

На правах рукописи

СУДАРЧИКОВ Александр Михайлович

НЕУСТОЙЧИВЫЕ РЕЖИМЫ ТЕЧЕНИЯ ПРИ КИПЕНИИ В КАНАЛЕ -
ВОЗНИКНОВЕНИЕ, ХАРАКТЕРИСТИКИ, ВЛИЯНИЕ НА
ТЕПЛООБМЕН И КРИЗИС



Специальность 01 04 14 - Теплофизика и теоретическая теплотехника

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Москва - 2007

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Московский энергетический институт (технический университет) в Центре высоких технологий

Научный консультант

член-корреспондент РАН,
доктор технических наук, профессор, Клименко Александр Викторович

Официальные оппоненты

доктор технических наук, Зейгарник Юрий Альбертович

доктор технических наук, профессор, Кузма-Кичта Юрий Альфредович

доктор технических наук, профессор, Федоров Владимир Алексеевич

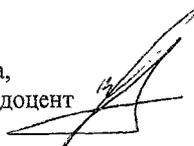
Ведущая организация Московский авиационный институт (Государственный технический университет) г Москва

Защита состоится 9 ноября 2007 года в 10-00 на заседании диссертационного совета Д 212 157 04 при ГОУВПО "Московский энергетический институт (технический университет)" по адресу 111250, г Москва, Красноказарменная ул, д 14, Малый актовЫй зал

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ГОУВПО "МЭИ (ТУ)"

Автореферат разослан " 3 " октября 2007 года

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук, доцент /Мика В И /



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы Успешное решение задачи повышения эффективности использования теплообменного оборудования с кипящим в канале теплоносителем непосредственным образом связано со знанием условий возникновения в кипящем потоке гидродинамической неустойчивости Ее негативная роль заключается в возникновении в кипящем потоке колебаний давления, расхода и температуры стенки канала, которые могут привести к значительному отклонению их фактических значений от проектных и таким образом вызвать нарушение заданного режима работы оборудования Кроме этого, подобные колебания могут привести к раннему кризису кипения и таким образом не только ограничить величину теплового потока, отводимого от поверхности теплообмена, но и привести к физическому разрушению конструкции

Существенно неконструктивную роль гидродинамическая неустойчивость играет в экспериментальной практике при исследовании теплообмена и гидродинамики при течении теплоносителя в обогреваемом канале В частности, ее возникновение является одной из причин неоднозначности экспериментальных результатов, получаемых при исследовании кризиса кипения в канале

Большинство экспериментальных исследований гидродинамической неустойчивости кипящего в канале теплоносителя было проведено при расходах, при которых в суммарных потерях давления в кипящем потоке по длине канала доминирует составляющая потерь на трение (в дальнейшем изложении "высокие расходы") Вместе с тем, на практике возможны ситуации, например при эксплуатации криогенных жидкостей, когда течение теплоносителя характеризуется расходами, при которых в суммарных потерях давления в кипящем потоке по длине канала доминирует нивелирная составляющая ("невысокие расходы") Однако условия возникновения и развития гидродинамической неустойчивости в кипящем теплоносителе в этих условиях практически не изучены Не исследовано влияние режимных параметров Не выявлены типы гидродинамической неустойчивости и их отличия от типов, характерных для высоких расходов теплоносителя

Практически не исследовано влияние гидродинамической неустойчивости на теплообмен при течении теплоносителя в обогреваемом канале

Большая часть опытных данных по исследованию гидродинамической неустойчивости накоплена в экспериментах с водой и некоторыми фреонами Известны немногочисленные работы, где исследования проводились на криогенных жидкостях - на водороде и азоте Однако объем опытных данных, полученных в этих работах, крайне ограничен К тому же эти исследования проводились в специфических условиях около- и сверхкритические давления в опытах с водородом или узкие диапазоны изменения режимных параметров и особенная геометрия образца в опытах с азотом

В настоящее время, по-видимому, отсутствует расчетный способ определения границы гидродинамической неустойчивости в кипящем потоке теплоносителя, который был бы справедлив для разных жидкостей, различных условий их использования. Существующие способы, как правило, верно отражая механизм возникновения колебаний, требуют для своего использования специфических сведений об условиях течения в обогреваемом канале теплоносителя, например способов расчета коэффициента гидравлического сопротивления течению кипящего теплоносителя, коэффициента теплоотдачи, паросодержания двухфазного потока и т. д. Или ориентированы на использование для конкретного теплоносителя и условий его применения.

В связи с изложенным, экспериментальное исследование гидродинамической неустойчивости при течении в обогреваемом канале вынужденного потока азота при невысоких расходах в широком диапазоне изменения режимных параметров и прежде всего давления, ее влияния на теплообмен (теплоотдача при кипении, кризис кипения) и разработка способа расчетного определения границы гидродинамической неустойчивости для кипения в канале азота в этих условиях является чрезвычайно актуальным.

Кроме этого, знание условий возникновения гидродинамической неустойчивости в кипящем потоке теплоносителя позволит провести исследования теплоотдачи при кипении и кризиса кипения в ранее не исследованных диапазонах изменения режимных параметров, в частности, в условиях существования колебательных режимов течения кипящего теплоносителя.

Работа выполнена в рамках научных исследований, проводившихся по грантам РФФИ, Минобразования РФ и Президента РФ, программам Минпромнауки РФ и Минобрнауки РФ.

Цель работы. Экспериментальное исследование гидродинамической неустойчивости при кипении в канале вынужденного потока азота в условиях доминирования в суммарных потерях давления по длине парогенерирующего канала нивелирной составляющей. Выявление физических закономерностей возникновения и развития гидродинамической неустойчивости в кипящем потоке в указанных условиях его течения в канале. Идентификация типа/типов гидродинамической неустойчивости. Определение их места в общей классификации типов гидродинамической неустойчивости.

Определение предельных условий существования в кипящем в канале потоке азота гидродинамической неустойчивости.

Выяснение возможности перенесения выявленных закономерностей на теплоносители иного рода и иные условия их использования.

Исследование влияния гидродинамической неустойчивости на теплоотдачу при кипении и кризиса кипения при течении азота в обогреваемом канале. Установление закономерностей и количественных характеристик этого влияния.

Исследование теплоотдачи при кипении и кризиса кипения вынужден-

ного потока азота в канале в широких диапазонах изменения давления и теплового потока в условиях гидродинамически устойчивого и гидродинамически неустойчивого течения двухфазного потока

Разработка рекомендаций

- для расчетного определения условий наступления в кипящем в канале потоке азота гидродинамической неустойчивости,
- для расчета теплоотдачи при кипении вынужденного потока азота в канале в исследованных диапазонах изменения режимных параметров, в частности при высоких тепловых потоках и давлениях,
- для расчета кризиса кипения в канале в исследованных диапазонах изменения режимных параметров, в частности при высоких давлениях

Научная новизна Впервые проведено комплексное экспериментальное исследование термо - гидродинамики при тчении в обогреваемом канале азота в широком диапазоне изменения давления ($p/p_{кр} = 0,08 - 0,82$, недогрева жидкости до температуры насыщения $\Delta T_{нед} = (1,0 - 22,7)$ К, массовой скорости $G = (100 - 802)$ кг/(м² с) и теплового потока $q = 0 - q_{кр}$

Подробно исследовано возникновение и развитие гидродинамической неустойчивости при тчении в канале кипящего азота в условиях доминирования в суммарных потерях давления по длине парогенерирующего канала нивелирной составляющей - массовая скорость изменялась в диапазоне $G = (100-670)$ кг/(м²с) Выявлены и подробно изучены физические закономерности исследованной в работе гидродинамической неустойчивости

Впервые подробно исследовано влияние гидродинамической неустойчивости на теплоотдачу при кипении вынужденного потока азота в канале Выявлен и подробно исследован доминирующий при этом тип гидродинамической неустойчивости - термические колебания Установлены количественные связи между режимными параметрами на границе гидродинамической неустойчивости

Показано, что существуют условия тчения в канале кипящего теплоносителя, при которых гидродинамическая неустойчивость не оказывает влияние на возникновение кризиса кипения Иными словами, в условиях существования в кипящем теплоносителе неустойчивости, возможно его продолжительное тчение без возникновения раннего кризиса кипения в широком диапазоне изменения теплового потока, вплоть до критического теплового потока, соответствующего кризису кипения при его гидродинамически устойчивом тчении

Предложена карта гидродинамической неустойчивости (термические колебания) для кипения в канале вынужденного потока азота, охватывающая области невысоких и высоких недогревов жидкости до температуры насыщения, отличающиеся противоположным влиянием недогрева на гидродинамическую неустойчивость тчения кипящего азота Определено условие, разделяющее границу гидродинамической неустойчивости (терми-

ческие колебания) на области невысоких и высоких недогревов

Предложены соотношения для определения условий наступления в кипящем потоке теплоносителя гидродинамической неустойчивости

Проведено исследование теплоотдачи при кипении азота в канале в широких диапазонах изменения теплового потока и давления как при гидродинамически устойчивом, так и при гидродинамически неустойчивом течении кипящего азота

Впервые проведено исследование теплоотдачи при кипении азота в канале для высоких давлений - до $p = 23,2 \cdot 10^5$ Па ($(p/p_{кр}) = 0,68$)

Показано, что степень влияния удельного теплового потока на интенсивность теплоотдачи при пузырьковом кипении азота, является слабой функцией давления, т е для соотношения $\alpha \sim q^n$ установлено, что $n \sim p^{0,2}$

Впервые проведено экспериментальное исследование кризиса кипения вынужденного потока азота при высоких давлениях - до $p = 27,3 \cdot 10^5$ Па. Получены новые опытные значения удельного критического теплового потока $q_{кр}$ в ранее не исследованных диапазонах изменения давления, критического паросодержания (локальная гипотеза происхождения кризиса кипения) и массовой скорости

С использованием вновь полученных опытных значений критического теплового потока $q_{кр}$ проведена модификация фрагмента таблицы рекомендуемых значений критического теплового потока для кипения вынужденного потока азота в канале диаметром 8 мм для давления $p = 20 \cdot 10^5$ Па

Практическая ценность Получены новые знания о закономерностях возникновения и развития гидродинамической неустойчивости при течении жидкого азота в обогреваемом канале в условиях доминирования в суммарных потерях давления по длине канала нивелирной составляющей, которые могут быть использованы при проектировании теплообменных устройств с кипящим в канале теплоносителем, а также при разработке методик расчета условий наступления гидродинамической неустойчивости при течении в канале кипящего теплоносителя

Определена верхняя граница по давлению существования гидродинамической неустойчивости вообще и термических колебаний в частности в кипящем в канале вынужденном потоке теплоносителя в условиях доминирования в суммарных потерях давления по длине парогенерирующего канала нивелирной составляющей

Определены режимные условия существования в кипящем в канале потоке азота гидродинамической неустойчивости типа "термические колебания"

Построена карта гидродинамической неустойчивости (термические колебания) для течения в обогреваемом канале вынужденного потока азота в широких диапазонах изменения давления, массовой скорости и недогрева жидкости

Определено условие, разделяющее границу гидродинамической неустойчивости на области высоких и невысоких недогревов жидкости, отличающиеся противоположным влиянием недогрева на гидродинамическую неустойчивость течения в канале кипящего теплоносителя

Предложены расчетные рекомендации для определения условий возникновения в кипящем потоке теплоносителя гидродинамической неустойчивости

Показана пригодность соотношения, разработанного для области высоких недогревов жидкости, для описания границы гидродинамической неустойчивости при кипении в канале теплоносителей иного рода, в частности воды и фреона - 11

На защиту выносятся следующие результаты

1 Экспериментальные результаты исследования

1) гидродинамической неустойчивости в кипящем в канале вынужденном потоке азота и ее влияния на теплообмен (теплоотдача при кипении, кризис кипения) в условиях доминирования в суммарных потерях давления по длине канала нивелирной составляющей,

2) теплообмена при течении вынужденного потока азота в канале в широких диапазонах изменения теплового потока и давления, в том числе в условиях гидродинамически устойчивого и неустойчивого течения кипящего азота,

3) кризиса кипения азота в канале при высоких давлениях

2 Закономерности возникновения и развития гидродинамической неустойчивости в кипящем потоке теплоносителя для условий доминирования в суммарных потерях давления по длине канала нивелирной составляющей

3 Соотношения для расчета границы гидродинамической неустойчивости кипящего в канале вынужденного потока азота для областей высоких и невысоких недогревов жидкости

4 Рекомендации для расчета теплоотдачи при кипении и кризиса кипения при течении вынужденного потока азота в канале при высоких давлениях

Результаты проведенных исследований, используются в учебном процессе МЭИ (ТУ) при подготовке бакалавров по направлению " Техническая физика ", инженеров по специальности " Техника и физика низких температур "

Личный вклад автора Автор сформулированы основные требования к экспериментальной методике Автор непосредственно участвовал в ее разработке на всех этапах, включая тестирование, программное обеспечение, апробирование и т д

Все экспериментальные результаты получены лично автором при участии руководимых им студентов

Автор принимал непосредственное участие в постановке задачи исследова-

дования, обработке, анализе и интерпретации полученных опытных результатов, выявлении закономерностей

Автором разработаны расчетные соотношения для определения границы гидродинамической неустойчивости (термические колебания) при кипении в канале вынужденного потока азота для областей невысоких и высоких недогревов жидкости. Определено условие, разграничивающее указанные области недогревов жидкости.

Апробация. Основные результаты работы были доложены и обсуждены на 15 международных и всероссийских конференциях, симпозиумах, семинарах, проходивших в СССР, Российской Федерации и за рубежом в период с 1983 по 2006 годы.

Публикации. Материалы диссертации изложены в 23 публикациях, а также в 25 научно-технических отчетах, ответственным исполнителем и руководителем которых являлся автор настоящей работы.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, выводов и приложения (Атлас экспериментальных результатов). Содержит 320 страниц машинописного текста, включая 96 рисунков и 5 таблиц. Список использованной литературы включает 139 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе представлено описание типов гидродинамической неустойчивости, возникновение которых возможно при течении двухфазного потока теплоносителя в различных геометрических и режимных условиях, в том числе и типичных для кипения в канале криогенных жидкостей.

Обращено внимание на граничные условия, принимаемые в экспериментах по исследованию гидродинамической неустойчивости кипящего в канале теплоносителя.

Проведен обзор экспериментальных исследований гидродинамической неустойчивости течения кипящего в канале теплоносителя, который позволил сделать выводы о степени изученности данной проблемы, определить целесообразные направления продолжения ее исследования с целью накопления опытных данных в ранее не исследованных диапазонах изменения режимных параметров, выявления неизвестных закономерностей данного явления. Рассмотрены работы, в которых исследовались общие фундаментальные закономерности возникновения и развития гидродинамической неустойчивости при кипении в канале теплоносителя.

Проанализированы полученные в них результаты и установленные закономерности. Рассмотрены результаты исследования влияния режимных параметров - давления, расхода, теплового потока, недогрева жидкости до температуры насыщения, на гидродинамическую неустойчивость течения в канале кипящего теплоносителя.

Показано, что экспериментальные исследования гидродинамической

неустойчивости течения в канале кипящего теплоносителя проводились в основном при высоких расходах, при кипении различных жидкостей в каналах разной геометрии и ориентации. Именно для этих условий исследовались типы гидродинамической неустойчивости, наиболее часто встречающиеся в кипящем потоке теплоносителя на практике.

Сделан вывод о крайней ограниченности исследований гидродинамической неустойчивости течения в канале кипящего теплоносителя при высоких расходах. Практически не изучено влияние на возникновение и развитие гидродинамической неустойчивости в этих условиях режимных параметров. Не выявлены и не исследованы типы гидродинамической неустойчивости, характерные для этих условий, их особенности и отличия от типов, характерных для высоких расходов.

В целом обзор экспериментальных исследований позволяет сделать вывод о том, что, несмотря на многолетнее и пристальное внимание к данной проблеме, исследованиями не охвачены все многообразие практических ситуаций течения в обогреваемом канале/каналах двухфазного потока теплоносителя, в которых возможно возникновение гидродинамической неустойчивости.

Исследования проводились при разном способе организации течения теплоносителя, на разных жидкостях, в произвольных диапазонах изменения режимных параметров и прежде всего давления. В качестве экспериментальных образцов использовались каналы различной геометрии и ориентации. Однако, условия проведения экспериментальных исследований не носят систематического характера.

Так исследованиями охвачен широкий диапазон изменения давления. Однако диапазоны изменения давления в каждой конкретной работе были ограничены конкретными условиями проведения опытов. Соответственно, систематических экспериментальных исследований влияния давления, в широком диапазоне его изменения, на гидродинамическую неустойчивость течения в канале кипящего теплоносителя фактически проведено не было. Не были исследованы предельные условия существования в кипящем потоке гидродинамической неустойчивости.

Практически не исследовано влияние гидродинамической неустойчивости на теплообмен, в частности на теплоотдачу при кипении и кризис кипения. Зафиксированные в опытах термические колебания имели разную природу и их исследования носили поверхностный характер.

В продолжающихся экспериментальных исследованиях гидродинамической неустойчивости в кипящем в канале теплоносителе исследователи продолжают открывать новые типы гидродинамической неустойчивости, не описанные в известных классификациях.

Во второй главе проведен обзор способов расчетного определения границы гидродинамической неустойчивости течения в канале/каналах кипящего теплоносителя, которые наиболее верно отражают механизм возник-

новения гидродинамической неустойчивости, характеризуются наибольшей проработанностью и, по-видимому, наиболее перспективные для практического использования. Они могут быть сгруппированы следующим образом

1) Расчет распределения параметров двухфазного потока теплоносителя по длине парогенерирующего канала и их изменение во времени при возникновении и существовании в кипящем потоке гидродинамической неустойчивости

В этом случае применяются численные методы. Их использование позволяет с необходимой точностью рассчитать распределение плотности смеси, давления, паросодержания двухфазного потока и т. д. по длине канала в произвольный момент времени и их изменение во времени при любых начальных условиях и практически для любой геометрии канала. С помощью численных методов возможно исследование любых типов гидродинамической неустойчивости. Однако, необходимость использования при этом соответствующих эмпирических соотношений, а также зависимость решения от исходных условий и, следовательно, невозможность перенесения полученных результатов на иные условия, сужает возможности их применения на практике.

2) Определение количественного условия, при выполнении которого в кипящем потоке теплоносителя может возникнуть гидродинамическая неустойчивость

К этой группе относятся способы расчета границы гидродинамической неустойчивости кипящего теплоносителя без описания ее развития и ее характеристик.

Расчетные способы, отнесенные к этой группе, вполне адекватны природе гидродинамической неустойчивости, возникающей в кипящем потоке, однако их использование на практике связано со знанием способа расчета гидравлического сопротивления течению в канале кипящего теплоносителя.

3) Эмпирические соотношения. Разработаны с использованием опытных данных, полученных в специально поставленных экспериментах. В связи с чем обладают, по-видимому, наиболее высокой точностью и надежностью.

4) Графические методы. Обладают наибольшей наглядностью. В качественном отношении верно описывают границу гидродинамической неустойчивости кипящего в канале теплоносителя как для области высоких, так и невысоких недогревов жидкости. Однако известные графические методы не полностью описывают влияние режимных параметров на гидродинамическую неустойчивость течения в канале кипящего теплоносителя.

Заметим, что, по-видимому, большинство расчетных способов, описывающих гидродинамическую неустойчивость кипящего в канале теплоносителя, ориентировано на условия его течения при высоких расходах.

В целом проведенный обзор позволяет сделать вывод о том, что существующие способы расчетного определения границы гидродинамической неустойчивости в кипящем потоке теплоносителя, как правило, верно отражая механизм возникновения колебаний, требуют специфических сведений об условиях течения теплоносителя в канале, например, способов расчета коэффициента гидравлического сопротивления течению кипящего теплоносителя, коэффициента теплоотдачи, паросодержания двухфазного потока, их распределения по длине канала, и т.д. или ориентированы (эмпирические соотношения) на использование для конкретного теплоносителя И, по-видимому, в настоящий момент не существует универсального расчетного способа, который был пригоден для разного рода жидкостей, различных условий их использования

В третьей главе представлено описание экспериментальной установки (ЭУ), ее основных узлов, методики проведения опытов и обработки полученных результатов ЭУ позволяет исследовать теплообмен и гидродинамику при вынужденном

течении теплоносителя в каналах различной геометрии и ориентации в широких диапазонах изменения давления, расхода, теплового потока и недогрева жидкости

На рис 1 показана принципиальная схема экспериментальной камеры (обозначения на рисунке 1 (вход), 2, 8 (выход), 9 - вентили, 3 - охладитель, 5 - датчик расхода, 4, 7 - входная и выходная камеры, соответственно, 6 - экспериментальный участок, 11, 17 - манометры, 14 - заглушки, 10 - датчики давления, 12 - электрические кабели, 15, 16 - секции камеры, 13 - штуцер для монтажа термометра ТСПН)

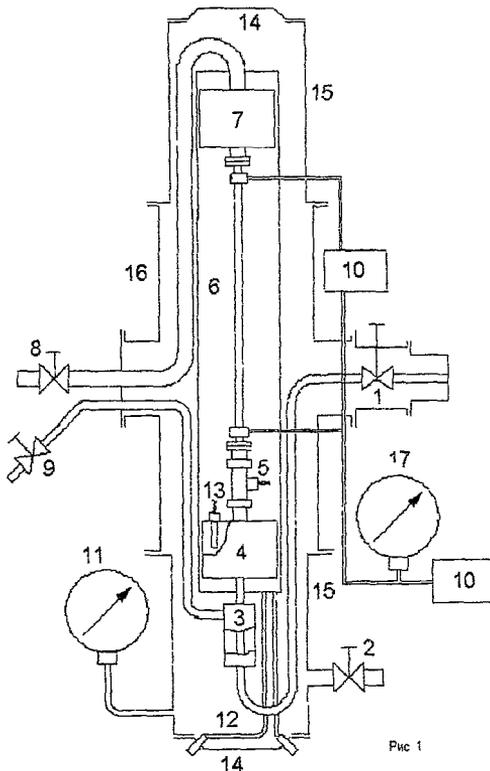


Рис 1

Измерительно-информационная система

ма (ИИС) ЭУ состоит из двух независимых частей Первая часть ИИС состоит из цифровых высокоточных приборов Ее временное разрешение (1,5 – 30) с Вторая часть ИИС состоит из 12-ти разрядного 8-ми канального аналого-цифрового преобразователя (АЦП) Время преобразования для второй части 0,1 с Обе части ИИС сопряжены с микро-ЭВМ типа IBM PC/AT Подобное построение ИИС ЭУ позволило объединить высокую точность цифровых приборов и высокое быстродействие АЦП и соответственно получать более полную и подробную информацию об исследуемом явлении Аппаратное исполнение ИИС и ее программное обеспечение позволяют проводить опыты в реальном масштабе времени

В качестве экспериментального образца использовалась прямолинейная круглая труба промышленного изготовления, электрически обогреваемая на длине 1447,0 мм, внутренним диаметром 11,9 мм и толщиной стенки 0,3 мм Материал - нержавеющая сталь 12Х18Н10Т Ориентация - вертикальная Течение теплоносителя подъемное

В опытах измерялись следующие параметры давление на входе в экспериментальный образец $p_{вх}$, перепад давления между входным и выходным сечениями образца Δp , объемный расход жидкости V , температура потока на входе в образец $T_{вх}$ и выходе из него $T_{вых}$, температура наружной поверхности образца в 19 сечениях с шагом 100 мм и с последующим пересчетом на внутреннюю поверхность $T_{ст}$, удельный тепловой поток q

ИИС ЭУ при проведении экспериментов позволяла измерять мгновенные значения указанных параметров и их распределение во времени (временные зависимости)

Давление и перепад давления измерялись с помощью мембранных датчиков давления Объемный расход - с помощью турбинного датчика расхода Температура - с помощью медь-константановых термопар (диаметр электрода 0,2 мм)

На вход (поз 1 - 3 - 4 - 5 на рис 1) экспериментального образца во всех опытах поступала жидкость, недогретая до температуры насыщения - обеспечивались условия так называемого "жесткого входа" Конструктивное исполнение выхода из образца соответствовало свободному сжимаемому пространству (поз 7 - 8) Таким образом практически исключалось влияние условий на выходе на поток в канале

После установления соответствующих значений давления, расхода, температуры жидкости на входе в образец и последующей стабилизации показаний всех измерительных датчиков, проводилось увеличение теплового потока q небольшими интервалами Δq

Колебания в кипящем потоке регистрировались датчиками, измеряющими перепад давления Δp , объемный расход V и температуру стенки образца $T_{ст}$ (или температурный напор на стенке $\Delta T = T_{ст} - T_{нас}$) За наступление гидродинамической неустойчивости в кипящем потоке азота принима-

лось установление развитых колебаний Δp и/или V с квазипостоянными периодом и амплитудой, существенно превышающими фоновые значения. В экспериментах фоновые колебания составляли для объемного расхода $V \pm 4,1\%$, для перепада давления $\Delta p \pm 8,6\%$ от средних значений.

При анализе и интерпретации полученных результатов использовалась относительная энтальпия потока (массовое расходное паросодержание), рассчитываемая по балансовому уравнению для круглого прямолинейного канала с равномерным распределением теплового потока по поверхности канала в предположении термической равновесности течения двухфазного потока $x_{\text{вых}}$.

При исследовании пузырькового кипения азота измерялись локальные значения коэффициента теплоотдачи α_i (i - номер сечения, в котором установлена термопара). Рассматривалось развитое пузырьковое кипение азота в канале, т.е. к анализу привлекались опытные данные, значение которых более чем вдвое численно превышали коэффициент теплоотдачи для однофазной вынужденной конвекции.

Кризис кипения фиксировался термопарами, измеряющими температуру стенки образца - применялся термопарный метод детектирования кризиса.

Погрешность измерений режимных параметров в экспериментах была следующей: удельный тепловой поток q - 3,2 %, давление p - 2,0 %, перепад давления Δp - 3,6 %, массовая скорость G - 1,2 %, температура T - 0,2 К, относительная энтальпия (паросодержание) $x_{\text{вых}}$ - 3,6 %.

Условия проведения опытов были следующие:

1) Эксперименты по исследованию гидродинамической неустойчивости в кипящем в канале вынужденном потоке азота

- давление изменялось в диапазоне $p = (2,6 - 27,8) \cdot 10^5$ Па ($p/p_{\text{кр}} \approx 0,08 - 0,82$),

- массовая скорость - $G = (100 - 670)$ кг/(м²с),

- недогрев жидкости на входе в образец - $\Delta T_{\text{нед}} = (1,1 - 22,7)$ К,

- удельный тепловой поток - $q = 0 - q_{\text{кр}}$

2) Эксперименты по исследованию теплоотдачи при кипении вынужденного потока азота в канале проводились при следующих условиях

- давление изменялось в диапазоне $p = (8,4 - 23,2) \cdot 10^5$ Па ($p/p_{\text{кр}} \approx 0,25 - 0,68$),

- массовая скорость - $G = (108 - 802)$ кг/(м²с),

- удельный тепловой поток - $q = (10,1 - 98,8)$ кВт/м²

3) Эксперименты по исследованию кризиса кипения вынужденного потока азота в канале проводились при следующих условиях

- давление изменялось в диапазоне $p = (2,9 - 27,3) \cdot 10^5$ Па ($p/p_{\text{кр}} \approx 0,085 - 0,80$),

- массовая скорость - $G = (260 - 670)$ кг/(м²с),

- недогрев жидкости на входе в образец - $\Delta T_{\text{нед}} = (1,0 - 15,0)$ К,

- критическое паросодержание - $x_{\text{кр}} = (0,18 - 1,0)$

В четвертой главе представлены результаты экспериментального исследования гидродинамической неустойчивости течения в канале кипящего азота (без термических). Проведено исследование влияния режимных параметров на возникновение и развитие гидродинамической неустойчивости.

Влияние теплового потока На рис 2 показаны результаты опыта, проведенного при невысоких давлениях $p = (3,1 - 3,6) \cdot 10^5$ Па. Можно видеть, что колебания Δp и V , возникающие в кипящем потоке при увеличении удельного теплового потока q , имеют развитый характер. Увеличение q при прочих неизменных условиях приводит не только к возникновению колебаний, но и влияет на их характеристики: период и амплитуду. На зависимостях $\Delta p(\tau)$ и $V(\tau)$ можно видеть два колебательных участка, отличающиеся периодом и амплитудой. Первый участок соответствует невысоким значениям удельного теплового потока q - колебания возникают при $q = 1,2$ Вт/м². Увеличение удельного теплового потока до $q = 2,4$ кВт/м² приводит к увеличению амплитуды колебаний Δp и V , не изменяя их период, среднее значение которого здесь $\bar{T} = 3,2$ с (среднеквадратическое отклонение $\sigma_{n-1} = 4\%$). Относительная энтальпия потока $x_{\text{вых}}$ имеет невысокое значение и изменяется в узком диапазоне $\sim (-0,02 - 0,00)$. При этом на

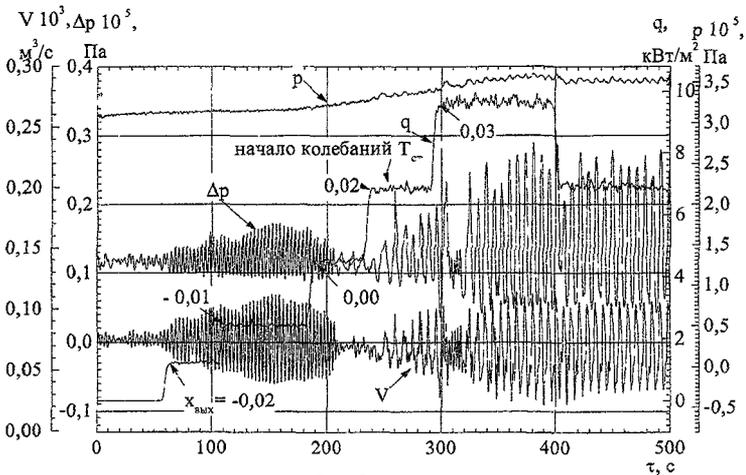


Рис 2

внутренней поверхности образца было зафиксировано пузырьковое кипение недогретой жидкости.

Второй колебательный участок соответствует большему значению удельного теплового потока q и характеризуется большими значениями

амплитуды и периода колебаний Среднее значение периода колебаний Δp и V здесь равно $\bar{T} = 6,2$ с ($\sigma_{n-1} = 6,3$ %) Паросодержание $x_{\text{вых}} > 0,02$

На рис -2 на зависимостях $\Delta p(\tau)$ и $V(\tau)$ между указанными колебательными участками видна узкая область, характеризующаяся подавлением колебаний Этой области соответствует невысокое положительное значение относительной энтальпии потока $x_{\text{вых}} = 0,00 - 0,02$

О влиянии удельного теплового потока q на возникновение и развитие колебаний в кипящем азоте, и их характеристики при увеличении давления можно судить по рис 3, где показаны опытные данные для $p = (12,8 - 14,4) \cdot 10^5$ Па Можно видеть, что при бо'льшем давлении колебания, возникающие в кипящем потоке азота при увеличении q отличаются периодом и

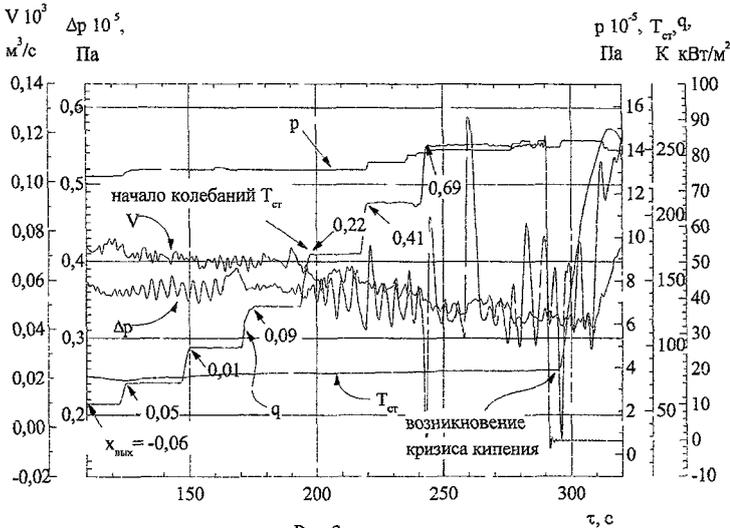


Рис 3

амплитудой от колебаний при меньшем давлении, см рис 2 Удельный тепловой поток в опыте на рис 3 изменялся в диапазоне $q = (9,3 - 78,7)$ кВт/м², относительная энтальпия потока - $x_{\text{вых}} = -0,06 - \sim 0,69$ На рис 3 на зависимости $\Delta p(\tau)$ также можно видеть два колебательных участка с узкой областью между ними, где колебания подавлены Первому колебательному участку соответствует $x_{\text{вых}} = -0,05 - 0,09$ Заметим, что это несколько бо'льшее значение $x_{\text{вых}}$ чем для первого колебательного участка на рис 2, что вероятно можно объяснить более высоким давлением Диапазон изменения $x_{\text{вых}}$ также охватывает отрицательные и положительные околонуле-

вые значения аналогично рис 2 Среднее значение периода колебаний Δp равно $\bar{T} = 4,1$ с ($\sigma_{n-1} = 7,6$ %) Второму колебательному участку на рис 3 соответствует $x_{\text{вых}} = 0,22$ Период колебаний Δp имеет бо'льшее значение, равное $\bar{T} = 4,6$ с ($\sigma_{n-1} = 9,6$ %)

Таким образом, при увеличении давления характеристики колебаний в кипящем потоке азота - период и амплитуда меняются

Увеличение теплового потока в диапазоне от $q = 0$ и до $q = q_{\text{кр}}$ (при этом $x_{\text{вых}} = -0,06 - 0,69$ на рис 3) при высоких давлениях по сравнению с невысокими давлениями не приводит к существенному изменению периода колебаний - период колебаний Δp изменяется в узком диапазоне - $\bar{T} = (4,1 - 4,6)$ с на рис 3 и при этом слабо увеличивается с увеличением удельного

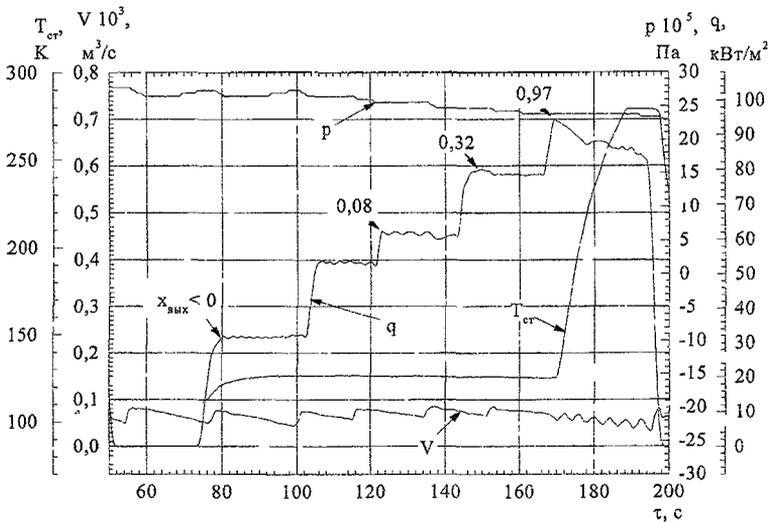


Рис 4

теплового потока q

Влияние удельного теплового потока q на гидродинамическую неустойчивость течения в канале кипящего азота при более высоких давлениях можно видеть из рис 4, где приведены опытные данные для $p=(23,0-27,8) 10^5$ Па Относительная энтальпия потока $x_{\text{вых}}$ в этих опытах изменялась в диапазоне от отрицательных значений и до $x_{\text{вых}}=0,97$ Как видно из рис 4, изменение q в диапазоне $0-q_{\text{кр}}$ при этих давлениях не приводит к возникновению в кипящем потоке азота гидродинамической неустойчивости Только после возникновения кризиса кипения в кипящем

потоке были зафиксированы колебания V . Этому моменту соответствует

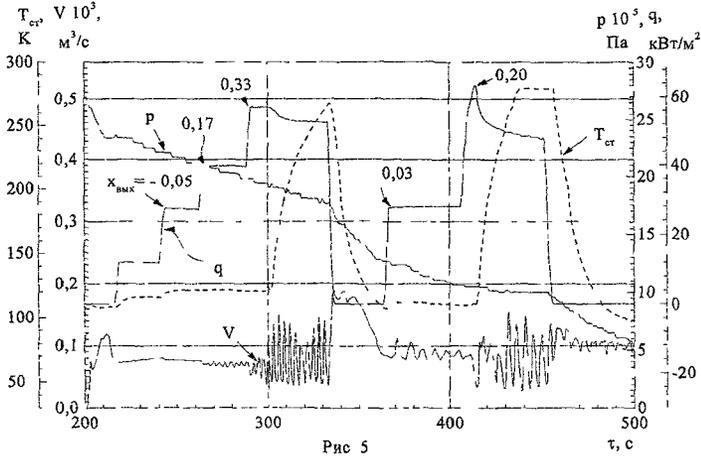


Рис 5

давление $p = 23,8 \cdot 10^5$ Па ($x_{\text{вых}} \approx 1,0$)

Влияние давления. Влияние давления p на возникновение гидродинамической неустойчивости в кипящем потоке азота можно видеть, анализируя опытные данные, показанные на рис 5 ($p = (5,6 - 26,9) \cdot 10^5$ Па) и рис 6 ($p = (17,1 - 26,0) \cdot 10^5$ Па). Колебания в этих опытах фиксировались по показаниям датчика, измеряющего V .

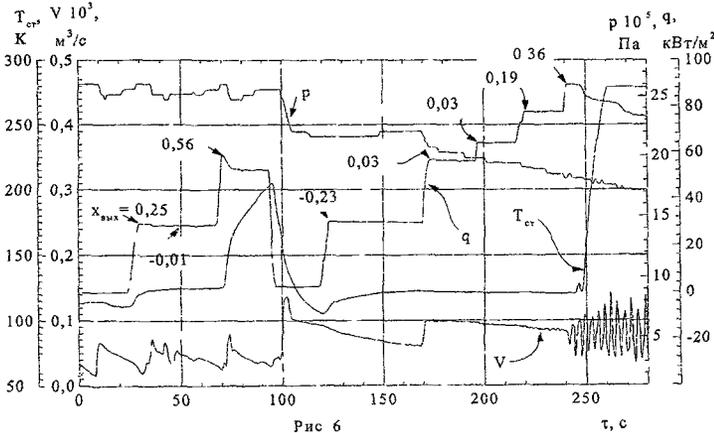


Рис 6

Из рис 5 и 6 можно видеть, что изменение p существенным образом

влияет на гидродинамическую неустойчивость течения кипящего азота. Причем, не только на сам факт возникновения колебаний, но и на их период. Так в опыте на рис 5 при давлении более $p = 21,0 \cdot 10^5$ Па ($\tau > 267$ с) в кипящем потоке не было зафиксировано колебаний. И только при уменьшении p ниже этого значения (при этом $x_{\text{вых}} \geq 0,17$) в кипящем потоке возникли колебания малой интенсивности (амплитуды). При дальнейшем уменьшении давления от $\sim 20,7 \cdot 10^5$ Па до $\sim 19,4 \cdot 10^5$ Па ($\tau = 300$ с) интенсивность колебаний заметно увеличилась, см $\Delta\tau = (260 - 300)$ с. И при меньшем давлении $p \leq 12,4 \cdot 10^5$ Па ($\tau > 368$ с) колебания имели существенно бо́льшие значения периода и амплитуды.

Таким образом, опытные данные на рис 5 показывают, что изменение давления влияет и на возникновение колебаний и на их характеристики - уменьшение давления увеличивало период колебаний V . Так на рис 5 в интервале $\Delta\tau = (260-300)$ с ($G = (350-410)$ кг/(м² с)) среднее значение периода $\bar{T} = 3,1$ с, а в интервале $\Delta\tau = (368-415)$ с ($G = (470-560)$ кг/(м² с)) среднее значение периода колебаний составляет бо́льшее значение равное $\bar{T} = 6,7$ с.

Отметим, что при увеличении давления p период колебаний стремился к единому значению в широких диапазонах изменения удельного теплового потока q и относительной энтальпии потока $x_{\text{вых}}$.

Влияние давления на пороговое значение паросодержания (без термических колебаний). Пороговое значение паросодержания $x_{\text{вых}}$, при котором в кипящем потоке азота возникают колебания, зависит от давления p . Это иллюстрирует рис 5. При давлении $p = 21,1 \cdot 10^5$ Па ($\tau = 264$ с) колебания возникали при паросодержании $x_{\text{вых}} = 0,17$. Среднее значение амплитуды колебаний V составляет $\bar{A}_v = 0,0036 \cdot 10^{-3}$ м³/с, а среднее значение периода колебаний V равно $\bar{T} = 3,1$ с. При уменьшении давления до $p = 12,4 \cdot 10^5$ Па ($\tau = 368$ с, $G = 560$ кг/(м²с)) на рис 5 началу колебаний соответствует существенно меньшее паросодержание $x_{\text{вых}} = 0,03$. Изменились и характеристики колебаний. Так средние значения амплитуды и периода колебаний V здесь равны $\bar{A}_v = 0,14 \cdot 10^{-3}$ м³/с и $\bar{T} = 6,7$ с.

Похожий результат наблюдался в опыте, результаты которого представлены на рис 6. При высоких давлениях пороговое значение $x_{\text{вых}}$ имеет бо́льшее значение, чем при низких давлениях. Так при $p = 18,1 \cdot 10^5$ Па ($\tau = 241$ с) пороговое значение $x_{\text{вых}} = 0,36$. При меньшем давлении $p = 12,3 \cdot 10^5$ Па колебания возникали при меньшем пороговом паросодержании $x_{\text{вых}} = 0,20$ (продолжение опыта на рис 6, здесь не показано).

Таким образом, увеличение давления p приводит к увеличению порогового значения паросодержания $x_{\text{вых}}$.

Влияние расхода теплоносителя (без термических колебаний). Уменьшение расхода оказывало дестабилизирующее влияние на течение в канале кипя-

шего азота Подобный результат был обнаружен в широком диапазоне изменения давления, вплоть до $p = 21,6 \cdot 10^5$ Па В опыте при $p = (15,4 - 17,9) \cdot 10^5$ Па уменьшение расхода от $V = 0,05 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ до $V = 0,03 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ привело к появлению в кипящем потоке колебаний Причем, при уменьшении расхода амплитуда колебаний Δp увеличилась

Влияние начала кипения на возникновение колебаний На рис 7 показаны зависимости $p(\tau)$, $V(\tau)$, $\Delta p(\tau)$, полученные в опыте, проведенном при давлении $p = (3,1-4,1) \cdot 10^5$ Па Здесь же приведена зависимость $x_{\text{вых}}(\tau)$ На кривой

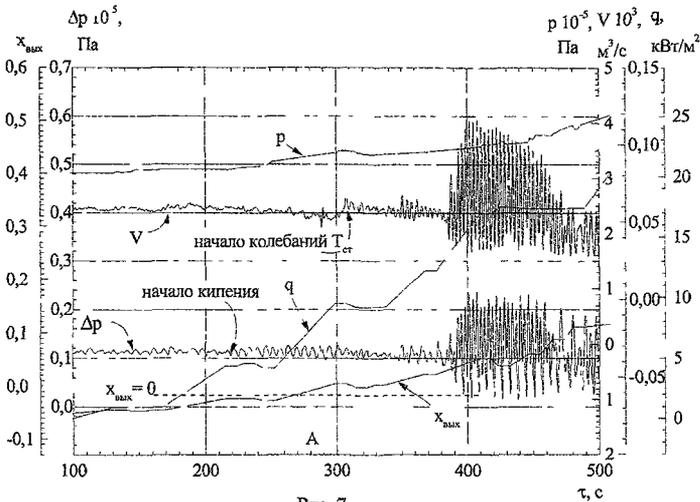


Рис 7

$x_{\text{вых}}(\tau)$ вертикальной линией "А" указан момент времени, соответствующий условию $x_{\text{вых}} = 0$ Стрелкой на кривой $\Delta p(\tau)$ указан момент времени, соответствующий началу пузырькового кипения азота Видно, что пузырьковое кипение начинается при $x_{\text{вых}} < 0$, при кипении недогретой жидкости т е колебания возникают с появлением в потоке паровой фазы

В пятой главе представлены результаты экспериментального исследования теплоотдачи при кипении вынужденного потока азота в канале в условиях гидродинамически устойчивого и неустойчивого течения кипящего азота

Теплоотдача в условиях гидродинамически неустойчивого течения в канале кипящего азота Термические колебания В определенных условиях в опытах были зафиксированы колебания температуры стенки канала $T_{\text{ст}}$ (или ΔT) Подобные колебания $T_{\text{ст}}$ относятся к типу гидродинамической

неустойчивости "термические колебания"¹

На рис 2, 3, 7 на зависимостях $q(\tau)$ стрелкой указан момент наступления термических колебаний В опытах было показано, возникновение термических колебаний возможно в широком диапазоне изменения давления При невысоких давлениях p , когда в опытах были зафиксированы два колебательных режима течения кипящего азота, термические колебания возникли при втором колебательном режиме течения При этом на внутренней поверхности образца имело место пузырьковое кипение насыщенной жидкости

На рис 8 приведены опытные данные, показывающие возникновение

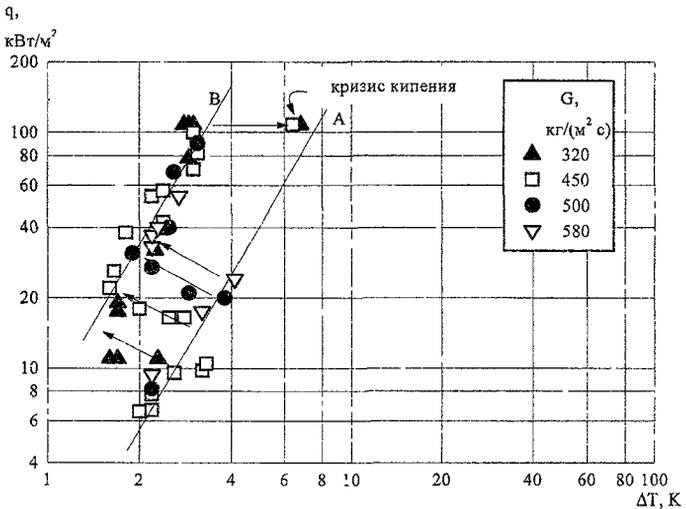


Рис 8

термических колебаний при давлении $p = 5 \cdot 10^5$ Па. Массовая скорость изменялась в диапазоне $G = (320 - 580)$ кг/(м²·с). Стрелками указан момент возникновения термических колебаний. При термических колебаниях температурный напор ΔT изменялся между значениями, соответствующими на рис 8 линиям A и B. Линия A соответствует развитому пузырьковому кипению азота при гидродинамически устойчивом течении потока. Линия B - наименьшим значениям ΔT , достигнутым в опытах при наличии в кипящем потоке азота термических колебаний.

В некоторых опытах был зафиксирован кризис кипения, вызванный ко-

¹ Boure J A, Bergics A E, Tong L S. Review of Two-Phase Flow Instability, Nuclear Engineering and Design, Vol 25, pp 165-192 (1973)

лебаниями в кипящем потоке азота, т н ранний кризис кипения - значение удельного критического теплового потока $q_{кр}$ при этом было меньше $q_{кр}$, соответствующего кризису при гидродинамически устойчивом течении кипящего азота. Вместе с тем, в опытах было показано, что в определенных условиях колебания в кипящем потоке азота не приводили к возникновению раннего кризиса кипения - кризис возникал при тепловом потоке, соответствующем кризису при гидродинамически устойчивом течении кипящего азота, см опытные данные при $G = 320 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$ и $G = 450 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$ на рис 8. При этом ΔT , соответствующие кризису кипения, соответствовали критическому температурному напору ΔT при гидродинамически устойчивом течении кипящего азота.

Таким образом, термические колебания, возникающие в кипящем в канале потоке азота в определенных условиях могут существовать продолжительное время, не приводя к кризису кипения.

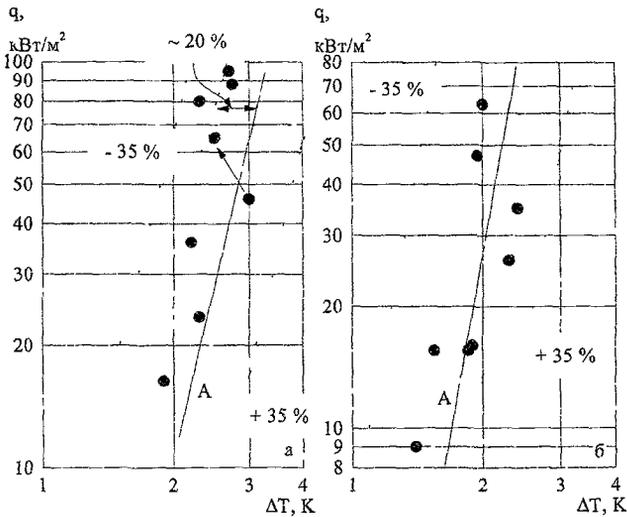


Рис 9

С увеличением давления интенсивность термических колебаний уменьшалась. В этом можно убедиться, сравнивая данные на рис 8 и 9. Так при $p = 5 \cdot 10^5 \text{ Па}$ на рис 8 наступление термических колебаний имеет резкий, скачкообразный характер и сами термические колебания характеризуются ΔT с наибольшей амплитудой. ΔT линии В отклонялись от ΔT линии А приблизительно в 2 раза. На рис 9 показаны результаты опытов для $p = 12,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$ (а) и $p = 16,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$ (б). Увеличение давления до $p = 12,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$ привело к тому, что дистанция между линиями А и В уменьши-

лась и переход к термическим колебаниям стал менее резким. Отклонение значений ΔT линии B от значений ΔT линии A в среднем составило $\sim 20\%$ рис 9^а. Для давления $p = 16,0 \cdot 10^5$ Па это отклонение меньше и практически не превышает погрешность измерения ΔT , рис 9^б. По-видимому, давление $p = 16,0 \cdot 10^5$ Па ($(p/p_{кр}) = 0,47$) можно считать верхней границей существования в кипящем потоке азота термических колебаний. При превышении этого давления интенсивность термических колебаний становится практически несущественной. Определенная граница по давлению существования в кипящем потоке азота термических колебаний ($(p/p_{кр}) = 0,47$ вероятно может иметь значение и для теплоносителей иного рода.

На рис 9 показана линия A , осредняющая данные по пузырьковому кипению азота в канале при его гидродинамически устойчивом течении. Здесь же приведены пунктирные линии, соответствующие $\pm 35\%$ отклонению от линии A . Из рис 9 можно видеть, что опытные данные, находящиеся под влиянием гидродинамической неустойчивости типа "термические колебания" не выходят за пределы $\pm 35\%$ интервала. Это означает, что, начиная с давления $p = 12,0 \cdot 10^5$ Па ($(p/p_{кр}) > 0,35$) можно игнорировать, возникающие термические колебания и использовать для расчета теплоотдачи при пузырьковом кипении азота в канале соотношения, разработанные для гидродинамически устойчивого течения кипящего теплоносителя и имеющие погрешность $\pm 35\%$ ².

Влияние массовой скорости и недогрева жидкости на возникновение термических колебаний. Из рис 8 можно видеть, что увеличение массовой скорости в диапазоне от $320 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$ до $580 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$ повышает пороговое значение удельного теплового потока q , соответствующее наступлению термических колебаний более чем в 2 раза - от $q \approx 10 \text{ кВт}/\text{м}^2$ до $q \approx 22 \text{ кВт}/\text{м}^2$, оказывая таким образом стабилизирующее воздействие на течение в канале кипящего азота.

На рис 10 показано влияние массовой скорости G на пороговое значение удельного теплового потока q . Опытные данные позволили установить количественную зависимость между пороговым значением q и массовой скоростью G , а именно $q \sim G^{1,2}$. Из рис 10 видно, что степень влияния G на пороговое значение q в исследованных диапазонах изменения давления p и недогрева $\Delta T_{нед}$ остается практически постоянной.

Как видно из рис 10, увеличение недогрева жидкости от $\Delta T_{нед} = (2,4 - 3,5) \text{ К}$ до $\Delta T_{нед} = (7,8 - 9,0) \text{ К}$ при условии $G = const$ приводит к значительному росту порогового значения удельного теплового потока q . При этом в опытах в кипящем потоке азота не было обнаружено влияния изменения

² Klumenko V V. A generalized correlation for two-phase forced flow heat transfer - second assessment, Int J Heat Mass Transfer Vol 33, No 10, pp 2073-2088, 1990

давления в диапазоне $p = (2,6 - 5,5) 10^5$ Па на возникновение термических колебаний

Влияние геометрии канала на возникновение термических колебаний Исследовано влияние относительной длины канала l/d экспериментального образца на пороговое значение удельного теплового потока q . Были рассмотрены опытные данные настоящей работы ($l/d = 121,6$) и работы ³, где экспериментальный образец имел внутренний диаметр $d = 10,0$ мм и ($l/d = 185,0$). В результате показано, что увеличение относительной длины канала в диапазоне от $l/d = 121,6$ до $l/d = 185,0$ приводит к незначительному уменьшению порогового значения удельного теплового потока q приблизительно на 6 %.

Влияние давления на пороговое значение паросодержания при термических колебаниях Исследовано влияние давления p на пороговое значение паросодержания $x_{выс}$ соответствующее наступлению термических колебаний. Рассматривается область высоких недогрева жидкости.

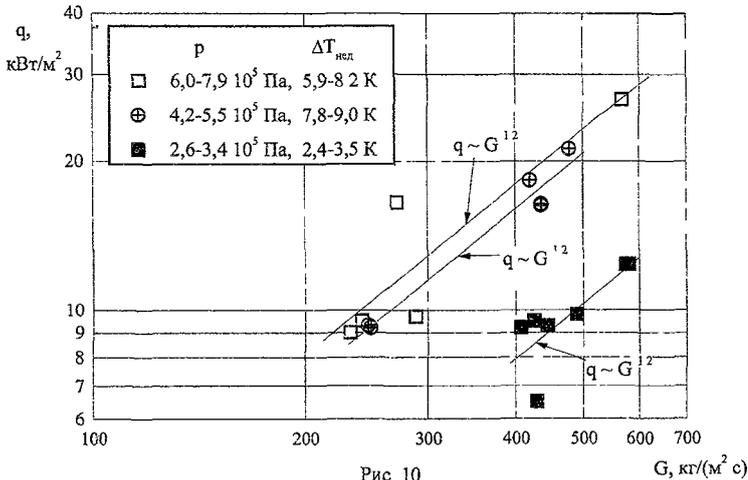


Рис 10

Из опытных данных, показанных на рис 2, 3 видно, что термические колебания при увеличении давления возникают при более высоких паросо-

³ Сударчиков А М Экспериментальное исследование интегральных характеристик теплообмена при вынужденном движении двухфазного потока азота в длинном вертикальном канале и расчетные рекомендации Дисс канд техн наук - Москва, 1984 - 169 с

держаниях $x_{вых}$

На рис 11 приведены опытные данные, показывающие влияние давления на пороговое значение паросодержания $x_{вых}$. Опытные данные на рис 11 соответствуют следующим условиям: давление $p = (2,6 - 16,3) \cdot 10^5$ Па, недогрев жидкости $\Delta T_{нед} = (2,9 - 16,9)$ К, массовая скорость $G = (340 - 440)$ кг/(м²с)

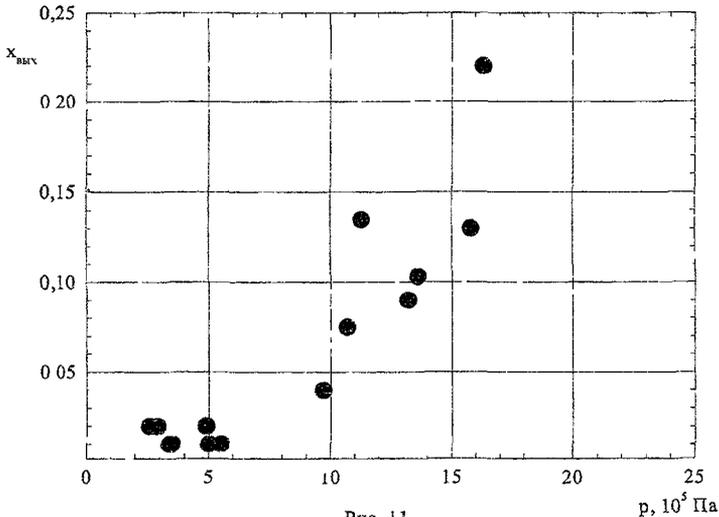


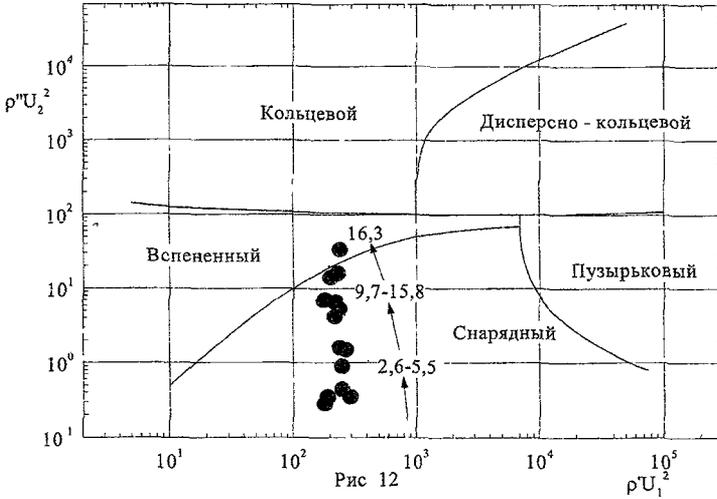
Рис 11

Из рис 11 видно, что увеличение давления p_{ex} приводит к увеличению порогового значения паросодержания $x_{вых}$. На рис 11 весь диапазон изменения p_{ex} можно разделить на два, характеризующиеся различным влиянием p_{ex} на пороговое значение $x_{вых}$. Первый диапазон \sim до $p_{ex} \sim 6,0 \cdot 10^5$ Па соответствует невысоким $x_{вых}$ и практически отсутствием влияния p_{ex} на $x_{вых}$. Второй диапазон при $p_{ex} \geq 6,0 \cdot 10^5$ Па, напротив, характеризуется довольно сильной зависимостью порогового значения $x_{вых}$ от p_{ex} рис 11

На рис 12 показано сравнение опытных данных с рис 11 с картой режимов течения двухфазного потока в канале Хьюитта-Робертса⁴. На рис 12 пунктирной линией опытные данные объединены в группы по давлению, рядом указаны диапазоны изменения давления p (в 10^5 Па). Стрелка-

⁴ Hewitt G F and Roberts D N Studies of two-phase flow patterns de simultaneous X-ray and flash photography U K A E A Rep № AERE-M2159 1969

ми указано направление увеличения p . Видно, что с увеличением p режимы течения в канале кипящего азота меняются в направлении из области сна-

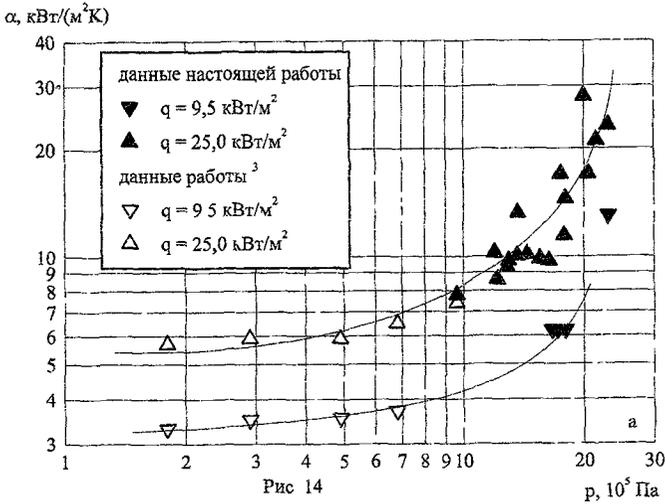
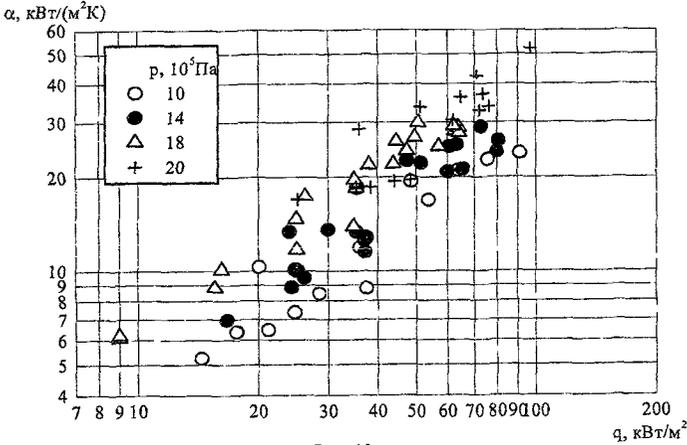


рядного в направлении вспененного и далее кольцевого режимов течения. Так для $p = (2,6 - 5,5) \cdot 10^5$ Па вероятный режим течения двухфазного потока вероятно снарядный. При более высоких давлениях - $p = (9,7 - 15,8) \cdot 10^5$ Па опытные данные, по-прежнему находясь в области существования снарядного режима, располагаются вблизи границы между снарядным и вспененным режимами течения. И при $p = 16,3 \cdot 10^5$ Па вероятно режим течения двухфазного потока азота в канале будет вспененный.

Таким образом, сравнение опытных данных с картой Хьюитта - Робертса дают основания полагать, что термические колебания, зафиксированные в опытах в данной работе, обусловлены снарядным режимом течения в канале кипящего азота.

Исследование теплоотдачи при кипении вынужденного потока азота в канале в широких диапазонах изменения теплового потока и давления (включая и высокие давления). Разработанная в работе экспериментальная методика позволила провести исследования теплоотдачи при кипении в канале азота в диапазонах изменения q и p , в которых в кипящем потоке возникала гидродинамическая неустойчивость наибольшие достигнутые в опытах значения удельного теплового потока $q = 98,8$ кВт/м², давления $p = 23,2 \cdot 10^5$ Па.

На рис 13 и 14 приведены опытные данные, показывающие влияние q и p на интенсивность теплоотдачи при пузырьковом кипении азота в канале



Опытные данные на рисунках соответствуют гидродинамически устойчивым режимам течения кипящего азота. Коэффициент теплоотдачи α - значение, осредненное по длине образца для области пузырькового кипения

Как можно было ожидать, увеличение удельного теплового потока q и давления p приводит к интенсификации теплоотдачи при пузырьковом кипении азота, смещая зависимости $\alpha = f(q)$ и $\alpha = f(p)$ в область более высоких значений коэффициента теплоотдачи

В работе исследовано влияние давления p на численное значение показателя степени n в зависимости $\alpha \sim q^n$. На рис. 15 приведены данные на-

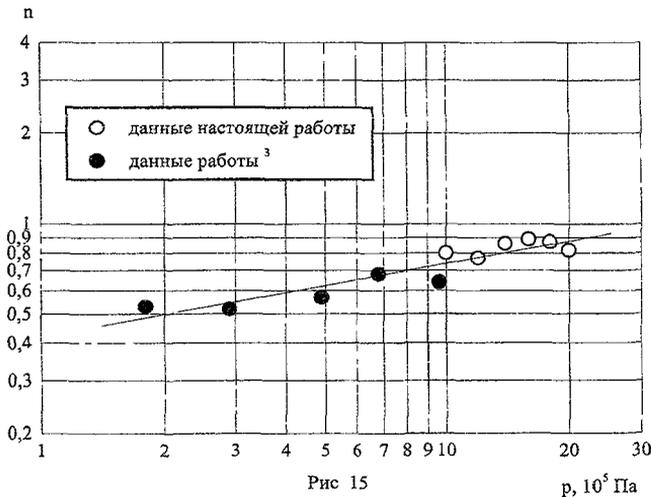


Рис 15

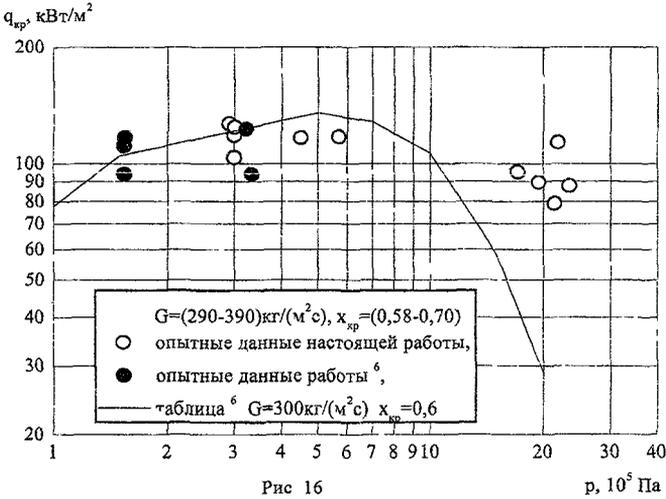
 $p, 10^5 \text{ Па}$

стоящей работы и работы ³. Можно видеть, что показатель степени n есть слабая функция давления, и с увеличением p увеличивается в диапазоне от $\sim 0,5$ до $\sim 0,9$. В результате обработки опытных данных на рис. 15 с помощью метода наименьших квадратов установлено, что $n \sim p^{0,2}$.

Опытные данные по теплоотдаче при пузырьковом кипении вынужденного потока азота в канале были сравнены с соотношением ². Показана пригодность этого соотношения для описания теплоотдачи при кипении азота в канале до $(p/p_{кр}) = 0,68$.

Наблюдаемое в опытах увеличение показателя степени n в зависимости $\alpha \sim q^n$ с увеличением давления p очевидно соответствует тем изменениям, которые вероятно происходят в структуре двухфазного потока теплоносителя в канале и, по-видимому, в механизме теплопередачи при увеличении p . Известно, что пузырьковое кипение в пленке характеризуется меньшей интенсивностью, чем пузырьковое кипение в условиях большого объема

Согласно ⁵ для кипения в пленке $n = 0,5$, для кипения в большом объеме принимается $n = 0,7$. Наблюдаемое на рис 15 увеличение n с увеличением p , вероятно, соответствует изменению доминирующей ситуации в канале от пузырькового кипения в пленке ($n = 0,5$) - при снарядном режиме течения



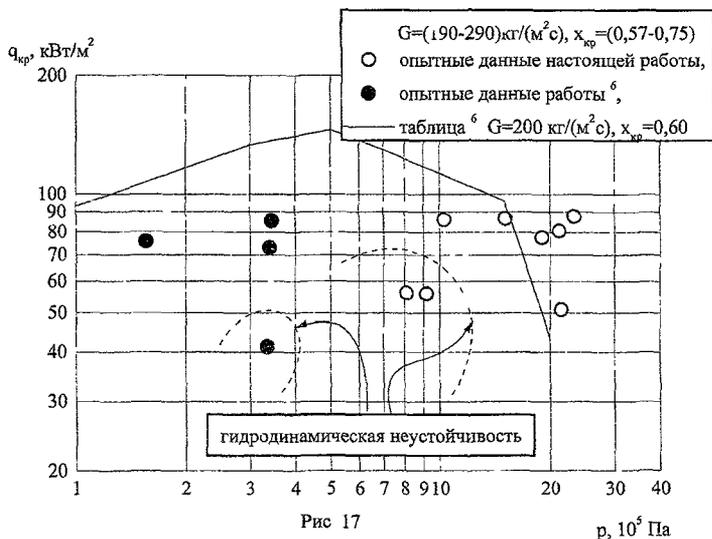
двухфазного потока при наименьших p , до пузырькового кипения в большом объеме ($n = 0,7$) - при пузырьковом режиме течения двухфазного потока при более высоких p , при которых снарядный режим течения не существует. Этот вывод согласуется с результатами, полученными в работе при исследовании гидродинамической неустойчивости и ее влияния на теплообмен.

В шестой главе представлены результаты экспериментального исследования кризиса кипения вынужденного потока азота в канале в условиях гидродинамически устойчивого и неустойчивого течения в канале кипящего азота.

Кризис кипения в условиях гидродинамически неустойчивого течения в канале кипящего азота (ранний кризис кипения). В опытах в определенных условиях был зафиксирован кризис кипения обусловленный возникновением гидродинамической неустойчивости в кипящем потоке азота, т. н. ран-

⁵ Григорьев В. А., Павлов Ю. М., Аметистов Е. В. Кипение криогенных жидкостей М., "Энергия", 1977, 288 с. ил.

ний кризис кипения. Измеренные значения удельного критического теплового потока $q_{кр,эксп}$ при раннем кризисе кипения были сравнены с значениями $q_{кр,расч}$, соответствующими гидродинамически устойчивому течению в канале кипящего азота и рассчитанными по таблице рекомендуемых



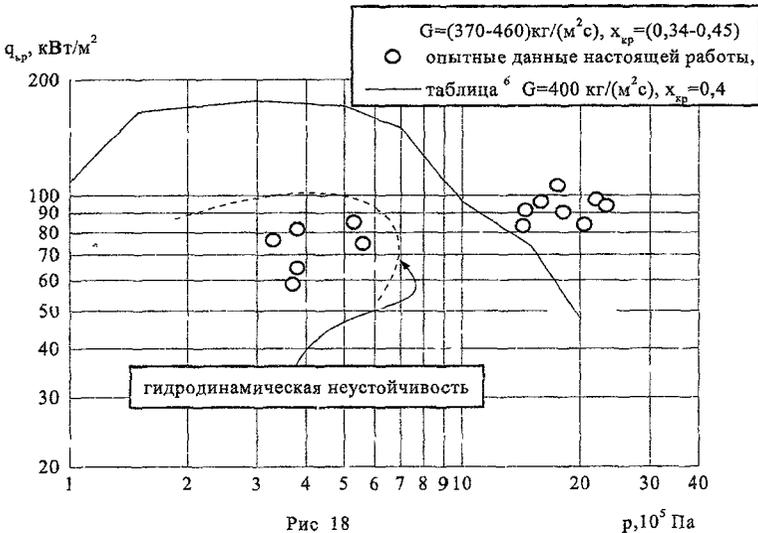
значений удельного критического теплового потока $q_{кр}$ для кипения вынужденного потока азота в канале диаметром $d=8 \text{ мм}$ ⁶. Все значения опытные значения удельного критического теплового потока $q_{кр}$ были приведены к диаметру $d=8 \text{ мм}$ в соответствии с соотношением $(q_{кр}^{d=8}/q_{кр}^d) = (d/8)^{1/3}$

Таблица рекомендуемых значений $q_{кр}$ ⁶ ограничена наибольшим давлением $p = 20,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Поэтому, сравнение опытных значений $q_{кр}$ с результатами расчета по таблице ⁶ ограничено давлением $p = 20,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$

На рис 5 и 6 приведены результаты опытов, в которых давление менялось в широком диапазоне. Отчетливо прослеживается влияние p на возникновение кризиса кипения, вызванного колебаниями. Так на рис 5 можно видеть, что кризис кипения, обусловленный колебаниями в кипящем по-

⁶ Аль-Абуд Ф. Экспериментальное исследование и построение таблицы рекомендуемых значений критической плотности теплового потока при вынужденном движении двухфазного потока азота в равномерно обогреваемом вертикальном канале. Дисс. канд. тех. наук - Москва, 1991

токе возник при давлении $p = 19,1 \cdot 10^5$ Па ($\tau = 301,6$ с) При этом удельный



критический тепловой поток был равен $q_{кр, \text{эксп}} = 51,1$ кВт/м²с и $(q_{кр, \text{эксп}}/q_{кр, \text{расч}}) = 0,78$ При дальнейшем уменьшении давления p кризис кипения, обусловленный колебаниями, возник при меньшем $p = 10,5 \cdot 10^5$ Па ($\tau = 414,4$ с) Здесь удельный критический тепловой поток $q_{кр, \text{эксп}} = 53,4$ кВт/м² и соответственно $(q_{кр, \text{эксп}}/q_{кр, \text{расч}}) = 0,26$

Как можно видеть, наибольшие расхождения между опытными и расчетными значениями удельного критического теплового потока $q_{кр}$ были достигнуты при наименьшем давлении $p = 10,5 \cdot 10^5$ Па

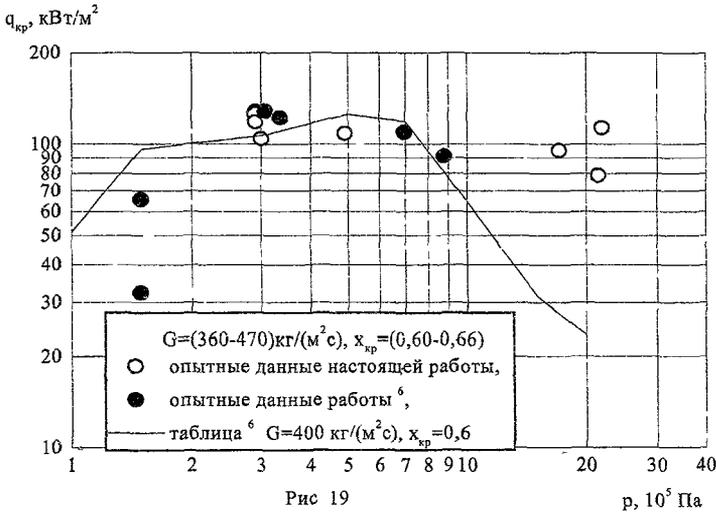
Аналогичный результат был получен в опыте, результаты которого приведены на рис 6 При наибольшем давлении $p = 18,2 \cdot 10^5$ Па ($\tau = 241$ с) - $q_{кр, \text{эксп}} = 79,1$ кВт/м² и $(q_{кр, \text{эксп}}/q_{кр, \text{расч}}) = 0,89$ Для меньшего давления $p = 11,8 \cdot 10^5$ Па - $q_{кр, \text{эксп}} = 56,0$ кВт/м² и $(q_{кр, \text{эксп}}/q_{кр, \text{расч}}) = 0,32$

Таким образом, увеличение p приводит к увеличению $q_{кр}$, соответствующего кризису кипения, вызванному колебаниями Иными словами с увеличением давления исчезают условия для возникновения раннего кризиса кипения

Кризис кипения в условиях гидродинамически устойчивого течения в канале кипящего азота (высокие давления) Проведено исследование кризиса кипения вынужденного потока азота в канале в широком диапазоне изменения давления, вплоть до $p \approx 27,3 \cdot 10^5$ Па ($(p/p_{кр}) \approx 0,80$) Полученные опытные значения удельного критического теплового потока $q_{кр}$ для давле-

ний ($p/p_{кр}$) > 0,47 соответствуют гидродинамически устойчивому течению в канале кипящего азота

Анализ и интерпретация полученных опытных данных проводились с



использованием локальной гипотезы происхождения кризиса. Соответственно $x_{кр}$ - массовое расходное паросодержание (критическое паросодержание) в месте возникновения кризиса кипения.

На рис 16 - 19 показаны опытные значения удельного критического теплового потока $q_{кр}$, полученные в работе. Здесь же для сравнения приведены опытные значения $q_{кр}$ из 6 и результаты расчета $q_{кр}$ по таблице 6. Диаметр канала в 6 был равен $d = 7,35$ мм. Поэтому, значения $q_{кр}$ на рисунках были приведены к $d = 8,0$ мм. Массовая скорость изменялась в диапазоне $G = (190 - 470)$ кг/(м²с), критическое паросодержание $x_{кр} = 0,34 - 0,75$.

Как видно из рис 16 и 19, опытные значения $q_{кр}$ для давлений до $p \sim 10 \cdot 10^5$ Па вполне удовлетворительно согласуются с опытными значениями $q_{кр}$ из 6 и с результатами расчета $q_{кр}$ по таблице 6. Однако для давлений более $p \sim 10,0 \cdot 10^5$ Па, опытные данные настоящей работы отклоняются от результатов расчета по таблице 6. И чем выше давление, тем это отклонение больше. Причем, отклонение опытных значений $q_{кр}$ от расчетных имеет место для всех массовых скоростей G и критических паросодержаний $x_{кр}$. Опытные значения $q_{кр}$ в данной работе для указанных давлений получены впервые.

На рис 17 и 18 показаны опытные значения $q_{кр}$ данной работы для давлений менее $p \sim 10 \cdot 10^5$ Па, которые соответствуют гидродинамически не-

устойчивому течению кипящего азота (отмечены пунктирной линией) Вероятно опытные значения $q_{кр}$ из ⁶ на рис 18, отмеченные пунктирной линией, также были получены в условиях гидродинамически неустойчивого течения кипящего азота

С использованием полученных в работе опытных данных был модифицирован фрагмент таблицы рекомендуемых значений $q_{кр}$ ⁶ для давления $p = 20 \cdot 10^5$ Па. Фрагмент ограничен диапазонами $G = (100 - 1000)$ кг/(м²с) и $x_{кр} = (0,15 - 0,80)$

Процедура модификации заключалась в применении метода наименьших квадратов к массиву значений $q_{кр}$, сформированным с учетом вновь полученных опытных значений $q_{кр}$.

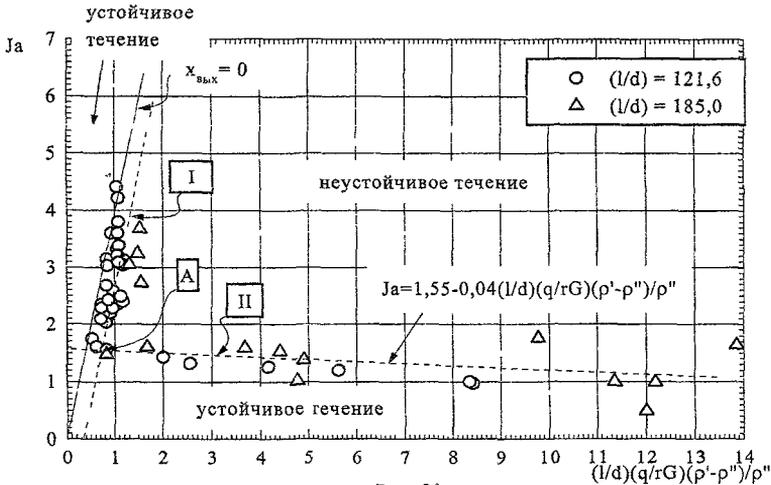
Удельный критический тепловой поток $q_{кр}$, кВт/м², для $p = 20,0 \cdot 10^5$ Па
критическое паросодержание $x_{кр}$ Таблица 1

| G , кг/(м ² с) | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| 100 | 131,9 | 173,9 | 156,5 | 143,8 | 127,9 | 108,1 | 90,6 | 83,8 |
| 200 | 131,0 | 146,8 | 126,8 | 96,7 | 77,71 | 56,3 | 55,2 | 24,0 |
| 300 | 123,0 | 108,9 | 98,0 | 77,0 | 76,1 | 80,2 | 95,3 | 16,3 |
| 400 | 115,5 | 97,8 | 95,6 | 81,4 | 86,6 | 111,6 | 97,6 | 17,2 |
| 500 | 107,3 | 103,3 | 102,7 | 90,9 | 88,4 | 91,2 | 70,2 | 25,4 |
| 600 | 101,3 | 99,9 | 96,0 | 87,7 | 80,9 | 73,5 | 52,9 | 22,5 |
| 700 | 96,4 | 92,9 | 85,6 | 76,6 | 67,4 | 55,9 | 37,7 | 14,6 |
| 800 | 94,0 | 87,2 | 76,0 | 65,4 | 55,5 | 43,9 | 29,0 | 13,1 |
| 900 | 93,4 | 81,6 | 64,4 | 52,9 | 43,6 | 33,3 | 22,1 | 11,0 |
| 1000 | 92,7 | 74,9 | 52,8 | 41,8 | 34,5 | 25,0 | 17,2 | 9,2 |

Результаты представлены в таблице 1. Изменения коснулись следующих диапазонов изменения массовой скорости G и критического паросодержания $x_{кр}$. $G = (200 - 900)$ кг/(м²с), $x_{кр} = (0,3 - 0,7)$. Сравнение $q_{кр}$ из табл. 1 с соответствующими значениями $q_{кр}$ из таблицы ⁶ показывает, что модифицированный фрагмент рекомендует более высокие значения $q_{кр}$, чем таблица ⁶ - для определенных значений G и $x_{кр}$ до ~ 5 - кратного увеличения. В седьмой главе проведен анализ возможности использования известных расчетных способов для определения границы гидродинамической неустойчивости (термические колебания) при кипении в канале вынужденного потока азота.

Разработаны расчетные соотношения (для областей высоких и невысоких недогрева жидкости) для определения границы гидродинамической неустойчивости (термические колебания) течения в канале кипящего азота с использованием полученных в работе опытных данных.

На рис 20 представлены опытные данные настоящей работы и работы ³ ($l/d = 185$), обобщенные в координатах ⁷, соответствующие следующим условиям - настоящая работа $p_{ex} = (2,6 - 16,3) 10^5$ Па, $G = (100 - 600)$ кг/(м²с), $\Delta T_{нед} = (2,4 - 19,7)$ К, работа ³ $p_{ex} = (1,7 - 9,6) 10^5$ Па, $G = (130 - 670)$ кг/(м²с), $\Delta T_{нед} = (0,5 - 11,7)$ К Каждый символ на рисунке соответствует последнему гидродинамически устойчивому течению кипящего азота (термические колебания) Видно вполне удовлетворительное обобщение



опытных данных для обоих образцов Фактически на рис 20 показана карта гидродинамической неустойчивости (термические колебания) для течения в обогреваемом канале вынужденного потока азота в широких диапазонах изменения давления, массовой скорости и недогрева жидкости

На границе гидродинамической неустойчивости на рис 20 отчетливо видны два участка, отличающиеся противоположным влиянием изменения недогрева $\Delta T_{нед}$ на неустойчивость течения кипящего азота области высоких и невысоких недогревов В области высоких $\Delta T_{нед}$ сплошная линия соответствует условию $x_{вых} = 0$ Граница гидродинамической неустойчивости в области высоких $\Delta T_{нед}$ соответствует $x_{вых} > 0$

Опытные данные на рис 20 были аппроксимированы линейными уравнениями пунктирная линия I и пунктирная линия II Значение числа Якоба

⁷ Ishii M and Zuber N, Thermally Induced Flow Instabilities in Two-Phase Mixtures, paper No B5 11, 4th Int Heat Transfer Conf, Paris, 1970

Ja_{zp} , разделяющее границу гидродинамической неустойчивости (термические колебания) на области невысоких и высоких недогревов жидкости $\Delta T_{нед}$ соответствует ординате точки пересечения этих уравнений - точка A . Для опытных данных на рис 20 $Ja_{zp} = 1,5$, среднее квадратичное отклонение $\pm 19,0\%$

Для расчета границы гидродинамической неустойчивости в области высоких недогревов, т.е. для $Ja > Ja_{zp}$ разработано соотношение с использованием опытных данных, полученных в работе

Поток рассматривался как сплошная среда со свойствами жидкости. На входе в канал - недогретая до температуры насыщения, т.е. $\Delta T_{нед} = T'_{ex} - T''_{нас}(p_{ex}) < 0$, при $p = const$, и G (или w_0) = $const$. Течение теплоносителя - подъемное. Канал круглый, прямолинейный, постоянного поперечного сечения диаметром d и длиной l . Тепловой поток равномерно распределен по поверхности $q = const$. Рассматривалось одномерное, изотермическое течение несжимаемого потока с постоянными свойствами. Все величины, входящие в математическое описание задачи, не зависят от времени. Скорость меняется в направлении оси y , перпендикулярной оси канала, совпадающей с осью z .

К системе уравнений движения, сплошности и энергии были применены процедуры конструирования чисел подобия. В результате были получены

число Эйлера $Eu = \frac{\Delta p}{\rho w^2}$, число Рейнольдса $Re = \frac{w \rho l_0}{\mu}$, число Фру-

да $Fr = \frac{w^2}{g l_0}$, число кипения $Bo = \frac{q}{r G}$, симплекс (l_0/d) и $\Delta l/r$. l_0 - геометрический параметр. Таким образом,

$$F(Eu; Re, Fr, Bo, (l_0/d), \Delta l/r) = 0 \quad (1)$$

Полученные в работе опытные данные позволили упростить это выражение, исключив из (1) некоторые критерии и симплекс. Влияние давления учтено симплексом $(\rho' - \rho'')/\rho''$. В качестве определяемого параметра, с учетом полученных в работе результатов, выбрано число кипения Bo .

Было получено следующее выражение

$$Bo_{zp} = const Fr^n Ja^k \left(\frac{\rho' - \rho''}{\rho''} \right)^m \quad (2)$$

где Bo_{zp} - граничное значение числа кипения, соответствующее последнему гидродинамически устойчивому течению кипящего азота.

Численные значения $const$ и показателей степеней n , k , и m в (2) были определены с использованием опытных данных настоящей работы и тогда

окончательно

$$Bo_{ep} = 5,9 \cdot 10^{-3} Fr^{0,1} Ja \left(\frac{\rho' - \rho''}{\rho''} \right)^{-1,1} \quad (3)$$

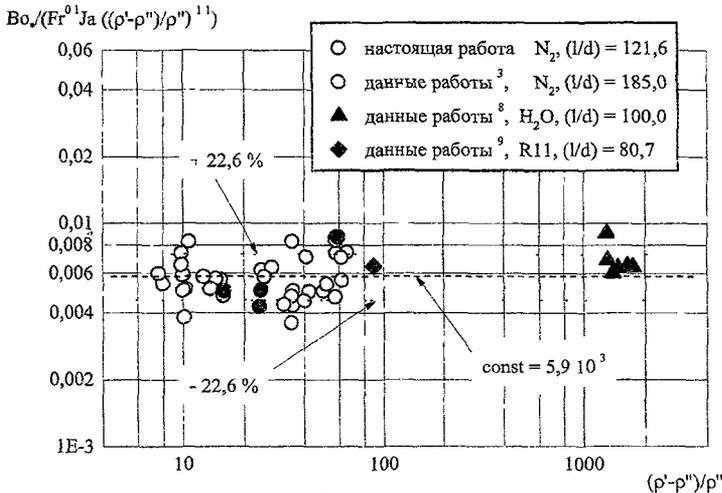


Рис 21

Соотношение (3) обобщает опытные данные со среднеквадратичным отклонением $\pm 25,0 \%$

На рис 21 показаны опытные данные ^{3, 8, 9} для области высоких недогревов жидкости $\Delta T_{нед}$, также относящиеся к последнему гидродинамически устойчивому течению в канале кипящего теплоносителя. Методики проведения опытов в ^{3, 8, 9} были такими же, как и в настоящей работе. Опыты в ^{3, 8, 9} проводились при невысоких расходах теплоносителя. На входе экспериментальных образцов в ^{3, 8, 9} отсутствовало дополнительное гидравлическое сопротивление (дрессельная шайба). Условия проведения опытов бы-

⁸ Jeglic F A and Yang K - T The Incipience of Flow Oscillations in Forced Flow Subcooled Boiling Proc of the 1965 HT and FM Institute, Ed by A F Charwat, Stanford Univ Press, pp 330-344, 1965

⁹ Ли Н Т, Какас С An Experimental Investigation of Thermal Induced Flow Instabilities in a Convective Boiling Upflow System Warme- und Stoffubertragung, 26, pp 365-376, 1991

ли следующие в работе ³ азот, $Ja = (2,7 - 4,0)$, $p = (2,9 - 9,6) 10^5$ Па, $G = (260 - 670)$ кг/(м²с), в работе ⁸ вода, $Ja = (101 - 254)$, $p = 1,38 10^5$ Па, $G = (640,1 - 1170,1)$ кг/(м²с), $(l/d) = 100$, в работе ⁹ фреон - 11, $Ja = 22,6$, $p = 2,93 10^5$ Па, $G = 474,5$ кг/(м²с), $(l/d) = 80,7$

Как видно из рис 21, соотношение (3) удовлетворительно описывает опытные данные ³, относящиеся к кипению азота в канале с большей (l/d) , а также опытные данные ⁸ и ⁹, полученные в опытах с водой и фреоном - 11, с теплоносителями с отличающимися от азота свойствами и на образцах с разными (l/d)

Успешное обобщение опытных данных ⁸ и ⁹ дает основание предположить, что (3) может быть применимо для теплоносителей иного рода, а также для каналов с меньшими относительными длинами, по крайней мере, до $(l/d) = 80,7$

Для расчета границы гидродинамической неустойчивости для области невысоких недогревов жидкости, т е для $Ja < Ja_{сп}$, в первом приближении можно рекомендовать уравнение, аппроксимирующее опытные данные на рис 20 для $(l/d) = 121,6$ и $(l/d) = 185,0$ ³, а именно

$$Ja = 1,55 - 0,04 \left(\frac{l}{d} \right) Bo \left(\frac{\rho' - \rho''}{\rho''} \right) \quad (4)$$

Стандартное отклонение для соотношения (4) 0,292

Соотношения (3) и (4) обоснованы опытными данными в следующих диапазонах изменения режимных параметров $p = (1,7 - 16,3) 10^5$ Па, $G = (100 - 670)$ кг/(м²с), $Ja = 1,0 - 4,4$ ($\Delta T_{нед} = (0,5 - 19,7)$ К), $(l/d) = 121,6 - 185,0$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных комплексных экспериментальных исследований термо - гидродинамики при течении вынужденного потока азота в обогреваемом канале, выполненных как лично автором, так и в соавторстве, получены следующие наиболее существенные результаты.

1) Установлены закономерности возникновения и развития гидродинамической неустойчивости при кипении в канале азота при доминировании в суммарных потерях давления в кипящем потоке по длине канала нивелирной составляющей в широких диапазонах изменения режимных параметров

2) Показано стабилизирующее влияние увеличения массовой скорости и давления на течение в канале кипящего азота. Определена верхняя граница по давлению существования в кипящем потоке колебаний (колебания режимных параметров, включая и область существования термических коле-

баний) Этой границе соответствует давление $p = 23,0 \cdot 10^5$ Па ($(p/p_{кр}) = 0,68$)

3) Исследованная неустойчивость кипящего потока, имеющая гидродинамическую природу, по своим количественным характеристикам является, по-видимому, типичной для доминирования в суммарных потерях давления в кипящем потоке по длине канала нивелирной составляющей. По своему механизму и количественным характеристикам исследованный тип неустойчивости согласно принципам построения классификации¹, может быть отнесен к динамической (периодический характер) фундаментальной (возможно отдельное, независимое исследование) неустойчивости и может занять самостоятельное место в дополнение к уже существующим типам¹

4) Исследовано влияние гидродинамической неустойчивости на теплоотдачу при кипении азота в канале (возникновение и развитие термических колебаний - колебаний температуры стенки канала) в широких диапазонах изменения режимных параметров. Определена верхняя граница по давлению существования термических колебаний. Этой границе соответствует давление $p = 16,0 \cdot 10^5$ Па ($(p/p_{кр}) = 0,47$)

5) Показано, что для давлений $(p/p_{кр}) > 0,35$ при описании теплоотдачи при кипении в канале вынужденного потока азота можно использовать расчетные соотношения, разработанные для гидродинамически устойчивого течения кипящего теплоносителя

6) Экспериментально показано, что в определенных условиях существования гидродинамической неустойчивости возможно длительное бескризисное течение в канале кипящего азота, вплоть до теплового потока, соответствующего кризису кипения при гидродинамически устойчивом течении кипящего азота

7) Показано, что для оценки возможности возникновения в кипящем потоке теплоносителя гидродинамической неустойчивости (включая и термические колебания) может быть использовано массовое расходное паросодержание $x_{вых}$ совместно с давлением

8) Предложена карта гидродинамической неустойчивости (термические колебания) для кипения в канале вынужденного потока азота, охватывающая области невысоких и высоких недогревов жидкости

9) Для каналов с $(l/d) > 121,6$ определено значение числа Якоба $Ja_{кр}$, разделяющее границу гидродинамической неустойчивости (термические колебания) течения в канале кипящего азота на области невысоких и высоких недогревов жидкости

10) Разработаны соотношения для определения границы гидродинамической неустойчивости (термические колебания) течения в канале кипящего азота для областей высоких и невысоких недогревов жидкости, справедливые для каналов с $(l/d) > 121,6$ для следующих условий: давление $p = (1,7 - 16,3) \cdot 10^5$ Па, массовая скорость $G = (100 - 670)$ кг/(м²с) и число Якоба Ja

= 1,0 – 4,4 (недогрев жидкости $\Delta T_{нед} = (0,5 - 19,7)K$)

11) Показана возможность использования соотношения, разработанного для области высоких недогревов, для определения границы гидродинамической неустойчивости течения кипящего теплоносителя в каналах меньшей относительной длины ($(l/d) = 80$ и 100), а также для жидкостей иного рода, в данном случае воды и фреона - 11

12) Получены новые опытные данные для теплоотдачи при кипении вынужденного потока азота в канале при высоких давлениях, вплоть до $p = 23,2 \cdot 10^5$ Па) Для описания теплоотдачи при кипении азота в канале в исследованных диапазонах изменения давления, включая и высокие давления, рекомендуется соотношение ²

13) Впервые получены опытные значения критического теплового потока для кипения в канале азота при высоком давлении - более $\sim 10 \cdot 10^5$ Па и для критического паросодержания более $x_{кр} = 0,20$ С учетом вновь полученных опытных значений $q_{кр}$ проведена модификация фрагмента таблицы рекомендуемых значений критического теплового потока для кипения вынужденного потока азота в канале диаметром 8 мм ⁶ для $p = 20,0 \cdot 10^5$ Па

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В РАБОТАХ

1 Клименко В В , Сударчиков А М , Григорьев А В Экспериментальная установка для исследования неадиабатных двухфазных потоков криоагентов // Тр Моск энерг ин-та, - 1981 - Вып 534 - С 30 - 41

2 Клименко В В , Сударчиков А М Исследование кипения вынужденного потока азота в длинном вертикальном канале // Криогеника - 1983 - Т 23, № 7 - С 379-385 (на английском языке)

3 Клименко В В., Сударчиков А М , Григорьев А В Теплообмен при вынужденном течении жидкого азота в канале // Тр Моск энерг ин-та - 1983 - Вып 616 - С 34 - 39

4 Клименко В В , Сударчиков А М Некоторые особенности пузырькового кипения на внутренней поверхности трубы // Тр Моск энерг ин-та - 1983 - Вып 616 - С 40 - 45

5 Сударчиков А М Экспериментальное исследование интегральных характеристик теплообмена при вынужденном движении двухфазного потока азота в длинном вертикальном канале и расчетные рекомендации Автореферат дисс канд техн наук - Москва, 1984 - 20 с.

6 Клименко В В Сударчиков А М , Григорьев А В Влияние материала поверхности нагрева на теплоотдачу при пузырьковом кипении в каналах в условиях вынужденной конвекции // Доклады АН СССР - 1985 - Т 283, № 1 - С 12-16

7 Клименко А В , Сударчиков А М , Клименко В В , Федоров М В Исследование кризиса теплоотдачи при кипении вынужденного потока азота в

- канале // VIII Международный симпозиум по тепло - и массообмену (2 - 6 апр 1992 г, Польша) - Польша, 1992 - С 116 - 121 (на английском языке)
- 8 Клименко А В , Клименко В В , Сударчиков А М , Токарев С Б , Аль-Абуд Ф Течение кипящего азота в канале при повышенном давлении // II Международная конференция "Криогеника' 92" Тез докл - Брно, Чехословакия 1992 - С 179 (на английском языке)
- 9 Клименко А В , Сударчиков А М , Клименко В В , Тарасов К.Ю , Морозов О И Экспериментальное исследование кризиса теплоотдачи при кипении азота в вертикальном канале // III Международная конференция по экспериментальному теплообмену, механике жидкостей и термодинамике (31 окт - 5 ноя 1993 г, Гонолулу, Гавайи, США) - Гонолулу, Гавайи, США, 1993 - С 1315 - 1321 (на английском языке)
- 10 Кипение вынужденного потока азота в канале / Клименко А В , Сударчиков А М , Клименко В В // I Российская национальная конференция по теплообмену (21 - 25 ноя 1994 г, г Москва) - г Москва, 1994 - Т 4 - С 46 - 53
- 11 Клименко А В , Сударчиков А М , Березов Ф Б , Березов В Б Теплоотдача и критический тепловой поток при кипении вынужденного потока азота в длинном канале // IV Международная конференция "Криогеника' 96" (22 - 25 апр 1996г, Прага, Чехия) - Прага, Чехия, 1996 - С 221-229 (на английском языке)
- 12 Клименко А В , Сударчиков А М , Березов Ф Б , Березов В Б Особенности течения двухфазного вынужденного потока азота в обогреваемом длинном канале // Международный симпозиум "Физика теплопередачи при кипении и конденсации" и XI Международная школа-семинар молодых ученых и специалистов (21-24 мая, 1997г, г Москва) - Москва, 1997 - С 73-78 (на английском языке)
- 13 Клименко А В , Сударчиков А М Исследование гидродинамической неустойчивости при кипении вынужденного потока азота в длинном канале // V Международная конференция "Криогеника' 98" (11-14 мая, 1998г, Прага, Чехия) - Прага, Чехия, 1998 - С 58 - 63 (на английском языке)
- 14 Кризис кипения азота в канале при малых расходах и высоких давлениях / Клименко А В , Сударчиков А М , Клименко В В // II Российская национальная конференция по теплообмену (26-30 окт 1998 г, г Москва) - Москва, 1998 - Т 4 - С 148-151
- 15 Клименко А В , Сударчиков А М , Клименко В В Исследование термически инициированных колебаний в кипящем потоке азота при высоких давлениях // VII Международная конференция "Криогеника' 2000" (20-24 мая, 2000г, Прага, Чехия) - Прага, Чехия, 2000 - С 181 - 185 (на английском языке)
- 16 Клименко А В , Сударчиков А М , Клименко В В Исследование теплоотдачи при кипении азота в канале в условиях вынужденной конвекции при высоких давлениях // V Международная конференция по эксперименталь-

ному теплообмену, механике жидкостей и термодинамике (24-28 сент, 2001г, Салоники, Греция) - Салоники, Греция, 2001 - С 297- 301 (на английском языке)

17. Клименко А В, Сударчиков А М Экспериментальное исследование гидродинамической неустойчивости кипящего в канале вынужденного потока азота // Вестник МЭИ - 2001 - № 5 - С 47-53

18 Клименко А В, Сударчиков А М Исследование гидродинамической неустойчивости при кипении азота в канале при высоких давлениях // XII Международная конференция по теплообмену "Теплообмен 2002" (18 - 23 авг, 2002г, Гренобль, Франция) - Гренобль, Франция, 2002 - С 827-832 (на английском языке)

19 Кризис кипения азота в канале при малых расходах и высоких давлениях / Клименко А В Суларчиков А М, Клименко В В // III Российская национальная конференция по теплообмену (21-25 окт 2002 г, Москва) - Москва, 2002 - Т 4 - С 111-114

20 Клименко А В, Сударчиков А М Влияние давления на гидродинамическую неустойчивость (термические колебания) при кипении азота в канале в условиях вынужденной конвекции // Международный симпозиум "Переходный конвективный тепло- и массообмен в одно- и двухфазных потоках" (17-22 авг, 2003г, Чесме, Турция) - Чесме, Турция, 2003 - С 523-531 (на английском языке)

21 Сударчиков А М Гидродинамическая неустойчивость кипящего в канале вынужденного потока азота // Вестник МЭИ - 2005 - № 4 - С 33-39

22 Клименко А В., Сударчиков А М, Клименко В В Исследование кризиса кипения вынужденного потока азота в канале при высоких давлениях // Вестник МЭИ - 2005 - № 6 - С 135 - 139

23 Кризис кипения азота в канале в условиях вынужденной конвекции при высоких расходах и критических паросодержаниях /Клименко А В., Сударчиков А М, Клименко В В // IV Российская национальная конференция по теплообмену (23 - 27 окт, 2006г, Москва) - Москва, 1979 - Т 4 - С 140 - 143

Подписано в печать 24.09.07г Зак. 241 Тир. 100 П.л. 2,5⁵
Полиграфический центр МЭИ (ТУ)
Красноказарменная ул., д. 13