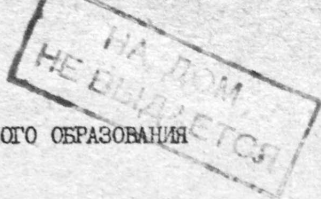


МЗ 76121



МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

С С С Р

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

На правах рукописи

Низовцев Владимир Аркадьевич

ТЕШОПЕРЕДАЧА К ВЕРТИКАЛЬНОМУ ГАЗОЖИДКОСТНОМУ
ПОТОКУ В ПУЗЫРЬКОВОМ РЕЖИМЕ

Специальность 01.04.14 – Теплофизика

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

Москва – 1981

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

С С С Р

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

На правах рукописи

Низовцев Владимир Аркадьевич

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА К ВЕРТИКАЛЬНОМУ ГАЗОЖИДКОСТНОМУ
ПОТОКУ В ПУЗЫРЬКОВОМ РЕЖИМЕ

Специальность 01.04.14 - Теплофизика

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

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1376121

Низовцев В. А. Теплопередача

М В Т У
им. Н. Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

Москва - 1981

Работа выполнена в Московском высшем техническом училище имени Н.Э. Баумана.

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент

ТАНЧЕВ Б.Г.

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук

СОРОКИН Д.Н.

Кандидат технических наук

НИГМАТУЛИН Б.И.

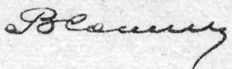
Ведущее предприятие: институт теплофизики СО АН СССР

Защита диссертации состоится " _____ " _____ 1981 г.
на заседании специализированного Совета К.053.1508 при Москов-
ском высшем техническом училище им. Н.Э. Баумана по адресу:
107005, Москва, 2-я Бауманская, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ

Автореферат разослан " _____ " _____ 1981 г.

Ученый секретарь
специализированного Совета
д.т.н., профессор

 СОЛОНИН В.И.

Л - 86115 от 27.4.1981. Заказ 491 Объем I п.л. Тираж 100 экз.

107005, Москва, Б-5, 2-я Бауманская, 5

Актуальность работы. Диссертационная работа посвящена процессам теплопередачи при течении газожидкостной пузырьковой смеси в вертикальном канале — макете канала системы управления ядерного реактора и является частью широко проводимых в СССР исследований систем и устройств жидкостного управления применительно к реакторам типа РБМК. Главное достоинство таких систем заключается в возможности осуществления "мягкого" регулирования, при котором нужное количество поглотителя (замедлителя) вводится в канал любой формы и практически в любое место по высоте и по радиусу активной зоны.

В СССР разработана и внедряется система стержне-жидкостного регулирования, в которой воздействие вводимого сверху в активную зону твердого стержня дополняется столбом жидкого поглотителя, вводимого снизу и питаемого пленкой жидкости. Наряду с преимуществами такая система имеет недостатки — сохраняется неравномерность энерговыделения по высоте активной зоны, ограничен диапазон возможных расходов жидкости. Указанные недостатки могут быть устранены использованием опускающего двухфазного потока поглотителя в пузырьковом режиме течения. Если вопросы гидродинамики и теплообмена в подъемных газожидкостных потоках исследованы достаточно, то опускающее течение недогретой до температуры насыщения жидкости с пузырьками газа, практически не изучено. Анализ известных данных по гидродинамике и теплообмену показывает невозможность переноса данных, полученных при подъемном двухфазном течении на опускающее течение. В частности существенно изменяется в зависимости от направления течения величина истинного объемного газосодержания, которая в системе жидкостного регулирования является не только определяющей гидродинамической характеристикой, но и важнейшим контролируемым параметром, непосредственно влияющим на реактивность реактора.

Цель работы — изучение теплоотдачи к двухфазным вертикальным потокам в пузырьковом режиме. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Исследование локальных коэффициентов теплоотдачи при опускающем и подъемном спутном течении двухфазного потока, и в режиме записания газовой фазы во взаимосвязи с определением истинного объемного газосодержания смеси и гидравлического сопротивления.

2. Получение обобщенных зависимостей для коэффициентов трения и теплоотдачи в вертикальных газожидкостных потоках.

Научная новизна работы заключается в следующем.

Впервые получены экспериментальные данные по теплоотдаче от стенки к опускающему спутному газожидкостному потоку и к потоку в режиме зависания газовой фазы во взаимосвязи с измерением истинного объемного газосодержания. Показано, в частности, что в сходных условиях по температуре, газосодержанию, приведенной скорости жидкости / для спутных потоков / коэффициент теплоотдачи в подъемном течении больше, чем при спутном опускающем течении и меньше, чем в режиме зависания газовой фазы.

Получены новые обобщающие зависимости для коэффициентов трения и теплоотдачи для вертикальных газожидкостных потоков.

В работе установлено, что определяющими в процессе теплопередачи к газожидкостному потоку являются теплофизические свойства жидкой фазы. Подтверждено, что процессы переноса тепла и импульса в пузырьковых вертикальных потоках подобны между собой.

Практическая ценность. Результаты исследования теплоотдачи к опускающему газожидкостному потоку и зависимости для расчета гидравлического сопротивления и коэффициентов теплоотдачи использованы при разработке канала системы стержне-жидкостного регулирования для реактора РБМК.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на Дальневосточной научно-технической конференции "Вопросы использования морских и сточных вод в судовых энергетических установках" / Владивосток, ДВНХ им. Куйбышева, 1980 г. /, на Всесоюзной научно-технической конференции "Научно-технический прогресс в машиностроении и приборостроении" / Москва, МВТУ им. Баумана, 1980 г. /, на Московском межвузовском семинаре "Инженерные проблемы ядерной энергетики" под научным руководством академика Н.А. Доллежалея / Москва, МВТУ им. Баумана, 1980 г. /.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы отражены в 2 печатных работах. Кроме того, материалы исследований использованы в 2 научно-технических отчетах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, выводов, списка литературы. Работа содержит 159 страниц, включая 82 страницы текста, 65 рисунков, 2 таблицы, список литературы на 9 страницах, включающих 78 работ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность работы, изложена цель и общие задачи исследования, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен анализ опубликованных результатов исследований гидродинамики и теплоотдачи в двухфазных вертикальных потоках в пузырьковом режиме течения.

Особое внимание при исследовании двухфазных систем должно уделяться вопросу определения газосодержания. Простая связь истинного объемного газосодержания φ с расходным газосодержанием β , полученная А.А.Армандом для подъемных двухфазных потоков не выполняется в опускном движении. В координатах (β, φ) экспериментальные данные большинства исследователей в случае подъемного двухфазного течения располагаются ниже прямой $\varphi = \beta$, а для опускного течения данные лежат по обе стороны прямой $\varphi = \beta$. В режиме записания газовой фазы весь диапазон изменений φ происходит на прямой $\beta = 0$. Поэтому зависимости вида $\varphi = f(\beta)$, полученные для подъемных потоков нельзя переносить на опускные двухфазные течения. Данные по измерению истинного объемного газосодержания в опускных двухфазных пузырьковых потоках в зависимости от различных параметров / температура, приведенная скорость жидкости, давление / получены в МВТУ В.Г.Пересадыко, результаты работы которого предшествуют настоящему исследованию.

Особенностью вертикального двухфазного потока в пузырьковом режиме является аномальное возрастание касательного напряжения на стенке / А.И.Бурдуков и др., В.Г.Пересадыко / которое не описывается известными соотношениями по расчету потерь на трение в двухфазном потоке / А.А.Арманд, Р.В.Локкарт и Р.К. Мартинелли / .

Анализ литературных данных показал, что исследования теплоотдачи в двухфазном потоке в пузырьковом режиме течения без фазовых превращений проводились главным образом при подъемном течении. Для подъемных течений было выявлено существенное влияние на теплоотдачу приведенной скорости газовой фазы и теплофизических свойств жидкой фазы. Влияние скорости жидкости начинает проявлять себя с величин $W_{ж} > 0,5$ м/с. Большинство исследователей не обнаружено влияние диаметра канала на теплоотдачу.

Исследование В.Н.Соколова и др. при опускном движении

двухфазной смеси не показало различия между теплоотдачей на подъемном и опускном участке экспериментальной установки змеевикого типа.

Большинство авторов предлагают различные зависимости для расчета теплоотдачи к подъемному двухфазному потоку, сопоставление которых при одинаковых условиях дает расхождение до 100%. В литературе практически отсутствуют экспериментальные данные совместного определения $\alpha_{\text{эф}}$ и φ , и данные по исследованию теплоотдачи в опускных двухфазных потоках.

На основе проведенного анализа были поставлены следующие задачи диссертационной работы:

1. Провести комплексное исследование теплоотдачи во взаимосвязи с измерением газосодержания и потерь на трение по длине канала в опускном спутном двухфазном потоке, в режиме зависания газовой фазы и в подъемном двухфазном потоке для пузырькового режима течения.

2. Выявить влияние на теплоотдачу к опускному двухфазному потоку следующих параметров: газосодержания; скорости жидкости; теплофизических свойств жидкой фазы; плотности теплового потока на стенке; абсолютного давления смеси.

3. Обобщить полученные результаты зависимостями, включающими в себя основные параметры от которых зависит теплоотдача к двухфазному потоку.

Во второй главе приводится описание экспериментального стенда; методика определения истинного объемного газосодержания резистивным методом; методики исследований теплоотдачи, гидравлического сопротивления, профиля распределения температуры потока по сечению канала; результаты тарировочных исследований, а также анализ погрешностей определения измеряемых величин.

Экспериментальный стенд состоит из: рабочего участка; системы обогрева; водяного и газового контуров и системы измерений.

Рабочий участок представляет собой вертикальную медную трубу с внутренним диаметром 27 мм и длиной 3000 мм. Обогреваемый участок длиной 1030 мм расположен на расстоянии 1600 мм от верхнего края трубы. Обогрев участка осуществлялся электрическим током, пропускаемым по нихромовой ленте, которая намотана по спирали на наружной поверхности трубы. Снаружи нагреватель изолировался асбестом и огнеупорной глиной. Выше и ниже обогреваемого участка были установлены прозрачные вставки, выполненные из

оргстекла. В эти вставки устанавливались датчики газосодержания резистивного типа которые представляют собой два кольцевых электрода толщиной 0,1 мм, выполненные из нержавеющей стали и установленные заподлицо на внутренней поверхности прозрачной вставки. Соотношение оптимальных размеров таких датчиков были выбраны согласно рекомендациям В.Г.Пересадыко - ширина колец 13,5 мм, расстояние между ними 27 мм / для канала диаметром 27 мм /.

Имелась возможность установки датчиков между участками обогрева.

Для определения коэффициента теплоотдачи измерялись температура смеси на входе и выходе обогреваемого участка, подводимая электрическая мощность, температура стенки в шести сечениях по высоте канала, в каждом сечении в стенку были заделаны по две термодатчики на диаметрально противоположных сторонах участка.

Расход жидкости определялся объемным методом, расход газорасходометром. Для определения распределения давления по высоте рабочего участка производился отбор статического давления в одиннадцати сечениях.

Газосодержание определялось по изменению сопротивления между электродами датчика при течении жидкости ($R_{ж}$) и двухфазной смеси ($R_{гф}$). Тарировка датчиков барботажным методом показала хорошее соответствие с зависимостью Максвелла

$$\frac{1 - R_{ж}/R_{гф}}{1 + 0,5 R_{ж}/R_{гф}} = \varphi \quad / I /$$

Методика проведения экспериментов была следующей. При проведении исследований с опускным движением жидкой фазы, двухфазный поток формировался с помощью смесительного устройства эжекторного типа с центральным подводом газа и подводом жидкости через кольцевую щель. При подъемном течении газ в жидкость вдувался через пористую вставку в нижней части рабочего канала. Диаметр пузырьков в том и другом случае был приблизительно одинаковым и составлял 4 - 6 мм. Режим записания газовой фазы осуществлялся подачей газа в опускной поток жидкости истинная скорость которой была менее 0,2 м/с, что соответствует скорости свободно всплывающего одиночного пузырька диаметром 2 - 10 мм. После достижения пузырьками газа выхода из рабочего участка, подача газа прекращалась и после некоторого времени, необходимого для "вымывания" "лишнего" газа, устанавливался стационар-

ный двухфазный режим.

Измерение $R_{ж}$ и $R_{эф}$ датчиками, установленными после обогреваемого участка проводились при одинаковой температуре жидкости, что позволило не учитывать температурный фактор при определении газосодержания.

По измеренным значениям статического давления и величины газосодержания определялись потери на трение, как разность полного перепада и нивальной составляющей.

Результаты определения коэффициента теплоотдачи к опускающему и поднимающему однофазному потоку жидкости с погрешностью $\pm 7\%$ совпали с рассчитанными по известной формуле М.А. Михеева. В исследованном диапазоне изменения параметров влияние термогравитационных сил на теплоотдачу было не значительным. Максимальная среднеквадратичная погрешность определения величин составляла: коэффициента теплоотдачи - $\pm 10,8\%$; газосодержания - $\pm 17\%$; потерь на трение - $\pm 17,5\%$.

В третьей главе приведены результаты экспериментального исследования теплоотдачи при подъемном и опускающем спутных течениях двухфазной смеси в пузырьковом режиме, а также в режиме зависания газовой фазы; приведены результаты исследования гидравлического сопротивления в опускающем спутном потоке и в режиме зависания; произведена обработка экспериментальных данных и получены критериальные зависимости для расчета гидравлического сопротивления и коэффициентов теплоотдачи к газожидкостным вертикальным пузырьковым потокам.

Исследование проведено в следующих диапазонах изменения основных параметров: приведенная скорость жидкости $W_{ж} = 0,08 - 1,6$ м/с; истинное объемное газосодержание $\varphi = 0,01 - 0,33$; температура смеси $t = 4 - 65^\circ\text{C}$; плотность теплового потока на стенке $q = 8 - 60$ кВт/м²; абсолютное давление смеси $P = 0,08 - 0,17$ МПа. Жидкая фаза - вода, газовая фаза - воздух.

В зоне обогреваемого участка двухфазный поток был гидродинамически стабилизированным. При анализе данных по теплоотдаче и трению, истинное объемное газосодержание по длине обогреваемого участка принималось $\varphi = \varphi_{ср} = \text{const}$.

При экспериментальных исследованиях коэффициентов теплоотдачи прежде всего была выявлена зона тепловой стабилизации. Для всех исследованных режимов эта зона была меньше, чем для одно-

фазной жидкости и не превышала десяти - пятнадцати калибров. Большинство экспериментальных данных с погрешностью $\pm 7\%$ описывается зависимостью

$$\frac{\alpha_{\text{лжк. гф}}}{\alpha_{\text{гф}}} = 0,9 + 0,5 \frac{d}{L} ; \quad / 2 /$$

$$5 \leq \frac{L}{d} \leq 15.$$

Проведено исследование поля температур по сечению канала для однофазного и двухфазного потоков. Даже небольшое количество газовой фазы приводит к более наполненному профилю температур по сравнению с однофазной жидкостью. Это свидетельствует об усилении турбулентного перемешивания потока по сравнению с однофазной жидкостью. Исследование поля температур при $L/d > 15$ подтвердило автомодельность безразмерного распределения температуры по сечению, что также свидетельствует о стабилизации теплоотдачи для указанных расстояний.

Опускное спутное течение

Исследование теплоотдачи во взаимосвязи с измерением величины газосодержания позволило выявить определяющее влияние φ на $\alpha_{\text{гф}}$. Уже при небольшом значении газосодержания ($\varphi \approx 0,03$) теплоотдача к двухфазному потоку резко возрастает по сравнению с теплоотдачей к однофазной жидкости / 1,5 - 2 раза /. С увеличением газосодержания, коэффициент теплоотдачи растет.

Приведенная скорость жидкости оказывает влияние на теплоотдачу во всем исследованном диапазоне изменения $W_{\text{ж}} = 0,3 - 1,2$ м/с. Большим значениям $W_{\text{ж}}$ соответствует большее значение $\alpha_{\text{гф}}$, при прочих равных условиях.

Влияние температуры смеси на теплоотдачу проявляется через изменение теплофизических свойств жидкой фазы. Вязкость жидкости качественно одинаково влияет на коэффициент теплоотдачи, как при течении только жидкости в трубе, так и при течении двухфазной смеси, причем наклон зависимостей $\alpha_{\text{гф}} = f(W_{\text{ж}})$ и $\alpha_{\text{ж}} = f(W_{\text{ж}})$ в логарифмических координатах приблизительно одинаковый.

Все авторы, изучавшие распределение газосодержания по сечению канала / А.П.Бурдуков и др., В.Г.Пересадыко, В.И.Субботин и др. /, получали нулевое газосодержание у стенки, т.е. вблизи стенки находится непрерывный жидкостный слой и его теплофизические

свойства являются определяющими при теплоотдаче. Кроме того, суммарная теплоемкость жидкости существенно превышает суммарную теплоемкость газовой фазы. Влияние других параметров, таких как: плотность теплового потока на стенке; давление смеси, на теплоотдачу обнаружено не было.

Таким образом, достаточными для определения теплоотдачи при опускном спутном течении газожидкостной пузырьковой смеси являются параметры: φ , $W_{ж}$, t и теплофизические свойства жидкой фазы.

Сопоставление потерь на трение с данными полученными В.Г. Пересадько на трубе диаметром 40 мм в сходных условиях по скорости жидкости, газосодержанию и температуре показало хорошее совпадение. Расчетные значения по зависимости А.А.Армандо расходятся с экспериментом более чем на 100%, что указывает на специфические особенности пузырькового потока в вертикальных трубах / А.П.Бурдуков и др. /

Подъемное спутное течение

Для подъемного течения газожидкостной пузырьковой смеси исследование теплоотдачи проведено на одном и том же стенде и по одинаковой методике, что и для опускного течения. Полученные данные в сопоставимых условиях коррелируются с данными других исследователей / Г.К.Гончаренко и А.В.Жуков, В.Н.Солов и др. /

Режим зависания газовой фазы

В условиях экспериментов объемное газосодержание практически было однозначной функцией скорости жидкости и с погрешностью $\pm 2\%$ совпадало с аналогичной зависимостью полученной В.Г.Пересадько на трубе с диаметром 40 мм.

Основными параметрами, влияющими на теплоотдачу в этом режиме, являясь газосодержание и температура. С увеличением φ растет $\alpha_{\text{эф}}$ несмотря на одновременное уменьшение скорости жидкости. Абсолютные значения коэффициентов теплоотдачи существенно выше значений $\alpha_{\text{эф}}$ при спутном опускном и подъемном течении.

Зависимость потерь на трение от газосодержания при некотором значении φ , по данным В.Г.Пересадько, имеет максимум. Однако в данной работе, при хорошем совпадении абсолютных значений, максимум не был достигнут.

Сопоставление результатов по одновременному измерению коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления – рис.1 показало, что

$$\frac{\alpha_{\text{гф}}}{\alpha_{\text{ж}}} \approx \sqrt{\left(\frac{\Delta P_{\text{гф}}}{\Delta P_{\text{ж}}}_{\text{тр}} \right)} ; \quad / 3 /$$

т.е. выполняется пропорциональность коэффициента теплоотдачи корню квадратному из потерь на трение, что свидетельствует об аналогии процессов переноса тепла и импульса. Исходя из этого и учитывая сделанный выше вывод об определяющем влиянии на теплоотдачу физических свойств жидкой фазы для обобщения экспериментальных данных использовалась зависимость В.С.Петухова и В.В. Кириллова полученная для расчета $\alpha_{\text{ж}}$ в трубах. Эта зависимость для двухфазных потоков имеет вид

$$\frac{\alpha_{\text{гф}}}{\alpha_{\text{ж}}} = \frac{1/8 \cdot C_{\text{гф}} \cdot Pr}{1,07 + 12,7 \sqrt{C_{\text{гф}}/8} (Pr^{2/3} - 1)} \quad / 4 /$$

Зависимость $C_{\text{гф}}$ от основных исходных параметров находилась из следующих предположений. Так как присутствие пузырей газа приводит к дополнительному перемешиванию потока жидкости, то влияние этих дополнительных возмущений можно представить /Y. Sato, Н.Н.Елин и О.В.Клапчук / в виде

$$\tau_{\text{гф}} = \rho \left(v \frac{\partial u}{\partial y} + \overline{u'_t v'_t} \right) + \rho \overline{u'_k v'_k} ; \quad / 5 /$$

где: $\overline{u'_t v'_t}$ – мелкомасштабные составляющие пульсаций;

$\overline{u'_k v'_k}$ – крупномасштабные составляющие пульсаций, обусловленные наличием пузырей газа.

Предполагая, что выражение / 5 / справедливо по всему сечению канала, для касательного напряжения на стенке имеем

$$\tau_{\text{гф ст}} = \tau_{\text{ж ст}} + \Delta \tau_{\text{п ст}} ; \quad / 6 /$$

и переходя к коэффициентам трения, получаем

$$C_{\text{гф}} = C_{\text{ж}} + \Delta C_{\text{п}} \quad / 7 /$$

Значение $C_{\text{ж}}$ находится по зависимостям для движения однофазной жидкости в трубе, например, по зависимости Блазиуса.

На рис.2 показана доля $\Delta C_{\text{п}}$ в общем значении коэффициента сопротивления $C_{\text{гф}}$ в режиме зависания газовой фазы и в спутном опускном потоке. $C_{\text{гф}}$ определялся из данных по теплоотдаче. Видно, что в режиме зависания и при малых скоростях жидкости в

спутном опускном течении общее сопротивление определяется в основном, величиной ΔC_{fn} .

Зависимость ΔC_{fn} от основных параметров найдена с использованием метода анализа размерностей. В общем виде величина ΔC_{fn} является функцией следующих безразмерных комплексов

$$\Delta C_{fn} = f(\varphi, Re_*, \frac{V_*}{V_r}, \frac{Q_*}{Q_r}, \frac{U_*}{U_r}, M, Ar_b, Re_b, U_b). \quad / 8 /$$

Найденные из экспериментов по теплоотдаче значения ΔC_{fn} аппроксимированы следующими зависимостями:

$$\begin{array}{l} \text{опускное спутное течение} \\ \Delta C_{fn} = 0,03 \varphi^{-0,43} U_b^{-0,26} \varphi^{-0,63} \end{array} \quad ; \quad / 9 /$$

$$\begin{array}{l} \text{режим зависания газовой фазы} \\ \Delta C_{fn} = 2,64 \cdot 10^3 \varphi^{0,8} Ar_b^{-0,56} \end{array} \quad ; \quad / 10 /$$

$$\begin{array}{l} \text{подъемное спутное течение} \\ \Delta C_{fn} = 480 \varphi^{0,29} Ar_b^{-0,64} \end{array} \quad . \quad / 11 /$$

На рис.3 показано сопоставление экспериментальных / непосредственно измеренных / данных по трению с расчетными кривыми в режиме зависания газовой фазы. Расчетная кривая с погрешностью $\pm 20\%$ описывает экспериментальные данные на трубах диаметром 27 мм и 40 мм, 52 мм / В.Г.Пересадько /. Расчет по зависимости А.А. Арманда не описывает экспериментальных данных в пузырьковых вертикальных потоках -рис.3.

На рис.4 показано сопоставление экспериментальных данных по теплоотдаче с расчетными кривыми для исследованных режимов течения. Расчетные кривые с погрешностью $\pm 14\%$ описывают основные особенности коэффициентов теплоотдачи в пузырьковых вертикальных потоках.

ВЫВОДЫ

1. Проведено экспериментальное исследование теплоотдачи к пузырьковому газожидкостному потоку во взаимосвязи с измерением истинного объемного содержания газовой фазы при опускном и подъемном спутных течениях и при опускном течении в режиме зави-

сания газовой фазы. Основные параметры изменялись в диапазоне: приведенная скорость жидкости $W_{ж} = 0,08 - 1,6$ м/с; истинное объемное газосодержание $\varphi = 0,01 - 0,33$; температура смеси $t = 4 - 65^{\circ}\text{C}$; плотность теплового потока на стенке $q = 8 - 60$ кВт/м²; абсолютное давление смеси $P = 0,08 - 0,17$ МПа. Исследование в опускном течении выполнено впервые.

2. Выявлено определяющее влияние истинного объемного газосодержания на величину коэффициента теплоотдачи. Коэффициент теплоотдачи растет с увеличением газосодержания. Для режима зависания газовой фазы коэффициент теплоотдачи растет с увеличением газосодержания несмотря на снижение истинной скорости жидкой фазы.

3. Коэффициент теплоотдачи при близких условиях существенно зависит от направления движения смеси. Наибольшие коэффициенты теплоотдачи соответствуют режиму зависания газовой фазы, наименьшие — опускному спутному течению.

4. Теплоотдача к пузырьковому потоку определяется свойствами жидкой фазы в непрерывном пристеночном слое жидкости.

5. Показано, что процессы теплообмена и гидродинамики в пристенном слое для исследованных режимов течения подобны между собой.

6. На основе критериального анализа получены зависимости для определения коэффициентов трения и теплоотдачи в вертикальных двухфазных потоках в пузырьковом режиме течения.

7. Результаты работы использованы специализированным предприятием при разработке системы стержне-жидкостного регулирования

Условные обозначения: φ — истинное объемное газосодержание; β — расходное объемное газосодержание; $Re_{*} = \frac{U_{*} d}{\nu_{*}}$.

$Re_{*} = \frac{U_{*} \ell_{*}}{\nu_{*}}$ — критерий Рейнольдса; ℓ_{*} — постоянная Лапласа;

$Mo = \frac{q_{*} \ell_{*}}{P}$; $U_{*} = U_{*} \left(\frac{g \beta}{g_{*} - g_{r}} \right)^{0,25}$; $Ar_{*} = \frac{g \ell_{*}^3}{\nu_{*}^2}$ — критерий Архимеда; P — давление; U — скорость; d — диаметр; β — коэффициент поверхностного натяжения; ν — коэффициент кинематической вязкости; ρ — плотность; λ — коэффициент теплопроводности; α — коэффициент теплоотдачи; C_f — коэффициент трения; τ — касательное напряжение. Индексы: дф — двухфазный; ж —

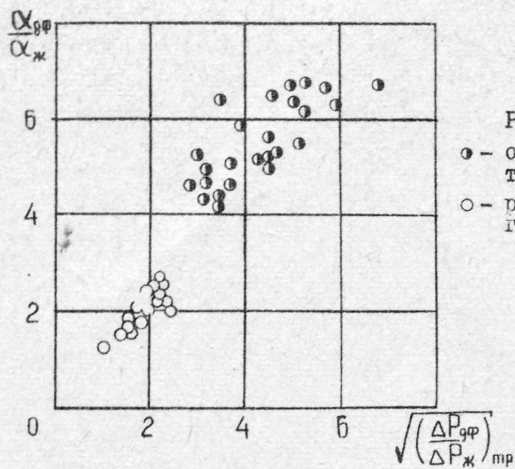


Рис. 1.

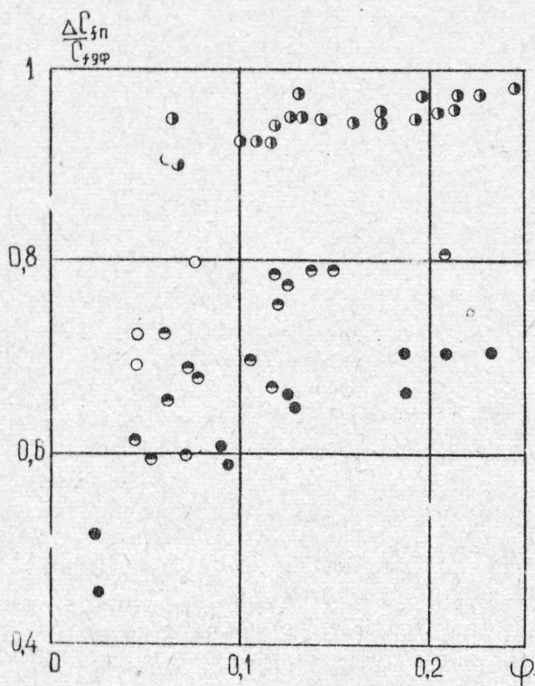


Рис. 2.

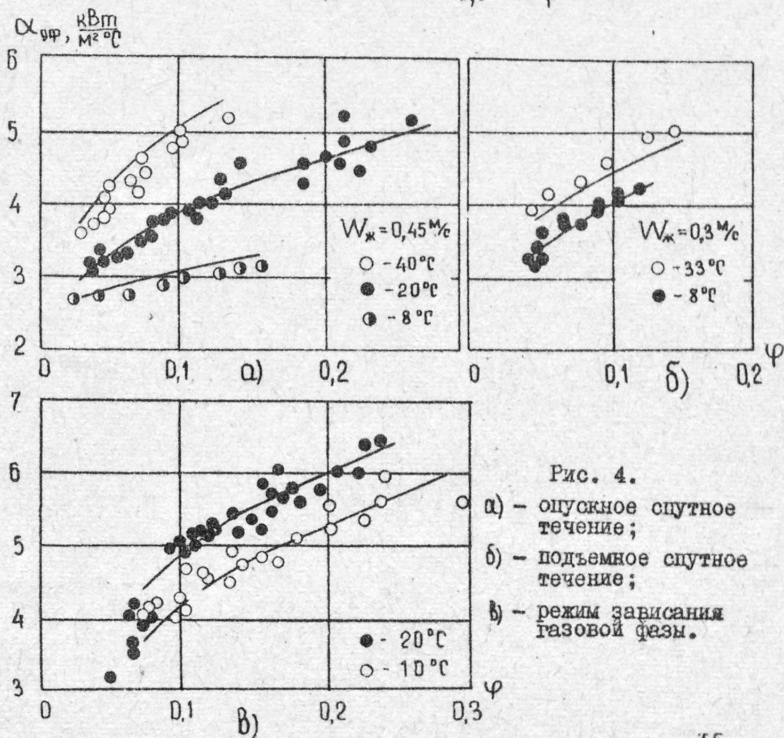
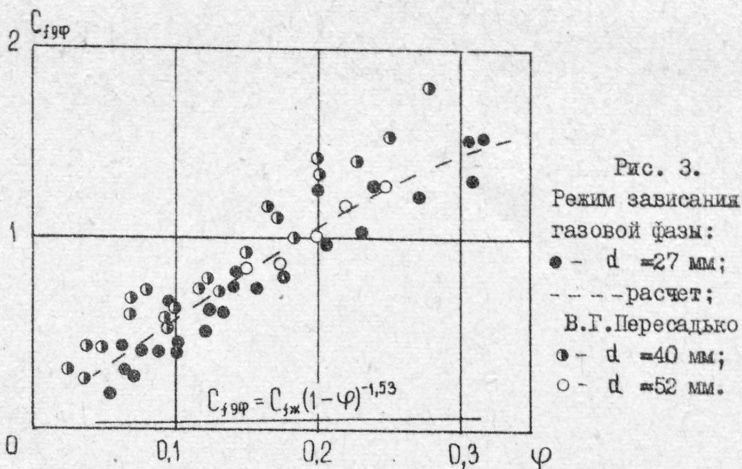


Рис. 4.

- а) - спускное спутное течение;
б) - подъемное спутное течение;
в) - режим зависания газовой фазы.

жидкость; г — газ; δ — характерный размер l_δ ; лок — локальный; п — пузырь.

Основное содержание диссертации отражено в работах:

1. Ганчев Б.Г., Низовцев В.А. Исследование теплоотдачи к опускающему пузырьковому двухфазному потоку. — Межвузовский сборник научных трудов/ Современные проблемы гидродинамики и теплообмена в элементах энергетических установок и криогенной технике, 1980, вып.9, с. 119-123.
2. Ганчев Б.Г., Низовцев В.А. Исследование теплоотдачи к двухфазному пузырьковому потоку в вертикальном канале. — Известия вузов. Машиностроение, 1981, № 10 /принято к печати/.