

М 375288

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое
училище им. Н.Э.Баумана

На правах рукописи

ЗУЙКОВ Анатолий Сергеевич

МАССООБМЕН В ПАРОГЕНЕРИРУЮЩИХ КАНАЛАХ С
ПОРИСТЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

Специальность 05.14.05.
Теоретические основы теплотехники

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

МОСКВА-1981

Работа выполнена в Институте высоких температур
Академии наук СССР.

Научные руководители: академик М.А.Стирикович;
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
В.С.Полонский.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор П.М.Брдлик;
кандидат технических наук,
доцент Л.П.Кабанов.

Ведущее предприятие - Всесоюзный научно-исследовательский
и проектно-конструкторский институт
атомного энергетического машино-
строения.

Защита состоится "8" июня 1981 г. в 15³⁰ часов
на заседании специализированного совета К.053.15.05 "Тепловые
машины и теоретические основ
высшем техническом училищ
Дефортовская набережная,

С диссертацией можно
им.Н.Э.Баумана.

Отзывы на авторефера
печатью, просьба направля
2-ая Бауманская ул., д.5.
секретарю совета К.053.15

Автореферат разослан

Учёный секретарь спе
д.т.н., профессор

1375288

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность темы. Прирост производства электроэнергии в европейской части страны обеспечивается в основном на атомных электростанциях. Использование ядерного горючего тесно связано с повышением надежности и ресурса работы парогенераторов и реакторов. Большинство аварий на АЭС происходят из-за коррозионных повреждений парогенерирующих каналов, покрытых отложениями окислов металлов. Предотвращение отложений и защита поверхностей теплообмена от коррозии является одной из главных проблем организации водно-химического режима работы АЭС. При кипении теплоносителя в жидкой фазе пристенного слоя каналов происходит повышение концентрации примесей. Это является причиной образования отложений, коррозии металла и выхода из строя парогенерирующего оборудования. Пористые отложения вызывают дополнительное увеличение концентрации примесей в пристенном слое и ускоряют разрушение металла. Таким образом, проблема исследования массообмена в парогенерирующих каналах с пористыми покрытиями, являющаяся темой настоящей диссертации, весьма актуальна и имеет большое научное и практическое значение.

Цель работы. Провести экспериментальное исследование массообмена в вертикальных парогенерирующих каналах с пористыми покрытиями при различных законах изменения тепловой нагрузки по длине. На основе экспериментальных данных по массообмену разработать метод расчета граничной концентрации примесей в теплоносителе для каналов без покрытий и рекомендовать метод оценки параметра массообмена при кипении в каналах с пористыми покрытиями.

Научная новизна. В результате проведенного экспериментального исследования показано, что концентрация примесей в жидкой фазе пристенного слоя парогенерирующих каналов невелика и по сравнению с концентрацией в ядре потока возрастает не более чем на порядок. Выполнено экспериментальное исследование влияния неравномерного закона обогрева парогенерирующих каналов на массообмен. Установлена консервативность процесса массообмена к косинусоидальному профилю тепловыделения по длине каналов. Впервые для двухфазного потока найдена количественная связь между процессами тепло- и массообмена, на основе которой предложен метод расчета граничной концентрации примесей в теплоно-

НЕ БЕРЕТСЯ

17825282

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1375288
Зуйков А.С. Массообмен в г

М ГТУ
им. Н.Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

сителе на входе в парогенерирующий канал без пористого покрытия, при которой исключается выпадение примесей на стенке. Рекомендован метод оценки параметра массообмена при кипении в каналах с пористыми покрытиями.

Практическая ценность работы заключается в определении концентрации примеси в жидкой фазе пристенного слоя парогенерирующих каналов с пористыми покрытиями при равномерной и изменяющейся по закону косинуса тепловой нагрузке. Экспериментально установлено, что парогенерирующие каналы могут работать длительное время при наличии на поверхности теплообмена пористых отложений окислов железа, обычно встречающихся в практике эксплуатации. Показано, что пористые покрытия значительно расширяют область пузырькового кипения, но ухудшают температурный режим стенки канала в закризисной области. Найдена взаимосвязь между процессами тепло- и массообмена и предложен метод расчёта граничной концентрации на входе в парогенерирующий канал без пористого покрытия. Полученные в работе результаты могут быть использованы при проектировании и разработке парогенерирующего оборудования, а также при оценке надёжности водного режима атомных электростанций.

Автор выносит на защиту результаты экспериментально-расчётного исследования и сделанные на его основе выводы, которые сформулированы в заключительной части автореферата.

Реализация результатов работы. Полученные в работе результаты использовались ВНИИАЭС при оценке надёжности водного режима блоков I-3 Чернобыльской АЭС с реакторами типа РБМК-1000.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на VI Международной конференции по теплообмену, Канада, 1978 г. /г.Торонто/; Международном семинаре "Гидродинамика, тепло- массообмен в двухфазных энергетических и химических системах", Югославия, 1978 г. /г.Дубровник/; Всесоюзных конференциях 1978-1979 гг. /гг.Ленинград, Минск/. По итогам конкурса научно-исследовательских работ ИВТАН 1979 г. авторскому коллективу, членом которого был диссертант, присуждено второе место.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано восемь статей и три научно-исследовательских отчета ИВТАН.

Объём и структура диссертации. Диссертация изложена на 168 страницах, включает 100 страниц машинописного текста, содержит 43 рисунка, 8 таблиц и состоит из введения, четырех глав, основ-

ных результатов работы и выводов, списка цитируемой литературы, включающего 106 источников, приложений на 18 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Введение. Рассмотрены научные и технические задачи, связанные с изучением массообменных процессов, протекающих на обогреваемых поверхностях парогенерирующего оборудования; отмечены основные направления в исследованиях массообмена в парогенерирующих каналах; показана актуальность вопросов, освещенных в работе; кратко сформулирована цель исследования, составляющего содержание диссертации.

Глава первая. Приведен литературный обзор существующих экспериментальных и аналитических исследований процесса массообмена в парогенерирующих каналах без покрытий и при кипении в капиллярно-пористых структурах.

Отмечено, что в настоящее время достаточно хорошо исследованы условия массообмена в парогенерирующих каналах без пористых покрытий с равномерным обогревом по длине. Это работы М.А.Стириковича, Н.Г.Папукова, Ю.О.Нови, М.И.Резникова, Е.И.Невструевой, В.С.Полонского, И.М.Романовского, Е.К.Безрукова, Холла, Штрауба, Хёмига и других. Учёные многих стран обнаружили, что в процессе кипения растворов солей в жидкой фазе пристенного слоя происходит повышение концентрации растворенных примесей. Однако это увеличение невелико и по сравнению с концентрацией в жидкой фазе ядра потока возрастает не более чем на порядок.

Исследований массообмена в парогенерирующих каналах с пористыми покрытиями /например, стенки канала покрыты отложениями окислов железа/ явно недостаточно. Результаты работ /Пиконе и др., В.Ф.Курмаза/ противоречивы и расходятся между собой на 2-3 порядка. Указывается, что в таких условиях массообмен имеет свои особенности. Наличие отложений окислов железа на стенках канала способствует более интенсивному увеличению концентрации примесей в жидкой фазе пристенного слоя и тем самым создается значительная опасность ускорения процесса коррозии металла стенки. Во всех рассмотренных работах исследования проведены при равномерном обогреве каналов. Данные о влиянии других законов распределения тепловой нагрузки в парогенерирующих каналах на массообмен отсутствуют. Эти данные необходимы, так как в па-

рогенераторах и реакторах обычно реализуется неравномерный обогрев каналов по длине и периметру.

Из разбора аналитических исследований по массообмену на парогенерирующих поверхностях следует, что существуют три принципиально отличающихся между собой типа моделей процесса массообмена примесей при наличии на поверхности капиллярно-пористой структуры. Результаты расчёта массообмена по этим моделям значительно различаются между собой.

Основываясь на материалах анализа состояния изучаемой проблемы делаются выводы, которые определили цель настоящей работы, сформулированную выше.

Глава вторая. Для изучения обменных процессов в парогенерирующих каналах была создана экспериментальная установка мощностью 550 кВт и максимальными параметрами рабочего тела: давление в контуре $p=180$ бар, расход $G=0,5$ кг/с. Установка представляет собой замкнутый по теплоносителю контур с электрообогревом экспериментальных участков и нагревателей. Подвод электроэнергии осуществлялся по схеме ноль-фаза-ноль с помощью четырех трансформаторов ОСУ-100/0,5, мощность которых изменялась регуляторами напряжения тиристорного типа РНТО-250-600.

В работе использовались три типа экспериментальных участков, изготовленных из трубы $\phi 10 \times 2$ с вертикальным расположением в пространстве и оснащенных 24 поверхностными хромель-копелевыми термопарами. Материал трубы - сталь марки X18NiOT. Экспериментальные участки первых двух типов имели равномерный обогрев и отличались между собой состоянием теплообменных поверхностей. Поверхность первого участка имела обычную техническую шероховатость. К внутренней поверхности второго участка была прикреплена фильтровальная сетка ГОСТ 3187-65, №120 /эффективный диаметр $d_{эф}=0,2$ мм, относительная толщина $\tilde{\delta}=2/$, которая моделировала наличие пористых отложений. Для исследования массообмена при неравномерном обогреве парогенерирующего канала применялся экспериментальный участок третьего типа. Тепловыделение по длине участка профилировалось по закону косинуса с отношением $q_{ст\max}/q_{ст\min} = 1,75$. Аппроксимация косинусоидального закона обогрева осуществлялась ступенями посредством системы токоподводов, разделяющих экспериментальный участок на секции разной длины. Теплоносителем служила химически обессоленная вода, в которую для создания необходимого состава добавлялся раствор сернокисло-

го кальция известной концентрации, игравшего роль соли-индикатора. Для ввода в рабочее тело продуктов коррозии в схеме установки предусмотрен электролизер.

В качестве параметра процесса массообмена использовалась величина степени концентрирования, которая представляет собой отношение концентраций примеси в жидкой фазе пристенного слоя и ядра потока. Концентрации определялись в сечении начала выпадения примеси /граничное сечение/. Концентрация примеси в жидкой фазе пристенного слоя в этом сечении принималась равной концентрации насыщения примеси в жидкости при температуре стенки. Концентрация примеси в ядре потока находилась экспериментально. Эта концентрация называется граничной и соответствует величине концентрации, выше которой будут происходить отложения примеси на парогенерирующей поверхности. Для нахождения граничной концентрации примеси и расчёта степени концентрирования использовался "солевой" метод, который основан на резко отличной растворимости примесей в жидкой и паровой фазах растворителя. Испарение жидкой фазы растворителя приводит к увеличению концентрации примеси в жидкой фазе пристенного слоя. После достижения предельной концентрации, примесь кристаллизуется и в виде твердой фазы оседает на стенке канала, образуя отложения. Граничная концентрация примеси определялась с помощью химических анализов и по изменению температуры стенки экспериментального участка.

Глава третья. Представлены результаты экспериментального исследования граничной концентрации примеси и степени концентрирования в зависимости от паросодержания. Опыты проведены при равномерном обогреве в каналах без покрытий и с сетчатым покрытием, а также при изменении тепловой нагрузки по закону косинуса в каналах без покрытий и с пористыми отложениями окислов железа. В опытах паросодержание потока на выходе из экспериментальных каналов изменялось от паросодержания начала поверхностного кипения $\mathcal{X}_{нпк}$ до значений, близких к критическим $\mathcal{X}_{кр}$. Пограничные кривые разделяют области наличия и отсутствия отложений примеси на стенках парогенерирующих каналов. В области над кривой отложения имеют место, а под кривой – отложений нет.

При равномерном обогреве парогенерирующих каналов эксперименты проводились в следующих условиях: $p=18,6$ бар, $q_{ст}=350$ кВт/м², $\rho_{ж}=1620$ кг/м³ и $p=69$ бар, $q_{ст}=250$ кВт/м², $\rho_{ж}=1000$ кг/м³ с. Паросо-

держание $I_{\text{нпк}}$ в канале с сетчатым покрытием определялось экспериментально и для первого режима равно $-0,22$, а для второго $-0,18$; в канале без покрытия эта величина составила $-0,045$ и $-0,061$, соответственно. Значение максимального паросодержания обычно ограничивалось критическим паросодержанием. Однако в опытах с сетчатым покрытием кризис не возникал вплоть до $x \sim 1,0$. Это означает, что при исследованных параметрах сетчатое покрытие на парогенерирующей поверхности полностью исключает возникновение кризиса теплоотдачи. В целом можно сказать, что в парогенерирующих каналах с искусственным пористым покрытием область пузырькового кипения значительно расширяется по сравнению с каналами без покрытий.

Экспериментальные данные показывают, что в канале с искусственным пористым покрытием характер зависимости пограничных кривых такой же, как и в каналах без покрытий (рис.1). Однако сами кривые (рис.2) сдвинуты в область меньших значений концентраций. Степень концентрирования примесей в исследованных условиях невелика и даже в канале с сетчатым покрытием не превышает четырех. С ростом паросодержания и давления граничная концентрация примесей в потоке уменьшается. Таким образом, качественные закономерности изменения параметров массообмена находятся в хорошем соответствии с известными результатами, полученными в каналах без покрытий.

В случае обогрева канала по закону косинуса эксперименты проводились при $p=137\text{бар}$, $\rho_0=3500\text{кг/м}^3$. Максимальная тепловая нагрузка (средние секции канала) поддерживалась на уровне $q_{\text{ст}}^{\text{макс}}=580\text{кВт/м}^2$. Сечение начала выпадения примеси находилось по изменению температуры стенки канала. Эксперименты показали, что приращение температуры стенки канала в средних секциях максимально. Считая концентрацию примеси на входе в эти секции известной, можно обработать экспериментальные данные при локальном значении тепловой нагрузки $q_{\text{ст}}^{\text{макс}}=580\text{кВт/м}^2$. На рисунках точками представлены результаты опытов, полученные при обогреве по закону косинуса в канале без покрытий (рис.3) и с пористыми отложениями окислов железа (рис.4). Здесь же приведены зависимости граничной концентрации примеси от паросодержания по данным Стриковича М.А. с соавторами для аналогичных исследований при равномерном обогреве каналов. Кривые вполне удовлетворительно описывают и результаты наших опытов.

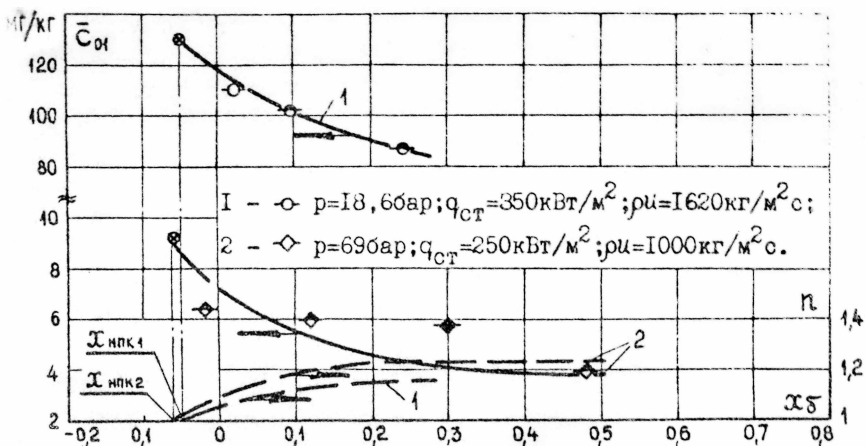


Рис.1. Изменение граничной концентрации соли-индикатора $\bar{c}_{OI}^*$ и степени концентрирования n от паросодержания x_0 в канале без покрытий.

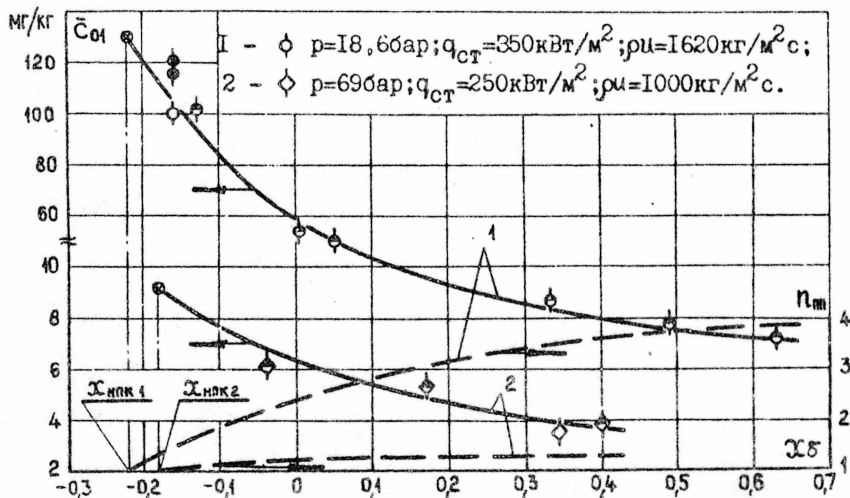


Рис.2. Изменение граничной концентрации соли-индикатора $\bar{c}_{OI}^*$ и степени концентрирования n_m от паросодержания x_0 в канале с сетчатым покрытием.

Сопоставление данных показывает, что условия массообмена в каналах с пористыми отложениями окислов железа значительно хуже, чем в каналах без отложений. В области развитого кипения степень концентрирования примеси приблизительно в три раза превышает значения степени концентрирования для каналов без отложений. Следовательно и в этих условиях высоких значений степени концентрирования примеси получено не было. На рис.4 приведена также пограничная кривая осаждения примеси в каналах без отложений. Наличие пористых отложений окислов железа на парогенерирующей поверхности канала существенно смещает пограничную кривую в область меньших концентраций.

Анализ данных по массообмену показывает, что значения степени концентрирования совпадают при равномерном и неравномерном обогреве как для парогенерирующих каналов без пористых покрытий, так и в каналах с отложениями окислов железа. Это говорит о консервативности процесса массообмена к закону тепловыделения при исследованных параметрах. Этот вывод относится к той части каналов, в которой происходит рост тепловой нагрузки по длине.

Установление факта консервативности процесса массообмена к закону тепловыделения имеет важное практическое значение. Это означает, что для слабого роста тепловой нагрузки по длине парогенерирующих каналов степень концентрирования можно определять по локальным параметрам p , $q_{ст}$, q_u , x . Полученный результат согласуется с выводами о консервативности закона теплообмена в однофазных потоках к изменению граничных условий на стенке.

Глава четвертая. Для выявления общих закономерностей процесса массообмена в парогенерирующих каналах выполнена систематизация наших и литературных данных, полученных в диапазоне параметров: в каналах без покрытий - $p=1,18-167$ бар, $q_{ст}=250-870$ кВт/м², $q_u=1000-3500$ кг/м²с; в каналах с отложениями окислов железа - $p=98-167$ бар, $q_{ст}=580-1160$ кВт/м², $q_u=1000-3500$ кг/м²с. Систематизация осуществлена в зависимости от обобщающего параметра $X=(x-x_{нпк})/(x_{кр}-x_{нпк})$, который изменяется от 0 до 1. Анализируя влияние отдельных режимных параметров, можно отметить, что с увеличением давления и тепловой нагрузки степень концентрирования возрастает, а с повышением массовой скорости - снижается. Результаты систематизации данных по массообмену в парогенерирующих каналах могут быть использованы при выборе водного режима и в расчётах интенсивности коррозии металла стенок.

Рис.3. Зависимость граничной концентрации примеси $\bar{c}_{OI}^*$ и степени концентрирования η от паросодержания x_0 в каналах без отложений при обогреве по закону косинуса.

$p=137\text{бар}, \rho u=3500\text{кг/м}^2\text{с}.$

1,2 - данные настоящей работы при $q_{\text{ст}}^{\text{макс}}=580\text{кВт/м}^2, \bar{q}_{\text{ст}}=420\text{кВт/м}^2$;
3 - кривая Стирковича, Полонского, Безрукова для $q_{\text{ст}}=\text{const}=580\text{кВт/м}^2.$

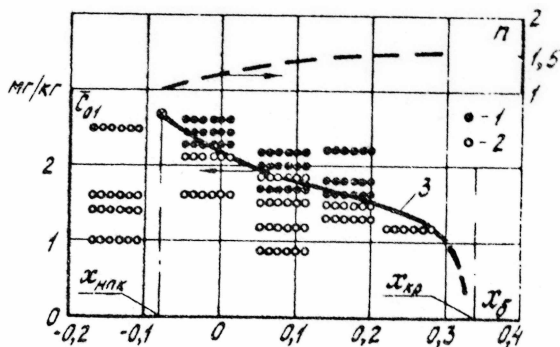
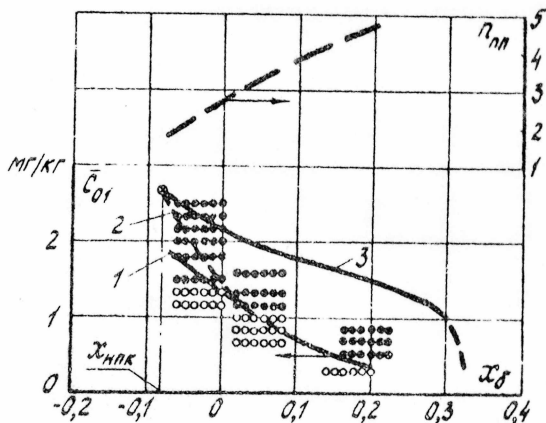


Рис.4. Зависимость граничной концентрации примеси $\bar{c}_{OI}^*$ и степени концентрирования $\eta_{\text{пп}}$ от паросодержания x_0 в каналах с пористыми отложениями окислов железа при обогреве по закону косинуса.

$p=137\text{бар}, \rho u=3500\text{кг/м}^2\text{с}.$

1 - данные настоящей работы при $q_{\text{ст}}^{\text{макс}}=580\text{кВт/м}^2, \bar{q}_{\text{ст}}=420\text{кВт/м}^2$;
2 - кривая Стирковича, Полонского, Курмаза для $q_{\text{ст}}=\text{const}=580\text{кВт/м}^2$;
3 - кривая Стирковича, Полонского, Безрукова для $q_{\text{ст}}=\text{const}=580\text{кВт/м}^2$ в каналах без отложений.



Проведены опыты по влиянию отложений окислов железа на температурный режим парогенерирующих каналов в закризисной области. Установлено, что при одинаковых режимных условиях в канале без покрытия температура стенки не превышает 440°C , а в канале с отложениями окислов железа максимальная температура стенки была выше 600°C . Столь значительное изменение температурного режима можно объяснить, по-видимому, тем, что при возникновении кризиса теплоотдачи поры отложений заполняются практически неподвижным паром. Термическое сопротивление слоя железистых отложений, заполненного перегретым паром, весьма высокое, что приводит к дополнительному возрастанию температуры стенки. Полученный результат необходимо учитывать при проектировании парогенерирующих систем для работы в закризисной области с пористыми отложениями окислов железа.

С целью определения расчетных значений граничной концентрации примесей в теплоносителе для парогенерирующих каналов без пористых покрытий рассмотрим модель процесса массообмена при постоянном тепловом потоке по длине канала (рис.5). На вход в канал поступает жидкость с известной концентрацией примеси, меньшей концентрации насыщения. До тех пор, пока на обогреваемой стенке канала не начнется процесс парообразования, концентрация примеси по сечению потока постоянна. При кипении пузырьки пара отрываются от поверхности нагрева, сносятся потоком жидкости и образуют развивающийся диффузионный пограничный слой. Концентрация примеси изменяется только в пределах слоя, в котором находятся пузырьки пара. В этом слое концентрация примеси в жидкой фазе выше, чем в жидкой фазе ядра потока за счет существенно меньшей растворимости примеси в паре. Максимальная концентрация примеси в жидкой фазе на стенке $c'_{\text{ст}}$. Таким образом, процесс парообразования является источником концентрирования примесей в жидкости у стенки. По мере прогрева жидкости в канале интенсивность парообразования возрастает, что приводит к дальнейшему росту концентрации примесей в жидкости.

Введем безразмерный поток примеси $St_{\text{дл}}$ (диффузионный критерий Стентона)

$$St_{\text{дл}} = j_{\text{п}} c'_{\text{ст}} / (\bar{q}) (c'_{\text{ст}} - \bar{c}_0) \quad (I)$$

и безразмерный поток тепла к жидкой фазе $St_{\text{тж}}$ (тепловой крите-

рий Стентона)

$$St_{тж} = (q_{ст} - \dot{j}_п L) / (\bar{\rho} u) (h_{ст} - h_o') . \quad (2)$$

Для турбулентного течения в канале в первом приближении принимаем аналогию между процессами переноса массы и тепла. Считаем, что моли жидкости, которые переносят примесь, одновременно переносят и тепло, т.е.

$$St_{дж} = St_{тж} . \quad (3)$$

Полагая, что выпадение примеси на стенке канала происходит тогда, когда концентрация примеси в жидкой фазе пристенного слоя достигает концентрации насыщения, с учетом принятой аналогии можно записать следующую систему уравнений:

$$\dot{j}_п c_H' / (\bar{\rho} u) (c_H' - \bar{c}_o') = (q_{ст} - \dot{j}_п L) / (\bar{\rho} u) (h_{ст} - h_o') , \quad (4)$$

$$\bar{c}_o' = \bar{c}_{OI}^* / (1 - \bar{x}_и) , \quad (5)$$

$$h_{ст} = h' + c_p \Delta T_{ст} , \quad (6)$$

$$\Delta T_{ст} = q_{ст} / \alpha , \quad (7)$$

$$\alpha = \alpha(p, q_{ст}, \rho u, x \dots) , \quad (8)$$

$$h_o' = (h_o - K \bar{x}_и) / (1 - \bar{x}_и) . \quad (9)$$

Решая систему уравнений относительно безразмерной граничной концентрации, получаем:

$$\bar{c}_{OI}^* = (1 - \bar{x}_и) (1 - \bar{Z}) . \quad (10)$$

В уравнении введены обозначения: $\bar{c}_{OI}^* = \bar{c}_{OI}^* / c_H'$;

$\bar{Z} = [(h_{ст} - h_o') / L] [\dot{j}_п / (1 - \bar{j})]$; $\bar{j} = \dot{j}_п / \dot{j}_{п\text{кр}}$; $\dot{j}_{п\text{кр}} = q_{ст} / L$ - максимальный поток пара от стенки в предкризисном сечении при наибольшем коэффициенте теплоотдачи.

Однако рассчитать граничную концентрацию примеси $\bar{c}_{OI}^*$ и сопоставить рассчитанные значения с экспериментальными данными не представляется возможным из-за отсутствия информации по интенсивности парообразования $\dot{j}_п$.

Для дальнейшего развития модели воспользуемся результатами асимптотической теории Кутателадзе-Леонтьева. Предельный относи-

тельный закон для случая отсоса жидкости получен в следующем виде:

$$\sqrt{\Psi_s} = \int_0^I \alpha \psi / \sqrt{1 - b_I \psi}. \quad (11)$$

Интегрируя это выражение и используя отношение текущего значения параметра проницаемости к критическому, имеем:

$$\frac{j_{п}}{j_{п\text{кр}}} = \frac{1 - \sqrt{St/St_0}}{1 - \sqrt{St_{кр}/St_0}} \quad (12)$$

Трудности в определении параметров потока на стенке не позволяют получить расчетную зависимость. Учитывая связь между критерием Стентона и коэффициентом теплоотдачи, в зависимости от которого обычно обрабатываются экспериментальные данные по теплообмену, можно заменить неизвестный критерий Стентона на коэффициент теплоотдачи α . Естественно, что вид функциональной связи в этом случае не известен. Принимая во внимание последнее замечание, выражение (12) окончательно можно записать:

$$\frac{j_{п}}{j_{п\text{кр}}} = f_I \left[\frac{1 - \sqrt{\alpha/\alpha_{нпк}}}{1 - \sqrt{\alpha_{кр}/\alpha_{нпк}}} \right] = f_I \left[\frac{\sqrt{\alpha} - \sqrt{\alpha_{нпк}}}{\sqrt{\alpha_{кр}} - \sqrt{\alpha_{нпк}}} \right] \quad (13)$$

или $f = f_I(\tilde{\alpha})$, где $\tilde{\alpha} = (\sqrt{\alpha} - \sqrt{\alpha_{нпк}}) / (\sqrt{\alpha_{кр}} - \sqrt{\alpha_{нпк}})$ - безразмерный коэффициент теплоотдачи.

Решая рассмотренную выше систему уравнений (4-9) относительно интенсивности парообразования, получаем:

$$j_{п} = \frac{q_{ст} \left\{ 1 - \left[\bar{c}_{OI}^* / c_n^* (1 - \bar{\alpha}_n) \right] \right\}}{(h_{ст} - k_0) + \mathcal{L} \left\{ 1 - \left[\bar{c}_{OI}^* / c_n^* (1 - \bar{\alpha}_n) \right] \right\}} \quad (14)$$

Из этого уравнения, с учётом экспериментальных данных по граничной концентрации примеси, рассчитывались значения интенсивности парообразования. Для этих же режимных параметров по известным зависимостям находились значения $\alpha_{нпк}$, α , $\alpha_{кр}$; затем безразмерный коэффициент теплоотдачи и строилась обобщающая зависимость $f = f_I(\tilde{\alpha})$ (рис. 6).

Обрабатывались опытные данные, полученные при равномерном по длине каналов обогреве в диапазоне параметров: $p=1,18, 98-167$ бар; $q_{ст}=291-870$ кВт/м²; $\rho_0=1000-3500$ кг/м³с; $\bar{\alpha}_{нпк} < \bar{\alpha} < \bar{\alpha}_{кр}$. Все опытные точки обобщаются единой зависимостью. Отклонение

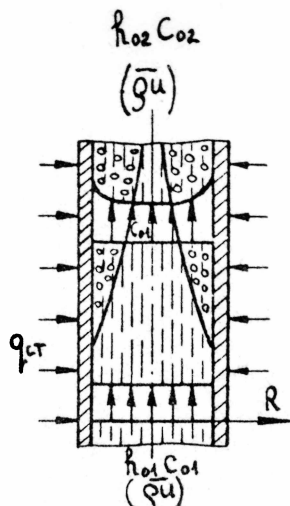


Рис.5. Физическая модель процесса массообмена.

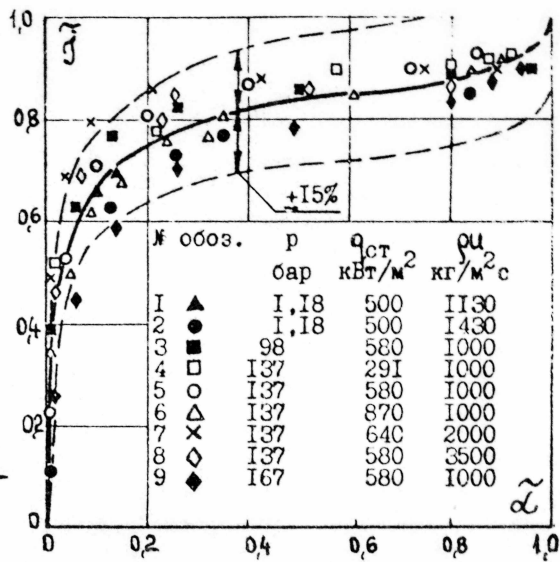


Рис.6. Обобщение экспериментальных данных по массообмену в каналах без покрытий в координатах $\tilde{J} = f_1(\alpha)$.

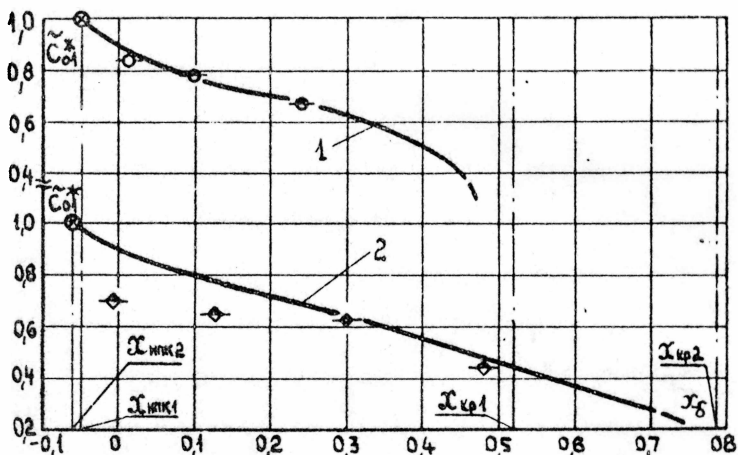


Рис.7. Сопоставление экспериментальных точки и расчётных кривые данных в канале без покрытия.

1 - $\circ$ - $p=18,6$ бар; $q_{ст}=350$ кВт/м²; $\rho_{г}=1620$ кг/м³ с;
 2 - $\diamond$ - $p=69$ бар; $q_{ст}=250$ кВт/м²; $\rho_{г}=1000$ кг/м³ с.

большинства точек от аппроксимирующей кривой не превышает $\pm 15\%$. Заметное расслоение точек по режимным параметрам - давлению, тепловой нагрузке, массовой скорости - отсутствует.

С целью подтверждения справедливости полученных результатов были проведены специальные опыты при средних давлениях. Расчёт $\mathcal{L}$ проводился по изложенной выше методике, параметр $\mathcal{J}$ находился по обобщающей зависимости рис.6. Результаты сопоставления, представленные на рис.7, показывают, что экспериментальные точки вполне удовлетворительно группируются около расчётных кривых.

Проведенное обобщение экспериментальных данных позволило найти зависимость между процессами тепло- и массообмена в двухфазном потоке и проверить её. Это дает возможность предложить метод расчёта граничной концентрации примесей теплоносителя, при которой исключается выпадение примесей на стенке парогенерирующего канала. Установление количественной связи между процессами тепло- и массообмена имеет большое научное и практическое значение. С помощью полученной зависимости, используя данные по теплообмену, можно определить условия массообмена и наоборот. Это может значительно сократить объём исследований процесса массообмена в парогенерирующих каналах и обеспечить выбор более оптимальных параметров при проектировании и разработке парогенераторов и реакторов атомных электростанций.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.

1. Анализ литературных данных по массообмену в парогенерирующих каналах без покрытий показал, что в условиях работы энергетического оборудования степень концентрирования примесей на теплообменных поверхностях не превышает десяти. Для парогенерирующих каналов с пористыми покрытиями результаты разных исследователей различаются между собой, значения степени концентрирования расходятся на два-три порядка.

2. Создана экспериментальная установка мощностью 550 кВт, позволяющая проводить исследования процессов тепло- и массообмена при максимальных параметрах рабочего тела: $p=180\text{ бар}$, $G=0,5\text{ кг/с}$. Показано, что при равномерном обогреве по длине парогенерирующих каналов в стандартных условиях без покрытий и с капиллярно-пористым покрытием фиксированной геометрии наибольшее значение степени концентрирования $\Pi < 4$ при параметрах: $p=13,6$ и 69 бар , $q_{\text{ст}}=14$

$=350$ и 250 кВт/м^2 , $\rho_0=1620$ и $1000 \text{ кг/м}^3 \text{ с}$, $X_{\text{нпк}} < X < X_{\text{кр}}$. Экспериментально установлено, что пористые покрытия значительно расширяют область пузырькового кипения – облегчают условия закипания жидкости и увеличивают критическое паросодержание. В частности, в исследованных условиях в парогенерирующих каналах с искусственным покрытием кризис теплоотдачи не возникал вплоть до $X = 1,0$.

3. Найдено, что при обогреве по закону косинуса парогенерирующих каналов без покрытий и с пористыми отложениями окислов железа степень концентрирования не превышает десяти. Опыты проведены при параметрах: $p=137 \text{ бар}$, $q_{\text{ст}}^{\text{макс}}=580 \text{ кВт/м}^2$, $\bar{q}_{\text{ст}}=420 \text{ кВт/м}^2$, $\rho_0=3500 \text{ кг/м}^3 \text{ с}$, $-0,1 < X < 0,22$. В таких условиях слой железисто-окисных отложений практически не повлиял на величину критического паросодержания. Однако температурный режим стенки канала в закризисной области существенно ухудшился.

4. Установлено, что интенсивность массообмена консервативна к изменению профиля тепловой нагрузки по длине парогенерирующих каналов. Результаты опытов по величине степени концентрирования примесей воды в каналах с тепловыделением по закону косинуса совпали в области повышения тепловой нагрузки с данными при равномерном обогреве.

5. Предложена модель процесса массообмена в парогенерирующих каналах без покрытий. На основании асимптотической теории турбулентного пограничного слоя выявлены определяющие параметры и обработаны опытные данные ряда исследований в широком диапазоне изменения режимных факторов. Разработан метод расчёта граничной концентрации примесей в теплоносителе на входе в парогенерирующий канал. Проведена его экспериментальная проверка, которая показала удовлетворительную сходимость результатов расчета с опытными данными. Из анализа известных моделей рекомендован метод оценки параметра массообмена при кипении в каналах с пористыми покрытиями.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.

1. Стирикович М.А., Леонтьев А.И., Полонский В.С., Зуйков А.С. Экспериментальное исследование условий массообмена в парогенерирующих каналах с тепловыделением по закону косинуса.- Теплофизика высоких температур, 1978, т.16, №3, с.548-555.
2. Styrikovich M.A., Leontiev A.I., Polonsky V.S., Zuikov A.S. Heat & Mass Transfer Interrelation. - Sixth International Heat Transfer Confer., Toronto, Canada, Aug.7-11, 1978, p.347-352.
3. Styrikovich M., Leontiev A., Polonsky V., Zuikov A., Malashkin I., Dvoretzky A. Influence of Crud Deposits to Heat and Mass Transfer in Steam Generation Channels. - International Seminar. Momentum, Heat and Mass Transfer in Two-Phase Energy and Chemical Systems. Dubrovnik, Yugoslavia, Sep.4-9, 1978, p.549-560.
4. Стирикович М.А., Полонский В.С., Зуйков А.С. Влияние железисто-окисных отложений на температурный режим парогенерирующих каналов в закризисной области.- Теплофизика высоких температур, 1978, т.16, №6, с.1314-1316.
5. Полонский В.С., Зуйков А.С., Леонтьев А.И., Стирикович М.А. Метод расчета массообмена в парогенерирующих каналах.- Теплофизика высоких температур, 1979, т.17, №1, с.109-115.
6. Стирикович М.А., Полонский В.С., Зуйков А.С. Экспериментальное исследование условий концентрирования примесей воды в парогенерирующих каналах с капиллярно-пористой структурой фиксированной геометрии.- Теплофизика высоких температур, 1979, т.17, №4, с.869-871.

Подписано к печати 29.04.81 № Т-09614. Заказ 477. Тираж 100 экз.
КМС ОКБ ИВТАН

