных тепловых условий, когда, как известно из [2], колебания температуры ослабляют влияние межфазных ограничений и приводят к увеличению скорости термомиграции вплоть до диффузионной, если межфазная кинетика нелинейна (например, реализуется зародышевый или дислокационный механизм кристаллизации (растворения)). Для расчёта указанной зависимости была разработана компьютерная программа [3], моделирующая одномерный теплоперенос во всей композиции, а также одномерный массоперенос в прослойке с учётом и без учёта теплоты ФП в различных тепловых режимах для граничных условий, соответствующих зародышевому механизму межфазных процессов.

В результате проведенных расчётов выяснено, что в нестационарных тепловых условиях (частота импульсов теплового излучения варьировалась от 10 до 500 Гц) влияние теплоты ФП на скорость термомиграции при относительно больших толщинах прослоек (то есть в режиме, близком к диффузионному) и при относительно малых (то есть в кинетическом режиме) аналогично случаю стационарного режима термомиграции (ср. кривые 1 с 4, 2 с 5 на рис. 1 при малых ($l$ < 10 мкм) и больших ($l$ > 150 мкм) толщинах прослоек). Однако при толщинах прослоек, соответствующих смешанному режиму термомиграции (когда межфазная кинетика лишь частично ограничивает массоперенос в жидкой фазе), влияние теплоты ФП на их скорость усиливается по сравнению со случаем стационарных тепловых условий (ср. кривые 1 с 4, 2 с 5 при $l \approx 10 \div 150$ мкм). Обнаруженная особенность поведения зависимости $V_{\Delta H}/V_0=f(l)$, по-видимому, связана именно с нелинейным механизмом межфазных процессов, поскольку при линейной межфазной кинетике (случай нормального механизма роста (растворения)[1]), заложенной в модель, влияние теплоты ФП и в стационарных, и в нестационарных тепловых условиях, как показали проведенные расчеты, одинаково.

Список публикаций:
*[1] Лозовский В.Н., Лунин Л.С., Попов В.П. Зонная перекристаллизация градиентом температуры полупроводниковых материалов. Москва: Металлургия. 1987.*
*[2] Гершанов В.Ю., Гармашов С.И. Нелинейные нестационарные эффекты в процессах массопереноса. Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета. 2014.*
*[3] Гармашов С.И., Карпенко А.С. // Современные информационные технологии: тенденции и перспективы развития: материалы XXIII науч. конф. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета. 2016. С.97.*

## Исследование изменения эффективной температуры топлива высокого выгорания ВВЭР-1000 с учетом rim-эффекта

***Кудров Александр Иванович***
***Савицкий Денис Евгеньевич, Кузьмин Ариан Валерьеви***
*Национальный исследовательский Томский политехнический университет*
*Кузьмин Ариан Валерьевич, к.т.н.*
alex12kudrow@gmail.com

Эффективная температура – важная характеристика, благодаря которой вычисляется мощностной эффект, определяющий безопасную работу реактора в переходных и стационарных режимах. В ВВЭР-1000 топливо может достигать глубин выгорания до 70 МВт·сут/кгU. На глубинах выгорания более 40 МВт·сут/кгU в топливной таблетке возникает периферийный слой высокой пористости и повышенного тепловыделения [1, 2], называемый rim-слоем.

Под эффективной температурой понимают среднюю температуру топливной таблетки [3]:

$$T_{эфф} = \frac{\int_0^{r_c} T(r) 2\pi r dr}{\int_0^{r_c} 2\pi r dr}, \qquad (1)$$

где $T(r)$ – распределение температур в топливе, $r_c$ – радиус сердечника, мм.

Согласно (1) для определения средней температуры необходимо знать распределение температур в сердечнике твэла. Вследствие сложной зависимости теплопроводности диоксида урана, задача определения температурного распределения решается при помощи численного метода конечных разностей, с использованием метода простой итерации. Эффективная температура определяется при помощи численного интегрирования.

Согласно [4] изменение теплопроводности диоксида урана в процессе выгорания описывается формулами, которые учитывают изменение микроструктуры топлива, накопление твердых и газообразных продуктов деления.

$$\lambda_{95} = [(0{,}1148 + 3{,}0864 \cdot 10^{-3}\overline{B}) + 2{,}475 \cdot 10^{-4}(1 - 2{,}95 \cdot 10^{-3}\overline{B})T]^{-1} + 0{,}0132\exp(1{,}88 \cdot 10^{-3}T); \qquad (2)$$

где $\overline{B}$ – среднее выгорание в сердечнике, $МВт \cdot сут / кгU$; $T$ – температура, $^oC$.

$$\lambda_0 = \frac{\lambda_{95}}{1 - (2{,}58 - 0{,}58 \cdot 10^{-3}T) \cdot 0{,}05}; \qquad (3)$$

$$\lambda_{RIM} = \lambda_0 \left\{ 1 - P^{2/3} \left[ 1 - \frac{1}{1 + P^{1/3}(\lambda_0 / \lambda_{Xe} - 1)} \right] \right\}, \tag{4}$$

где $P = N\pi d^3 / 6$ – безразмерная пористость ($d$ – средний диаметр поры, м; $N$ – объемная плотность пор, $1/м^3$), $\lambda_{Xe}$ – теплопроводность ксенона, $Вт/(м \cdot К)$.

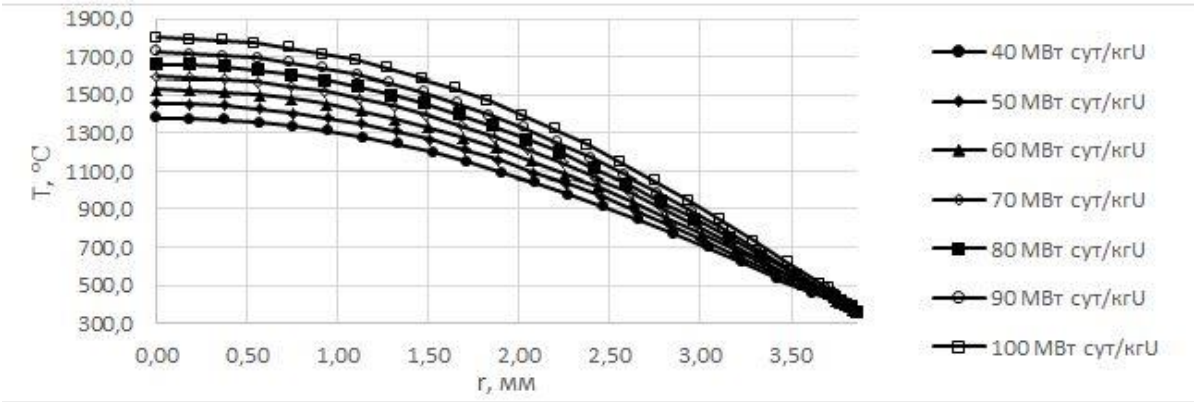


*рис.1. Температурные распределения в сердечнике с rim-эффектом на различных глубинах выгорания в условиях средней тепловой нагрузки*

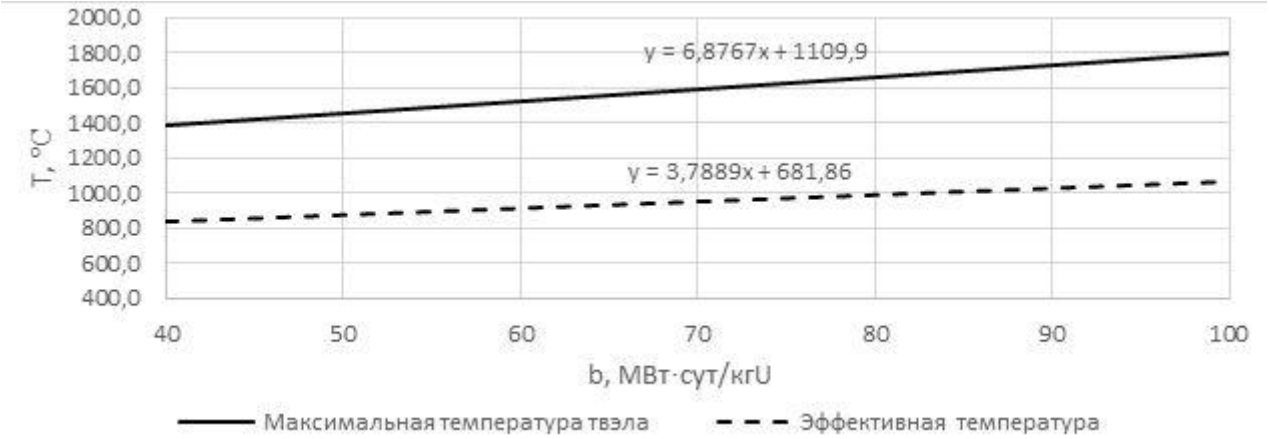


*рис.2. Зависимости максимальной и эффективной температур сердечника от выгорания в условиях средней тепловой нагрузки*

По полученным данным была проведена аппроксимация расчетных зависимостей максимальной и эффективной температур в зависимости от выгорания линейными функциями (*рис. 2*). Согласно представленным данным наблюдается рост как эффективной, так и средней температур, такая зависимость объясняется снижением теплопроводности в процессе выгорания.

Список публикаций:

*[1] В.М. Алюшин. Численное моделирование распределения температуры в твэле ВВЭР / В. Г. Баранов, Н.А. Кудряшов, А.В. Хлунов // Атомная энергия.–2010.–Т. 108–Вып. 3.–С. 145-151.*

*[2] K. Lassman, C. O'Carroll, J van de Laar and C. T. Walker, J. Nucl. Mater., 208, 223-231 (1994).*

*[3] Основы теории и методы расчёта ядерных энергетических реакторов: учеб. пособие для вузов / Г.Г. Бартоломей, Г.А. Бать, В.Д. Байбаков, М.С. Алхутов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Екб.: Изд-во ЮЛАНД, 2016. – 512 с.: ил.*

*[4] B.H. Lee, Y.H. Koo, D.S. Sohn, J. Nucl. Sci. Technol., 38, 45-52 (2001)*

# Исследование восстановления температуры в скважине после прекращения закачки жидкости в пласте с трещиной ГРП

***Миниярова Гульнур Сабирьяновна***
*Башкирский государственный университет*
*Шарафутдинов Рамиль Фаизырович, д.ф.-м.н.*
*miniarova.gula@yandex.ru*

Актуальность темы. В последнее время большое внимание уделяется вопросам разработки нефтегазовых месторождений с использованием гидроразрыва пласта. Контроль технического состояния скважины при этом является важной нефтепромысловой задачей. Одним из эффективных методов диагностики состояния скважины и пласта с трещиной гидроразрыва являются термогидродинамические исследования. Особый интерес при этом составляет анализ процесса восстановления температуры после прекращения закачки жидкости в пласт.

На основе численного моделирования исследуется восстановление температуры в скважине после прекращения закачки жидкости из пласта с трещиной гидроразрыва с учетом Джоуля - Томсона и адиабатического эффектов, конвективного и кондуктивного переноса тепла. Показано, что наличие трещины гидроразрыва в пласте приводит к уменьшению времени восстановления температуры в скважине при постоянном расходе жидкости, а при постоянной величине репрессии время восстановления температуры увеличивается.

Целью данной работы является исследование изменения температуры после прекращения закачки в пласт с трещиной гидроразрыва с учетом Джоуля – Томсона и адиабатического эффектов, конвективного и кондуктивного теплопереноса. Приводятся результаты сравнения с экспериментальными данными.

На *рис.1* приведены результаты многовариантных расчетов при различной ширине трещины ГРП и сравнение с промысловыми данными. Видно, что при ширине трещины 12 мм наблюдается совпадение темпов восстановления температуры по промысловым и расчетным данным.

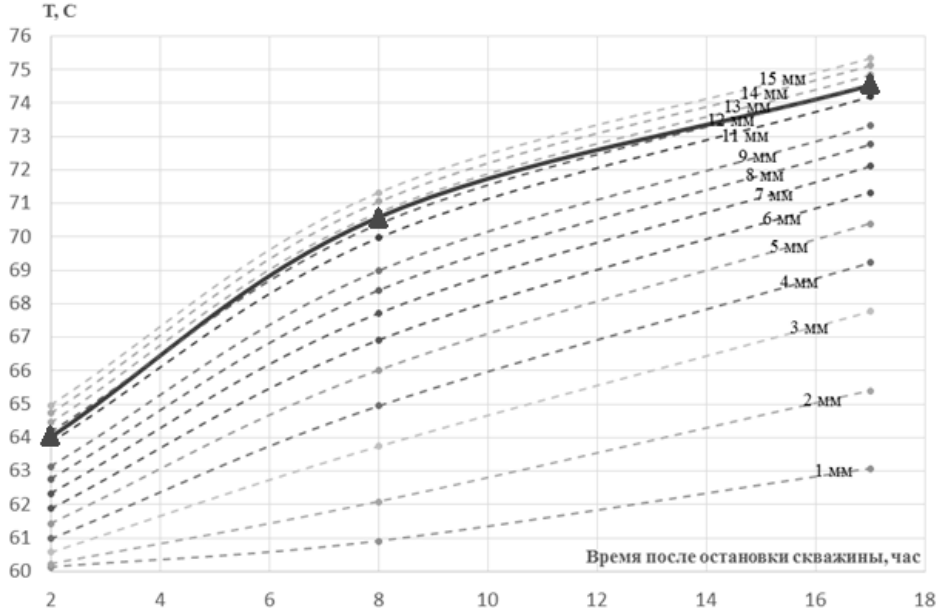


*рис. 1. Зависимость температуры в скважине от времени после остановки закачки. Шифр кривых соответствует ширине трещины*

Следующий пример сравнения расчетных и промысловых данных приведен на *рис.2*. Из *рис.2* видно, что характер восстановления температуры на двух различных глубинах по промысловым данным одинаков. Это свидетельствует о наличии трещины ГРП в этих интервалах. Для определения ширины трещины ГРП используется верхний интервал (*кривая 1, рис.2*). Проведены многовариантные расчеты для различной ширины трещины ГРП, различной длины трещины ГРП при известных объемах закачки, проницаемости пласта и трещины ГРП. Видно, что изменение длины трещины от 20 м до 50 метров оказывает слабое влияние на характер восстановления температуры. Наибольшее совпадение результатов расчета с промысловыми данными наблюдается для ширины трещины ГРП – 1 мм.

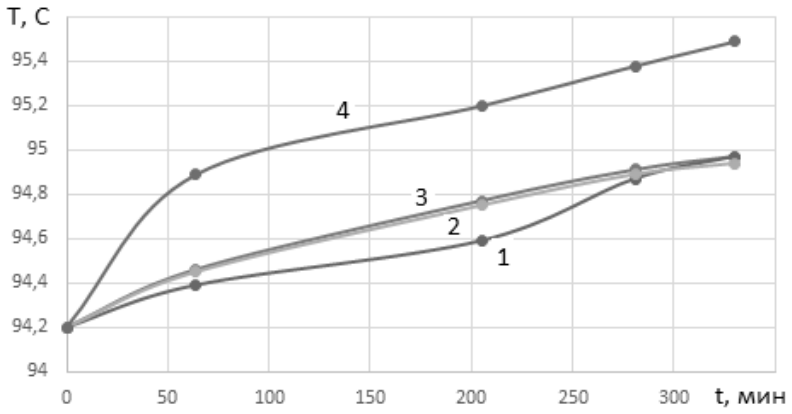


*рис.2. Зависимость температуры от времени.*
*Шифр кривых: 1- Промысловые данные (глубина 3207); 2- Расчет при ширине трещины 1 мм длина 50 м; 3- Расчет при ширине 1 мм длина 20 м; 4- Промысловые данные (глубина 3201 м)*

По итогам работы можно сделать следующие выводы:

1.Проведенные исследования восстановления температуры в скважине после прекращения закачки жидкости в пласт с трещиной ГРП показали, что основное влияние на темпы восстановления температуры оказывает ширина трещины ГРП.

2.На основе проведения многовариантных расчетов и сравнения с промысловыми данными позволило оценить ширину трещины ГРП для конкретных условий.

## Экспериментальное исследование высококонцентрированных водных растворов борной кислоты при температуре 298-363 К

***Морозов Андрей Владимирович***
***Питык Анна Валерьевна, Сахипгареев Азамат Радикович, Шлепкин Александр Сергеевич***
*Государственный научный центр – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского*
sas@ippe.ru

Для расчетов процессов накопления и кристаллизации борной кислоты в активной зоне реактора ВВЭР в случае аварии необходимо знание теплофизических свойств высококонцентрированных растворов борной кислоты. Это объясняется тем, что в новых проектах АЭС с реактором ВВЭР предполагается длительное (до 72 часов) охлаждение активной зоны реактора за счет подачи в нее раствора борной кислоты с концентрацией 16 г/кг из пассивных систем гидроёмкостей первой трех ступеней. Учитывая длительность аварийного процесса, кипение теплоносителя и малое содержание борной кислоты в паре, выходящем из реактора, возможно повышение концентрации борной кислоты в активной зоне и её кристаллизация [1, 2].

Для расчетов процессов накопления и кристаллизации борной кислоты в активной зоне реактора ВВЭР необходимо знание теплофизических свойств высококонцентрированных растворов борной кислоты. В настоящее время данные о плотности и вязкости растворов борной кислоты носят весьма общий характер и не охватывают весь диапазон параметров (температура, давление, концентрация кислоты), характерный для аварийной ситуации на АЭС с ВВЭР. Тем не менее, в литературе встречаются сведения об экспериментальных исследованиях в этой области [3, 4]. Полученные авторами данных работ результаты говорят о том, что теплофизические свойства растворов борной кислоты отличаются от свойств воды и это различие усиливается с увеличением концентрации кислоты.

Для выяснения теплофизических свойств водных растворов борной кислоты в диапазоне повышенных концентраций, характерных для аварийных режимов АЭС с ВВЭР, в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» были проведены экспериментальные исследования. Измерение плотности растворов борной кислоты происходило пикнометрическим методом. Для проведения экспериментов использовались стеклянные пикнометры объемом 10 мл. Вязкость растворов борной кислоты определялась с помощью стеклянного вискозиметра ВПЖ-1 с диаметром капилляра 0,34 мм.

В результате проведенных исследований были измерены значения плотности и вязкости борной кислоты в диапазоне концентраций 2,5-200 г борной кислоты/кг воды при нескольких значениях температур в диапазоне 298-363 К *(рис.1)*.

*а)* *б)*

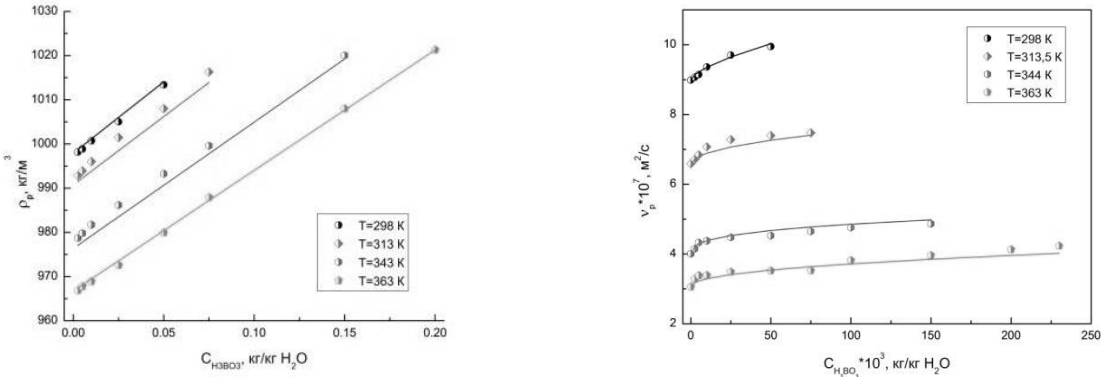


*рис.1. Зависимость плотности (а) и кинематической вязкости (б) водных растворов борной кислоты от концентрации растворенного вещества*

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №16-19-10649).

Список публикаций:

*[1] Морозов А.В., Сорокин А.П., Рагулин С.В., Питык А.В., Сахипгареев А.Р., Сошкина А.С., Шлепкин А.С. // Теплоэнергетика. 2017. №7. С. 1–6.*

*[2] Морозов А.В., Питык А.В., Рагулин С.В., Сахипгареев А.Р., Сошкина А.С., Шлепкин А.С. // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2017. № 4. С. 72–82.*

*[3] Азизов Н. Д., Ахундов Т.С. // Теплофизика высоких температур, 1996, т. 34, вып. 5, с. 798–802.*

*[4] WCAP-17021-NP, Rev. 1 "Summary of Tests to Determine the Physical Properties of Buffered and Unbuffered Boric Acid Solutions," March 2009.*

## Расчет теплогидравлических параметров тепловыделяющего элемента тепловыделяющей сборки типа ИРТ-3М

***Мухамбеталин Данышпан Болатулы***

***Аникин Михаил Николаевич, Лебедев Иван Игоревич***

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет*

*Наймушин Артем Георгиевич, к.ф.-м.н.*

dan_1196@mail.ru

Важным этапом исследования параметров ядерного реактора являются теплогидравлические расчеты, начиная от простых одномерных и заканчивая полномасштабными трехмерными моделями ядерных реакторов, с помощью которых проводят расчеты стационарных и аварийных режимов, переходных процессов работы реактора. На сегодняшний день существует множество методов и программ для расчета реакторов.

Активная зона исследовательского реактора ИРТ-Т оснащена только приборами, которые позволяют определять подогрев водяного теплоносителя и тепловую мощность реактора в целом. Определять распределение энерговыделения по ТВС и твэлам реактора можно только с помощью программ нейтронно-физического расчета. Целью данной работы является изучение теплогидравлических параметров тепловыделяющего элемента ТВС типа ИРТ-3М реактора ИРТ-Т при изменении входной температуры теплоносителя. В работе представлены результаты расчета плотности потока тепла с поверхности твэла и распределения температуры.

В работе был использован специализированный программный пакет SolidWorks. SolidWorks – программный комплекс САПР для автоматизации работ промышленного предприятия на этапах конструкторской и технологической подготовки производства. Необходимые для расчета теплофизические свойства материалов были взяты из паспортных значений условий эксплуатации ТВС типа ИРТ-3М.

На *рис. 1* для показано изменение коэффициента запаса до начала кипения при температуре теплоносителя на входе в активную зону 45 °С.

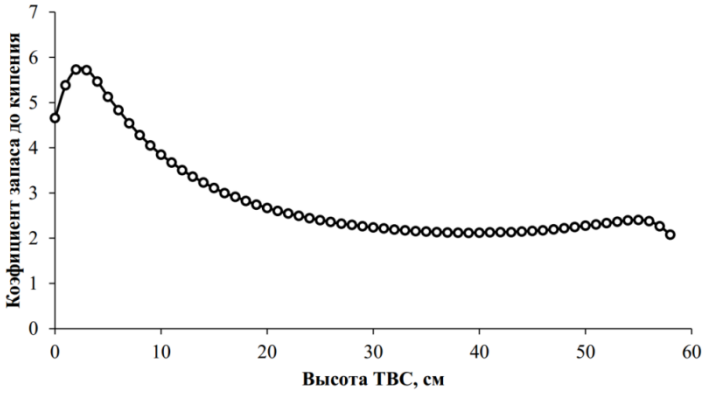


*рис.1. Коэффициент запаса до начала кипения при температуре воды на входе 45 °С для наружного твэла*

При среднем подогреве теплоносителя в самой нагруженной восьмитрубной ТВС 9,4 °С максимальное значение температуры воды не превысит 63,4 °С. Наибольшую удельную мощность в ТВС имеет наружный твэл, поэтому в нем и достигаются максимальные значения температуры топлива (80,8 °С), поверхности оболочки (79,3 °С) и максимальные значения плотности теплового потока от твэлов к теплоносителю – 443 кВт/м$^2$ (на поверхности наружного твэла). Это значение меньше, чем проектное ограничение для сборки – 800 кВт/м$^2$, но более чем в 2 раза превышает среднее по активной зоне.

## Движение жидкости по текстурированным лазерным излучением металлическим поверхностям в системах капельного охлаждения

***Орлова Евгения Георгиевна***

***Феоктистов Дмитрий Владимирович, Исламова Анастасия Гомильевна***

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет*

*Кузнецов Гений Владимирович, д.ф.-м.н.*

lafleur@tpu.ru

Известно, что системы капельного охлаждения эффективнее традиционных систем с использованием больших потоков жидкого или газообразного теплоносителя. Однако для того, чтобы в таких системах теплоноситель существовал в форме капель, необходимо контролировать их расположение на поверхности. Технически осуществить контроль расстояния между каплями можно за счет модификации поверхностей двумя способами: химическое нанесение покрытий или создание шероховатости. Первый часто нецелесообразен по причине истирания и смывания слоя с поверхности. При реализации второго поверхность подвергается обработке с целью придания текстуре определенной формы. Из известных способов изменения текстуры перспективным является лазерное излучение в связи с усовершенствованием и удешевлением за последнее десятилетие лазерных систем.

В представленной работе исследовались свойства смачиваемости металлических поверхностей, полученных наносекундной лазерной обработкой, а также механизм движения контактной линии по таким поверхностям. В качестве исследуемых образцов использовались подложки из сплава АМГ-6, поверхность которого без обработки является высокоэнергетической (0,5-5 Дж/м$^2$) и гидрофильной (контактный угол, образованный каплей воды с поверхностью, $\theta<90°$). Образцы представляли собой диски диаметром 50 мм и толщиной 5 мм.

Для нанесения текстуры использовался твердотельный иттербиевый импульсный волоконный лазер IPG-Photonics с длинной волны 1064 нм. Параметры лазера варьировались в диапазонах: мощность лазерного излучения 0÷20 Вт, частота следования импульсов 20÷100 кГц, длительность импульса 50÷200 нс. Продольное и поперечное расстояние между отдельными элементами текстуры зависели от линейного перемещения луча и количества линий прохода на 1 мм. Поэтому целью предварительных экспериментов (создание однократным импульсом кратеров на расстоянии друг от друга, превышающем их поперечный размер) являлся подбор параметров лазерного излучения, максимально влияющих на функциональные свойства поверхностей (*рис.1*).

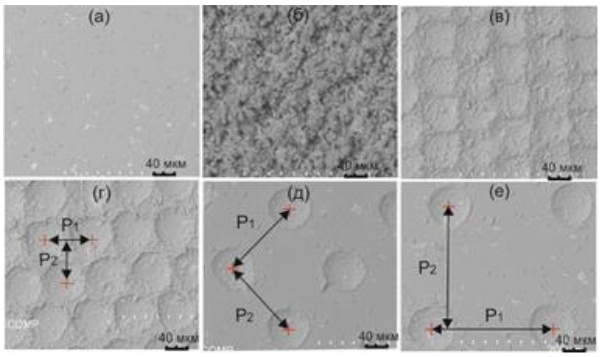


*рис.1 SEM-изображения поверхностей: (а) полированная; текстурированные: (б) I; (в) II; (г) III; (д) IV; (е) V. Параметры лазера: мощность 20 Вт, частота 20 кГц, длительность 200 нс.*

На основе результатов предварительного эксперимента выбраны следующие параметры лазерного излучения: длительность импульса 200нс (с ее ростом увеличивается глубина кратера, что приводит к увеличению газовой фазы при контакте жидкости с поверхностью), мощность излучения 8 и 20 Вт (минимально и максимально возможные значения), частота 20кГц (у текстур, образованных при частоте больше 20кГц, отсутствует повторяемость элементов, наблюдается значительное разбрызгивание металла, что может влиять на смачивание и движение жидкости случайным образом). Приняты следующие значения скорости линейного перемещения луча (продольный шаг $P_1$) и количество линий прохода на 1 мм (поперечный шаг $P_2$): I – полное наложение кратеров друг на друга ($d_{кр}$), II – частичное наложение (около 30%), III – продольный $P_1$ и поперечный $P_2$ шаги приблизительно равны диаметру кратера, IV – $P_1 \approx P_2 \approx 2d_{кр}$, V – $P_1 \approx P_2 \approx (2{,}5 \div 3)d_{кр}$ (Рис.1).

Исследования свойств смачиваемости и механизма движения жидкости проведены на установке, в которой реализовано использование теневого метода [1]. «Метод сидячей капли» использовался для изучения смачиваемости поверхностей, движение контактной линии исследовалось при подаче жидкости шприцевым электронным насосом через отверстие в поверхности и последующем откачивании. Измерения статических контактных углов (θ) проводились непосредственно после текстурирования и до установления равновесного значения угла (*рис.2*). Обнаружено, что с увеличением шага текстуры θ возрастает. Это объясняется тем, что у поверхностей I и II (с полным и частичным наложением кратеров (*рис.1*)) отношение фактической площади поверхности к ее проекции (r) будет больше по сравнению с остальными текстурированными образцами. Согласно уравнению Венцеля [2] шероховатость усиливает гидрофильные свойства изначально гидрофильной поверхности (т.е. капли на полученных образцах находятся в состоянии Венцеля).

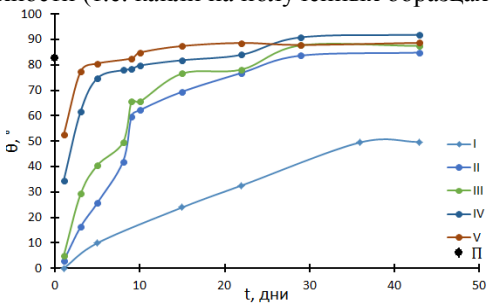


*рис.2 Изменение статических контактных углов во времени: цифрами обозначены текстурированные образцы, точкой – значение угла для полированной поверхности.*

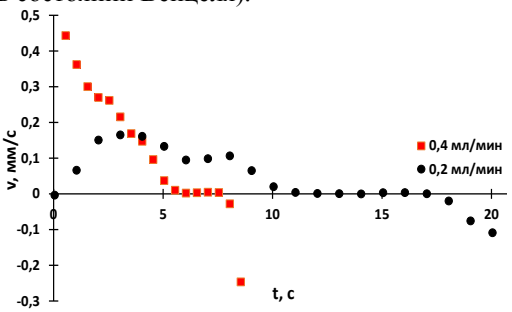


*рис.3 Изменение скорости перемещения контактной линии капли по текстурированной поверхности образца V.*

Установлено, что изменение скорости перемещения контактной линии капли (*рис.3*), движущейся по текстурированной поверхности, носит амплитудный характер при малых расходах жидкости (0,2 мл/мин). Последнее связано с зацеплением контактной линии за кромки кратеров, что и приводит к скачкообразному перемещению от одного элемента текстуры к другому, а также является причиной того, что капля находится в состоянии Венцеля (не скатывается с поверхности при ее наклоне к горизонтали). При больших расходах жидкость за счет давления, создаваемого насосом, движется по поверхности плавно. Положительные значения скорости означают наступательное движение контактной линии (нагнетание жидкости), отрицательные – контактная линия движется в обратную сторону (отступательное движение, создаваемое в режиме откачивания).

Список публикаций:

*[1] Orlova E.G., Kuznetsov G.V., Feoktistov D.V., Ponomarev K.O. // Eur J Mech B Fluids. 2018. V. 68. P. 118-127*
*[2] Wenzel R. N. // Ind. Eng. Chem.1936. V. 28. No 8. P. 988–994*

## Достижимый перегрев раствора 90%$N_2$+10%$CH_4$

***Панков Артем Сергеевич****

***Панасенко Анна Сергеевна***

*Институт теплофизики УрО РАН*

*Байдаков Владимир Георгиевич*

artem_pankov1987@mail.ru

Сжиженный природный газ (СПГ) представляет собой многокомпонентный раствор, который является перспективным энергоносителем и требует всестороннего изучения его свойств и теплофизических процессов, связанных с его использованием. При хранении и транспортировке, СПГ часто оказывается в метастабильном (перегретом за линию насыщения) состоянии, снять которое можно путем вскипания.

Экспериментально исследована кинетика спонтанного вскипания перегретого раствора метан-азот с содержанием азота 90 моль %. Опыты проведены методом измерения времени жизни и методом непрерывного понижения давления. Жидкость перегревалась в стеклянной ячейке объемом $V \approx 88$ мм$^3$. Заход в метастабильную область осуществлялся снижением давления на термостатируемую жидкость ниже давления фазового равновесия. В первом методе измерялось время ожидания вскипания жидкости после резкого сброса давления до заданного значения $p$. Во втором – давление понижалось со скоростью 10–100 кПа/с и фиксировалось в момент вскипания жидкости. Вскипание отождествлялось с появлением в жидкости первого жизнеспособного зародыша. Это предположение оправдано при малых объемах жидкости и достаточно больших ее перегревах.

Исследуемый раствор готовился непосредственно в измерительной ячейке. Для приготовления растворов использовались газы высокой чистоты. Паспортная чистота метана составляла 99.99, азота- 99.999 объемных %.Содержание азота в растворе определялось по давлению насыщенных паров до начала эксперимента и контролировалась в процессе измерений. Экспериментальная установка и методика проведения опыта подробно описаны в [1].

Опыты с раствором метан-азот были проведены в интервале частоты зародышеобразования$J$=$10^6$-$10^8$ м$^{-3}$с$^{-1}$ по изобарам $p$=1.0 и 1.6 МПа. По результатам экспериментов на изобарах выделены участки гомогенного и инициированного зародышеобразования. При $J$ = $10^7$ м$^{-3}$с$^{-1}$температуры достижимого перегрева составляют $T_n$=118.62 К при $p$=1.0 МПа и $T_n$=121.46 К при $p$=1.6 МПа. Полученные данные сопоставлены с результатами расчетов по теориям гомогенногои гетерогенного зародышеобразования.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-08-00403) и Программы фундаментальных исследований Уральского отделения Российской академии наук (проект № 18-2-2-13).

Список публикаций:

*[1]Байдаков В.Г. //Перегрев криогенных жидкостей. Екатеринбург: УрО РАН. 1995.*

## Особенности процессов теплообмена и конструкции основных теплообменных аппаратов в космосе

***Працюк Кирилл Михайлович***

***Пендюрин Илья Александрович***

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет*

*Кузьмин Ариан Валерьевич, к.т.н.*

k.m.pratsyuk@mail.ru.

Отсутствие гравитации в космическом пространстве приводит к появлению большого числа вопросов, относительно решения задач по отводу энергии в теплообменных аппаратах. Так как ускорение свободного падения близко к нулю, необходимо менять основной метод теплообмена, при свободном движении жидкости и газа, с конвекции на излучение. Именно поэтому на космическом аппарате, оснащенном ядерным ракетным двигателем ставится специализированные аппараты – холодильники излучатели (ХИ).

Холодильники излучатели устанавливаются во втором контуре охлаждения, который применяется для рассеивания теплоты от остановленного реактора. На сегодняшний день существует 2 типа – поверхностного типа и капельного. Необходимо рассмотреть конструкции, а также рассчитать энергетическую эффективность обоих видов ХИ.

Их необходимо рассматривать для реакторной установки мощностью 300 МВт, применяемой в ракетном двигателе. В нем охлаждающий контур отводит тепло от бокового отражателя, а также от верхней радиационной защиты.

Составляется задача теплообмена и энергетического баланса, для определения количества теплоты отводимое ХИ и температурных режимов их работы. На первом этапе ставится задача теплообмена в отражателе реактора (*рис.1).*

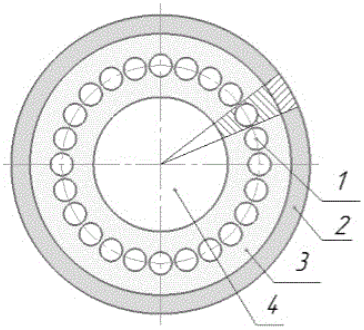


*рис.1. Графическое изображение постановки задачи для первой части работы*
*1-Теплоноситель протекающий в отверстиях отражателя (Be); 2-Корпус (Nb); 3- Отражатель (Be); 4-Теплоноситель первого контура АЗ*

Решение проводится, используя уравнение энергии и граничные условия 2, 3 и 4 родов. На этом этапе вычисляется необходимая скорость жидкого азота и размеры каналов, по которым он прокачивается. В следующей части исследования проводится вычисление площади ХИ поверхностного типа, для отвода нужного количества теплоты от ХИ, *(рис.2).*

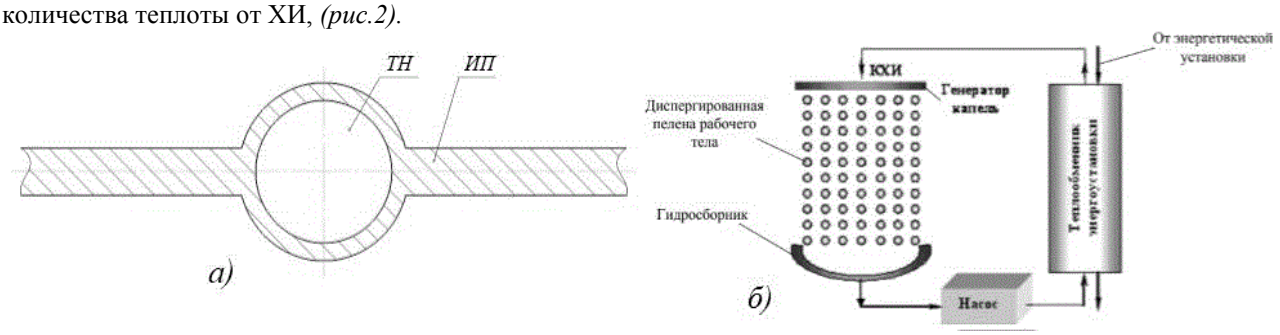


*рис.2. Типы холодильных излучателей: а) ХИ поверхностного типа; б) ХИ капельного типа*

В ходе исследуемой задачи №1 была получена функция распределения поля температур. Определена характерная скорость и температура теплоносителя второго контура, определены геометрические параметры канала, протекая через который, теплоноситель должна охлаждать Be отражатель до необходимой температуры. Для задач №2 и №3 основным результатом является определение площади рассеивающей поверхности холодильного излучателя. Наглядное изображения поля температур.

## Кинетика кристаллизации переохлажденных расплавов при больших отклонениях от равновесия

***Чернов Андрей Александрович***
*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН*
chernov@itp.nsc.ru

Известно, что фазовые переходы первого рода происходят путем зарождения и роста центров новой фазы. Следовательно, кинетика данного процесса определяется частотой нуклеации и скоростью роста зародышей в заданных условиях. При моделировании данного процесса в первую очередь встает вопрос о механизме его протекания. Теоретический анализ показывает, что в большинстве случаев в данном процессе выделяются две ярко выраженные стадии. Первая из них – стадия нуклеации, на которой образуется основное число устойчиво растущих зародышей новой фазы. Нелинейная природа нуклеации, обусловленная сильной зависимостью частоты зародышеобразования от степени метастабильности материнской фазы, определяет скоротечность данной стадии в масштабах характерного времени создания метастабильности. И, если начало стадии нуклеации обуславливается действием факторов, создающих метастабильность, то ее окончание связано

со снижением степени метастабильности (что связано с переходом части вещества метастабильной фазы в стабильную), вопреки продолжающемуся действию указанных факторов, если они, конечно же, продолжают действовать во время фазового перехода. Надо отметить, что по истечении стадии нуклеации доля новой фазы еще относительно мала. Это объясняется тем, что образования даже небольшой доли новой фазы достаточно для того, чтобы частота нуклеации уменьшилась на порядки по сравнению с начальной. Основная же часть материнской фазы переходит в стабильное состояние за счет дальнейшего роста образовавшихся на стадии нуклеации центров при практически неизменном их количестве.

Наибольший интерес и наибольшую сложность при изучении фазовых переходов представляет, конечно же, стадия нуклеации. Здесь тесно переплетаются вопросы термодинамики малых систем, кинетики процесса нуклеации зародышей новой фазы и механизма их роста в широком диапазоне размеров, корректного учета эффекта коллективного влияния ансамбля растущих зародышей новой фазы на состояние исходной метастабильной фазы и т. д. Все это в совокупности с действием факторов, создающих метастабильность, воплощается в виде сложной, сильно нелинейной математической проблемы, описываемой системой интегро-дифференциальных уравнений, полного решения которой на данный момент времени нет.

В настоящем докладе будет рассмотрена неравновесная теория объемной кристаллизации расплава, быстро приведенного в переохлажденное состояние (для широкого диапазона достигаемых переохлаждений, в том числе и для больших переохлаждений, когда числа Кутателадзе сравнимы с единицей), заключающаяся в корректном учете тепловыделения, обусловленного фазовым переходом, путем подстановки в кинетические уравнения, описывающие процесс суммарного превращения, реального распределения поля температур, формирующегося в объеме расплава вокруг растущих центров новой фазы. Определены границы применимости моделей, основанных на учете тепловыделения из балансовых соотношений. Данная теория позволяет точно описать кинетику зарождения и роста кристаллов в метастабильной жидкости, а также определять морфологию затвердевшего материала. Будет сформулирован критерий аморфизации для веществ, полученных методом сверхбыстрой закалки из жидкого состояния. Рассмотрены механизмы дегазации расплава в процессе его кристаллизации, ведущие к формированию в затвердевшем материале микропор и трещин. Их можно условно разделить на два типа: сегрегационные (газовая пористость) и обусловленные усадкой вещества в процессе затвердевания. Первый заключается в вытеснении движущимися фронтами кристаллизации растворенного в расплаве газа. Второй – с появлением в еще не закристаллизовавшемся расплаве в процессе его кристаллизации больших растягивающих напряжений. Детально исследована эволюция кавитирующего расплава во времени. Показана существенная зависимость конечного размера кристаллических зерен и газовых включений в затвердевшем материале от скорости охлаждения расплава.

## Гистерезисные переходы между стационарными режимами электроконвекции жидкого диэлектрика в горизонтальном конденсаторе

***Ильин Владимир Алексеевич***

*Пермский государственный национальный исследовательский университет*

ilin1@psu.ru

Движение слабопроводящих жидкостей в электрическом поле привлекает внимание тем, что представляет собой способ прямого преобразования энергии электрического поля в энергию движения жидкой среды [1–4]. Поведение гидродинамических систем в электрическом поле имеет ряд особенностей, связанных с характером возникновения заряда в жидкости и взаимодействием его с внешним полем. Электрическое поле может привести к резонансным явлениям, связанным с резким понижением порога конвекции, усилением или ослаблением её интенсивности. С практической точки зрения знание законов действия электрического поля на конвективные течения актуально в связи с проблемой эффективного управления конвекцией, тепло- и массопереносом в различных технологических ситуациях, в частности, в электрогидродинамических насосах.

Основоположником электрогидродинамики в нашей стране принято считать Г. А. Остроумова [1]. На сегодняшний день вопросами электрогидродинамики занимается множество исследователей [2–5]. Несмотря на большое количество теоретических и экспериментальных работ в этой области вплоть до настоящего времени объяснение электрогидродинамических эффектов недостаточно изучено, что порождает необходимость их дальнейшего изучения [4]. Непредсказуемость этих эффектов обусловлена нелинейным и сложным характером физико-химических процессов, что вызывает трудности их исследования.

В настоящей работе в рамках электрогидродинамического приближения исследована электроконвекция неизотермической слабопроводящей жидкости в постоянном электрическом поле горизонтального

конденсатора при униполярной инжекции заряда с катода. Инжекционный механизм зарядообразования считается основным. Инжектируемый заряд взаимодействует с внешним электрическим полем, движется через слой жидкости, в результате чего она может прийти в движение. Используется модель униполярной инжекции [4]. Эта модель объясняет ряд опытных данных. Согласно этой модели инжектируемая в жидкость плотность заряда прямо пропорциональна напряжённости электрического поля в конденсаторе.

Задача решалась методом конечных разностей. Эволюционные уравнения решались по явной схеме, конвективные слагаемые в уравнении для заряда и температуры аппроксимировалась разностями «против потока». Для уравнения переноса тепла использовались центральные разности. Для удобства работы с условиями периодичности к сетке добавлялись два вертикальных ряда. Вихрь скорости на горизонтальных границах вычислялся по формуле Тома. Для решения уравнения Пуассона использовался метод последовательной верхней релаксации. Для вычислений выбиралась прямоугольная ячейка с пространственными размерами $L_z = 1$, $L_x = 2$. Сетка бралась 21×41 узлов. Число Прандтля Pr = 10, электрический параметр $M = 14.14$. Использовались условия периодичности. Вычислялись зависимости максимальной функции тока от электрического параметра $T_e$ для разных нагревов – теплового числа Рэлея Ra. Рассмотрен случай подогрева снизу. Нагрев сверху рассмотрен в работе [5].

Обнаружены два режима стационарной конвекции, между которыми наблюдались гистерезисные переходы [6]. Затем были обнаружены новые эффекты. Приведём пример расчётов для Ra = 400. При расчёте с постоянными начальными условиями было обнаружено, что электроконвекция возникает мягким образом при $T_e = 4.8 \cdot 10^3$, наблюдается режим с маленькой интенсивностью вихрей (режим 1). При $T_e = 5.8 \cdot 10^3$ происходит скачкообразный переход к режиму с большой интенсивностью вихрей (режим 2). Интенсивность этого режима растёт с ростом $T_e$.

В интервале $1.5 \cdot 10^3 \le T_e \le 4.7 \cdot 10^3$ в зависимости от начальных условий реализуется либо равновесное распределение, либо стационарный режим 2, при большем поле $4.8 \cdot 10^3 \le T_e \le 5.7 \cdot 10^3$ будет либо режим 1, либо режим 2. При $T_e \ge 5.8 \cdot 10^3$ сколь угодно малые возмущения приводят систему после переходных процессов к стационарному режиму 2.

Пороги переходов между режимами электроконвекции при вычислении зависимости максимального значения функции тока от параметра $T_e$ для разных чисел Ra представлены в таблице. Как видно из неё, с уменьшением числа Рэлея интервал существования режима 1 сужается, и режим исчезает.

При Ra = 51 режим 1 ещё существует. Вычисления показали, что при таком нагреве при $T_e = 6.1 \cdot 10^3$ мягко возникающий режим с малой интенсивностью вихрей наблюдается. При $T_e = 6.2 \cdot 10^3$ происходит скачкообразный переход к режиму 2 с большой интенсивностью вихрей. При движении в пространстве параметров справа налево режим 2 существует до $T_e = 1.5 \cdot 10^3$. При меньшей напряженности поля $T_e < 1.5 \cdot 10^3$ в системе независимо от начальных условий затухают все возмущения, и устанавливается равновесие.

***Таблица.*** *Пороги возникновения нелинейных режимов и переходов между двумя режимами для разных значений Ra*

| Ra | Порог возникновения режима 2, $T_e$ | Порог возникновения режима 1, $T_e$ | Порог перехода к режиму 2, $T_e$ |
|---|---|---|---|
| 400 | $1.5 \cdot 10^3$ | $4.8 \cdot 10^3$ | $5.8 \cdot 10^3$ |
| 200 | $1.5 \cdot 10^3$ | $5.7 \cdot 10^3$ | $6 \cdot 10^3$ |
| 100 | $1.5 \cdot 10^3$ | $6 \cdot 10^3$ | $6.1 \cdot 10^3$ |
| 51 | $1.5 \cdot 10^3$ | $6.1 \cdot 10^3$ | $6.2 \cdot 10^3$ |
| 50 | $1.5 \cdot 10^3$ | - | $6.2 \cdot 10^3$ |
| 0 | $1.5 \cdot 10^3$ | - | $6.3 \cdot 10^3$ |

При Ra = 50 режим 1 не наблюдается. При $T_e = 6.1 \cdot 10^3$ после длительного переходного процесса устанавливается равновесие. При $T_e = 6.2 \cdot 10^3$ происходит переход к режиму 2. При меньшем числе Ra присутствует только режим 2. Точка перехода к режиму 2 продолжает расти, в невесомости (Ra = 0) этот переход происходит при $T_e = 6.3 \cdot 10^3$.

В итоге, выявлено, что режим с малой интенсивностью вихрей при малом нагреве отсутствует (при Ra < 51), он возникает при Ra = 51. При увеличении нагрева жидкости (с ростом числа Рэлея Ra) интервал существования этого режима растёт.

Список публикаций:

*[1] Остроумов Г. А. Взаимодействие электрических и гидродинамических полей. М.: Физматгиз. 1972. 292 с.*
*[2] Болога М. К., Гросу Ф. П., Кожухарь И. А. Электроконвекция и теплообмен. Кишинев: Штиинца, 1977. 320 с.*
*[3] Саранин В. А. Устойчивость равновесия, зарядка, конвекция и взаимодействие жидких масс в электрических полях. М.–Ижевск: НИЦ РХД, 2009. 332 с.*
*[4] Жакин А. И. Электрогидродинамика // УФН. 2012. Том 182, №5. С. 495–520.*
*[5] Мордвинов А. Н. Смородин Б. Л. Электроконвекция при инжекции с катода и нагреве сверху// Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2012. Том 14, вып.5. С. 97–105.*
*[6] Ильин В. А. Электроконвекция слабопроводящей жидкости в горизонтальном конденсаторе при униполярной инжекции заряда// Журнал технической физики. 2017. Том 87, вып. 1. С. 5–9.*