

На правах рукописи

**Кичатов
Борис Викторович**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГИДРОДИНАМИКИ И
ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ДВУХФАЗНЫХ
ПОТОКОВ С ПОРИСТОЙ СРЕДОЙ**

01.04.14- Теплофизика и молекулярная физика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Кичатов

Москва - 2000

Работа выполнена Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана.

Официальные оппоненты:

Галицейский Б.М.

доктор технических наук,
профессор

Диев М.Д.

доктор технических наук,
профессор

Семенов В.И.

доктор технических наук

Ведущее предприятие: Исследовательский Центр им.М.В.Келдыша

Защита диссертации состоится " 27 " 03 2000 г. в 15 на заседании диссертационного совета Д.053.15.15 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу:
1, корпус факультета

и в библиотеке МГТУ им.

в библиотеках,
взять по адресу: 107005,
г. Баумана, ученому

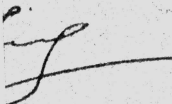
1565309

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1565309

Кичатов Б.В. Моделирование

 Зимин А.М.

Общие по автореферату сокращения:

ДП – двухфазный поток;
КЗУ – капиллярное заборное устройство;
КПП – капиллярно-пористое покрытие
КРФ – капиллярный разделитель фаз;
КУС – капиллярная удерживающая способность;
ПС – пористая среда.

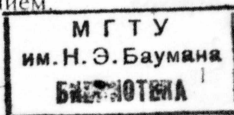
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

1578309
Актуальность проблемы. Важной задачей при создании современной техники является интенсификация процессов теплообмена. Одним из перспективных и эффективных методов интенсификации является использование в теплообменных устройствах пористых элементов. За счет организации процесса фазового перехода охладителя в пористых элементах теплообменных устройств можно существенно повысить его эффективность. Процессы теплообмена и движения фаз в пористых телах изучаются на протяжении длительного времени в теории сушки и многофазной фильтрации. Однако, разработанный аппарат практически не приспособлен для исследования высокоинтенсивных процессов фазового перехода при вынужденном течении охладителя в пористой среде и кипения на поверхностях с пористыми покрытиями в условиях естественной конвекции. В связи с этим актуальной является задача разработки теории взаимодействия двухфазных потоков с пористой средой при высокой интенсивности фазового перехода. Для анализа таких систем возникает необходимость разработки расчетной методики процессов переноса теплоты и импульса при фильтрации двухфазного потока в пористой среде. Модели, описывающие подобные процессы, должны учитывать ряд основных предположений: каждая из фаз движется в ПС со своей скоростью; процесс парообразования осуществляется в условиях близких к состоянию термодинамического равновесия и при этом необходимо рассматривать процесс перераспределения энергии и импульса между фазами.

Целью работы является разработка методов расчета процессов фильтрации газожидкостных смесей и кипения в ПС. Достижение указанных целей проводилось путем решения следующих основных задач:

1. Исследование гидравлических характеристик газожидкостных потоков при движении в ПС, включая анализ фильтрации газонасыщенной жидкости, сопровождающейся газовыделением, и экспериментальное изучение процесса распыла жидкости при помощи газожидкостной форсунки с пористым смесительным элементом;

2. Исследование процессов фильтрации парожидкостной смеси в ПС в адиабатических условиях и с объемным тепловыделением.



3. Исследование процессов кипения жидкости на поверхностях с пористыми покрытиями в условиях естественной конвекции, включая анализ гистерезиса "отклонения температуры", кипения на обращенной вниз поверхности, кипения растворов, определения условия отрыва пузыря на внешней поверхности КПП;

4. Исследование влияния испарения жидкости на работоспособность КРФ в системе КЗУ бака космического аппарата;

5. Исследование теплогидравлической устойчивости последовательно расположенных реакторов с фазовыми переходами.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней впервые на основе проведенного экспериментального исследования разработана теория, позволяющая производить расчет газожидкостной форсунки с пористым смесительным элементом; разработана модель, позволяющая определять зависимость перепада давления от расхода при фильтрации газонасыщенной жидкости в ПС; экспериментально показано, что процесс парообразования при вынужденном течении охладителя осуществляется в условиях, близких к состоянию термодинамического равновесия; исследована структура зоны кипения при вынужденной фильтрации жидкости в ПС; построена модель по расчету структуры зоны кипения жидкости в ПС с объемным тепловыделением при вынужденном течении; построена модель кипения жидкости на поверхностях с КПП, позволяющая рассчитать явление гистерезиса "отклонения температуры" и выявить условия его существования, описать закономерности теплоотдачи при кипении жидкости на поверхности, обращенной вниз, выявить основные закономерности при кипении растворов, определить условия отрыва пузыря при его росте на внешней поверхности КПП; построена модель, позволяющая определить КУС фазоразделяющей сетки при воздействии процесса испарения; проведено аналитическое решение задачи о теплогидравлической устойчивости двух последовательно расположенных реакторов с фазовым переходом.

Практическая ценность работы заключается в том, что в ней показано влияние основных режимных и конструктивных параметров газожидкостной форсунки с пористым смесительным элементом, на дисперсность распыла. Сформулированы и обоснованы основные требования, предъявляемые к КПП поверхностей теплообменников, когда интенсивность теплоотдачи перестает зависеть от его ориентации относительно поля тяжести. Определено влияние испарения жидкости из КРФ на работоспособность КЗУ.

Создан метод расчета теплообмена при кипении растворов (масло - хладон) на пористой поверхности, позволившие провести оптимизацию характеристик КПП. Разработаны рекомендации по расчету системы транспирационного охлаждения, когда жидкость в ПС претерпевает фазовый переход.

Реализация работы. Результаты работы используются в Ракетно-космической корпорации “Энергия” им. С.П.Королева, Исследовательском центре им. М.В.Келдыша, Научно - исследовательском институте химического машиностроения, Центральном институте авиационного машиностроения им. П.И. Баранова, Московском институте теплотехники, Научно - производственном объединении “Луч”.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались в МГТУ им. Н.Э.Баумана (кафедра Э1, кафедра Э6, отдел ЭМ-1.1); Научном семинаре ИВТ РАН под руководством академика РАН Леонтьева А.И., Научно - производственном объединении “Луч”; Региональном межвузовском семинаре, Воронеж - 1996, 1997, 1998, 1999; Международной конференции по ракетно - космической технике, Москва - 1998; 2-ой Российской национальной конференции по теплообмену, Москва-1998; Российской межвузовской и межотраслевой научно-технической конференции по ракетно-космическим двигательным установкам, Москва - 1998; 11 и 12-ой школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева, Москва - 1997,1999; 3-ой Всероссийской научно-технической конференции, Санкт-Петербург - 1999; Всероссийской научно-технической конференции по проблемам теплофизики процессов горения и охраны окружающей среды, Рыбинск - 1999.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 34 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, основных выводов, списка использованной литературы. Общий объем диссертации составляет 235 страниц, в том числе 56 рисунка, таблиц 4. Список литературы включает 182 названия.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана краткая характеристика современного состояния проблемы, обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы задачи и цели работы, определена научная новизна и практическая значимость работы. Представлены выносимые на защиту положения, изложено краткое содержание диссертации и приведены данные о структуре работы и о числе публикаций.

В первой главе приводится обзор основных экспериментальных и теоретических результатов по проблемам гидравлического сопротивления и теплообмена при фильтрации ДП в ПС. Рассматриваются преимущества и недостатки моделей “раздельного течения фаз” (Scheidegger A.E.) и “двухфазной смесевой” модели (Wang C.-Y., Beckermann C.).

Рассматриваются основные подходы, предложенные автором работы, по наиболее общим проблемам взаимодействия ДП с ПС. Для одномерных, стационарных режимов фильтрации, когда капиллярные и массовые силы не играют существенной роли, из обобщенных законов Дарси для паровой и жидких фаз получена связь между расходным массовым паросодержанием и объемным содержанием жидкости:

$$x_n = \frac{(1-s)^n}{v_2 s^n + (1-s)^n} \cdot \frac{v_1}{v_2} \quad (1)$$

Если известны массовые расходы газа и жидкости, фильтрующиеся через ПС, то из (1) можно найти объемное газосодержание, а по обобщенному закону Дарси определить потери давления.

В том случае, когда распространением тепла за счет теплопроводности и работой сил трения можно пренебречь и при использовании предположения, что температуры фаз совпадают, получен закон сохранения энергии:

$$c_1 T + c_1 (T_n - T) x_n + c_2 (T - T_n) x_n + L x_n = const. \quad (2)$$

Если температура парожидкостной смеси совпадает с температурой насыщения, тогда (2) примет вид:

$$c_1 T_n + L x_n = const. \quad (3)$$

Соотношение (3) отражает тот факт, что энтальпия парожидкостной смеси по толщине зоны кипения в ПС при отсутствии теплоподвода остается постоянной. При фильтрации ДП в ПС происходит перераспределение энергии между паровой и жидкой фазами. Используя соотношения (1) и (3) и обобщенный закон Дарси можно найти связь между распределением давления и температуры по толщине зоны парообразования.

Если в пористой матрице осуществляется объемное тепловыделение, то энтальпия парожидкостной смеси возрастает по направлению фильтрации. В этом случае закон сохранения энергии при равенстве температуры парожидкостной смеси температуре насыщения, примет вид:

$$\frac{\dot{Q}x}{G} = c_1 T_n + L x_n + const. \quad (4)$$

Вторая глава посвящена исследованию проблем гидродинамики при вынужденном течении ДП в ПС.

При фильтрации газонасыщенной жидкости в ПС, в результате уменьшения давления, может осуществляться процесс газовыделения из жидкости. В этом случае основные гидравлические характеристики существенно отличаются от фильтрации деаэрированной жидкости (рис. 1). С целью изучения зависимости расхода от перепада давления на образце при фильтрации газонасыщенной жидкости предложена двухзонная модель (рис. 2). Предполагается, что на вход в пористый образец подается

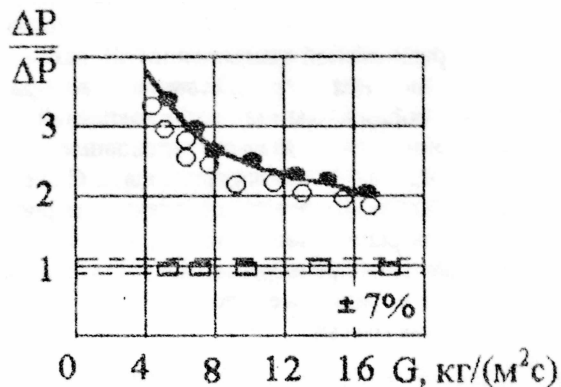


Рис. 1. Изменение величины $\Delta P / \Delta \bar{P}$ в зависимости от G при температуре 90°C для пористого образца ($\varepsilon = 0.3$; фракция порошка 50-63 мкм; $d_n = 16.0$ мкм; толщина образца 19.15 мм; коэффициент сопротивления $0.59 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$), $\square$ - деаэрированная вода; $\circ, \bullet$ - насыщенный воздух Майоров В.А., Васильев Л.Л., - расчет автора.

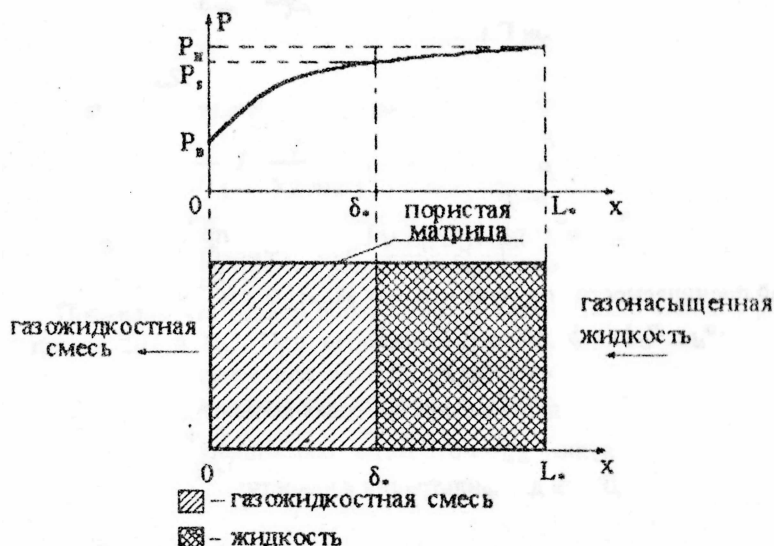


Рис.2. Схема фильтрации газонасыщенной жидкости в ПС.

газонасыщенная жидкость, в сечении δ , в результате падения давления достигается состояние равновесной насыщенности газом жидкости и начинается процесс газовыделения. В результате чего в пористой матрице область до выхода из образца занята газожидкостной смесью. При построении модели приняты следующие основные допущения и предположения: 1) газовыделение из жидкости в ПС происходит при равновесных условиях; 2) температура по длине пористого образца постоянна; 3) процесс фильтрации стационарный; 4) газ несжимаемый; 5) влиянием капиллярного давления пренебрегается.

Основные уравнения и граничные условия.

Уравнения сохранения массы:

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial t}(\rho_1 \epsilon C_1) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_1 \epsilon C_1 v_1) &= -I, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho_2 \epsilon C_2) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_2 \epsilon C_2 v_2) &= I.\end{aligned}\quad (5)$$

Уравнения импульсов для жидкой и газовой фаз:

$$m C_i v_i = - \frac{k K_i}{\mu_i} \frac{\partial P}{\partial x}.\quad (6)$$

Для связи между концентрацией растворенного газа в жидкости от давления принимается закон Генри:

$$g^z = G_s P.\quad (7)$$

Граничные условия для каждой из зон имеют вид:

$$\begin{aligned}x=0: & \quad P=P_s \\ x=\delta: & \quad P=P_s \\ x=L: & \quad P=P_s\end{aligned}\quad (8)$$

Исходя из системы уравнений (5)–(8) с учетом принятых допущений и граничных условий, а также выражений для коэффициентов относительной фазовой проницаемости получена искомая зависимость:

$$G = \frac{k(P_s - P_s)}{v_1 L_s} - \frac{k}{L_s v_1} \frac{(P_s - P_s)^2}{\rho_2 P_s} \rho_1 g_N^z.\quad (9)$$

В том случае, когда начальная массовая концентрация растворенного газа стремится к нулю $g_N^z \rightarrow 0$, тогда соотношение (9) переходит в классический закон Дарси для фильтрации жидкости:

$$G = \frac{k}{v_1} \frac{\Delta P}{L_s}.\quad (10)$$

Из соотношений (9) и (10) можно получить:

$$\frac{\Delta P}{\Delta P} = 1 - \frac{(P_s - P_s)^2}{G \rho_2 P_s L_s v_1} \rho_1 g_N^z k.\quad (11)$$

Из (11) следует, что с ростом расхода разница в перепадах давления между ΔP и ΔP^* выражается. Этот вывод подтверждается опытными данными Майорова В.А., Васильева Л.Л. (рис. 1). Объяснением этого результата может служить тот факт, что рост расхода связан с увеличением давления перед пористым образцом, поэтому в матрице увеличивается зона повышенного давления и при этом сокращается зона занятая газожидкостной смесью. В связи с этим нивелируется разница перепадов давлений на образце при фильтрации одного и того же расхода деаэрированной и насыщенной газом жидкости.

Соотношения (10) и (11) справедливы при выполнении неравенств:

$$P_g \gg P_s - \frac{\rho_2}{\rho_1 G_2}, \quad P_n - P_g \gg \frac{\sigma}{d_n} \quad (12)$$

В рамках решения проблем гидродинамики при фильтрации ДП в ПС получены экспериментальные (рис. 3) и теоретические результаты по распыливанию жидкости при помощи газожидкостной форсунки с пористым смесительным элементом. Получено выражение для перепада давления на газожидкостной форсунке с пористым смесительным элементом:

$$\Delta P = \frac{\dot{m}_2 v_2 L_{\text{вс}}}{\epsilon S k} \left[1 + \frac{v_1}{v_2} \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2} \right]. \quad (13)$$

При фильтрации только жидкости через пористый элемент:

$$\Delta P^* = \frac{\dot{m}_1 v_1 L_{\text{вс}}}{\epsilon S k}.$$

В результате деления (13) на последнее выражение

$$\frac{\Delta P}{\Delta P^*} = \frac{v_2}{v_1} \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} \left[1 + \frac{v_1}{v_2} \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2} \right]. \quad (14)$$

Сопоставление зависимости (14) с экспериментальными результатами, полученные при фильтрации смеси воздух-вода через сетчатый пористый образец, дано на рис. 4.

Показано, что размер образующихся капель тесно связан с режимом фильтрации ДП в ПС. При небольших перепадах давления на пористом смесительном элементе капли образуются в результате развития капиллярной неустойчивости на поверхности жидких струй, истекающих из пор матрицы (рис. 5). Характерный размер истекающей струи жидкости из поры связан с объемным газосодержанием:

$$1 - \varphi \sim \frac{\delta_c^2}{d_n^2}. \quad (15)$$

Выражение для длины волны на поверхности раздела фаз (рис. 5), возникающей за счет развития капиллярной неустойчивости и имеющей наибольший показатель роста, с точностью до постоянного множителя можно представить в виде:

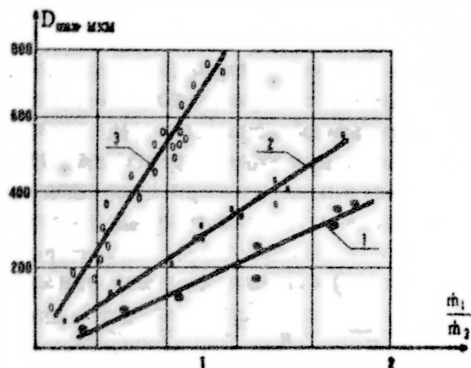


Рис. 3. Зависимость диаметра капель от относительного расхода воды и воздуха: 1 - $\Delta P_{\phi}=0.1$ МПа; 2 - $\Delta P_{\phi}=0.05$ МПа; 3 - $\Delta P_{\phi}=0.02$ МПа

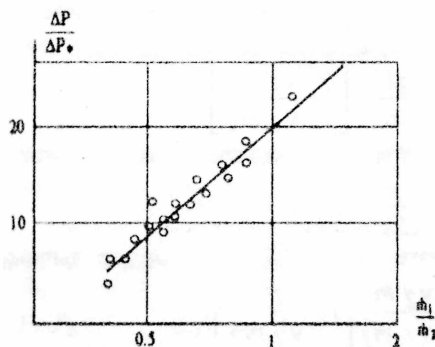


Рис. 4. Зависимость перепада давления ΔP на пористом образце при фильтрации газожидкостного потока от m_2/m_1 : - - расчет по формуле (14); $\circ$ - экспериментальные данные, воздух-вода.

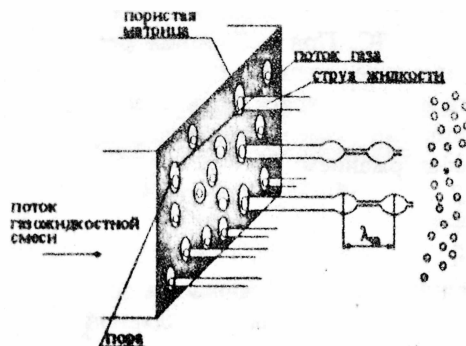


Рис. 5. Схема процесса истечения газожидкостного потока из пористой среды.

$$\lambda_m \sim \frac{\sigma}{\rho_2 u_2^2}. \quad (16)$$

Диаметр капли связан с длиной волны на поверхности жидкой струи соотношением:

$$\lambda_m \delta_c^2 \sim D^3. \quad (17)$$

Из соотношений (15)–(17) с учетом связи между объемным и расходным массовым газосодержанием, получено выражение для оценки размера капель:

$$D \sim \left[1 - \left(\frac{v_1 \dot{m}_1}{v_2 \dot{m}_2} + 1 \right)^{-1} \right]^{1/3} \frac{d_n^{2/3} \sigma^{1/3} \mu_2^{2/3} L_{вс}^{2/3} \varepsilon^{2/3}}{\rho_2^{1/3} k^{2/3} \Delta P^{2/3}}. \quad (18)$$

Соотношение (18) справедливо при небольших градиентах давления в пористой матрице $|\nabla P| \ll \sigma / d_n^2$. Если переписать данное неравенство через массовые расходы газа и жидкости

$$\frac{\dot{m}_2 v_2}{S k \varepsilon} \left[1 + \frac{v_1 \dot{m}_1}{v_2 \dot{m}_2} \right] \ll \frac{\sigma}{d_n^2}. \quad (19)$$

В том случае, если неравенство (19) не выполняется, то распад ДП на капли происходит непосредственно на капли в пористой матрице и соотношение становится неприменимым.

В третьей главе представлены экспериментальные и теоретические результаты по кипению жидкости в ПС при вынужденном течении. В ряде ранее известных работ предполагалось, что парообразование осуществляется на стефановской границе, что противоречит, например, экспериментальным результатам Rahli O., Topin F., Tadrist L. и др. В данной работе при построении модели процесса кипения жидкости при вынужденном течении в ПС предполагается конечность толщины зоны парообразования. Предложена модель, описывающая процесс кипения жидкости в ПС при вынужденной фильтрации, когда происходит выход парожидкостного потока на внешнюю поверхность пористого образца, при отсутствии в нем теплоподвода (рис. 6). При фильтрации недогретой жидкости в ПС в результате падения давления жидкость в сечении H достигает состояния насыщения и она вскипает. На выходе из пористого образца истекает парожидкостная смесь. Рассматривается случай, когда на вход в пористый образец поступает фиксированный расход жидкости $G = const$. В основе модели лежат следующие основные допущения и предположения: 1) парожидкостный поток при фильтрации в ПС находится в состоянии термодинамического равновесия; 2) процесс фильтрации стационарный; 3) распространением тепла за счет теплопроводности пренебрегается.

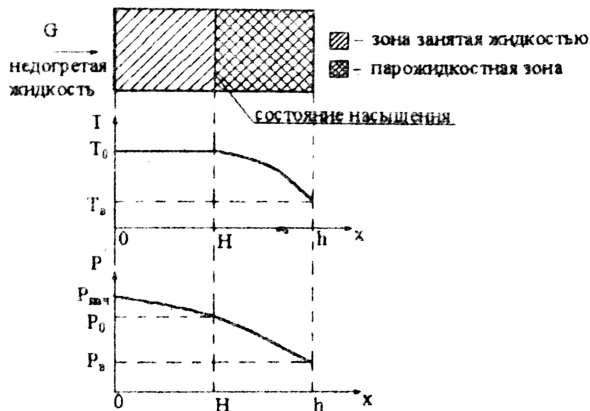


Рис. 6. Схема процесса фильтрации неогретой жидкости в пористой среде.

Для парожидкостной зоны с учетом закона Дарси в обобщенной форме можно записать:

$$G = \rho_1 u_1 + \rho_2 u_2 = -k \left(\frac{s}{v_1} + \frac{1-s}{v_2} \right) \frac{dP}{dx}. \quad (20)$$

Граничные условия для парожидкостной зоны:

$$x = H, \quad T = T_0, \quad x_n = 0, \quad (21)$$

$$x = h, \quad T = T_g. \quad (22)$$

С учетом граничного условия (21) закон сохранения энергии (3) можно представить в виде:

$$c_l T + L x_n = c_l T_0. \quad (23)$$

Из системы уравнений (1), (20-23) с учетом граничного условия (21) получено выражение для распределения температуры в зоне кипения:

$$\frac{G v_l (h-x)}{k L \rho_2} \left(1 + \frac{v_2 c_l T_0}{v_l L} \right) = \ln \left[\frac{1 + \frac{v_2 c_l (T_0 - T_g)}{v_l L}}{1 + \frac{v_2 c_l (T_0 - T)}{v_l L}} \right] + \ln \frac{T}{T_g}. \quad (24)$$

В результате подстановки граничного условия (22) в (24) можно получить соотношение для определения толщины зоны кипения

$$\frac{G v_l (h-H)}{k L \rho_2} \left(1 + \frac{v_2 c_l T_0}{v_l L} \right) = \ln \left[1 + \frac{v_2 c_l (T_0 - T_g)}{v_l L} \right] + \ln \frac{T_0}{T_g}. \quad (25)$$

Из (25) видно, что рост расхода и уменьшение коэффициента проницаемости пористой матрицы приводит к сокращению толщины зоны кипения.

С целью экспериментального исследования процесса фильтрации парожидкостной смеси в ПС при отсутствии внешнего теплоподвода была разработана и создана экспериментальная установка. Исследовался стационарный режим фильтрации. На вход в пористый образец попадает парожидкостная смесь по своим параметрам близкая к состоянию термодинамического равновесия. В ходе экспериментов производилось измерение давления и температуры перед пористым образцом и за ним. Результаты экспериментального исследования представлены на рис. 7. Из него видно, что при увеличении давления перед образцом изменение состояния парожидкостной смеси при фильтрации в ПС приближается к состоянию термодинамического равновесия, что подтверждает возможность использования закона Клапейрона - Клаузиуса для связи полей давления и температуры в зоне кипения.

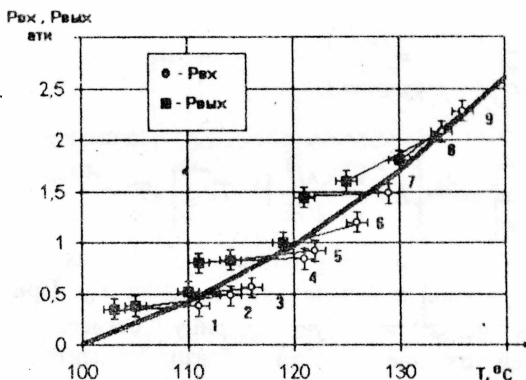


Рис. 7. Зависимость давления от температуры на входе и выходе пористого образца: сплошная линия - бинодаль для воды; светлые значки относятся к состоянию парожидкостного потока на входе в пористый образец, а темные на выходе.

В том случае, когда в пористой матрице осуществляется объемное тепловыделение, энтальпия парожидкостной смеси изменяется в направлении фильтрации в соответствии с (4). Аналогично предыдущей задаче, получены аналитические решения для распределения полей температуры и давления в зоне кипения.

Предполагается, что на вход в пористый образец с объемным тепловыделением мощностью $\dot{Q}$, подается недогретая жидкость с массовым расходом G , начальной температурой $T_{нач}$ и давлением на выходе из

образца P_g . В том случае, когда происходит выход парожидкостной зоны на внешнюю поверхность пористого образца, граничные условия примут вид:

$$\begin{aligned} x &= 0; \quad G = \text{const}; \quad T = T_{\text{нач}}, \\ x &= H; \quad x_n = 0, \\ x &= h; \quad T = T_g. \end{aligned} \quad (26)$$

С учетом одного из граничных условий (26) выражение (4) примет вид:

$$x_n = \frac{\dot{Q}(x-H)}{GL} + \frac{c_l(T_0-T)}{L}. \quad (27)$$

Используя вместо формулы (23) соотношение (27), при условии выполнения неравенств $c_l(T_0 - T_{\text{нач}})/L \ll 1$, $h \gg H$, получены соотношения:

$$T_0 = T_g \exp \left[\frac{Gv_l}{kL\rho_2} \left(h + \frac{v_2}{v_l} \frac{\dot{Q}h^2}{2GL} \right) \right], \quad (28)$$

и

$$H = \frac{c_l G}{\dot{Q}} \left\{ T_g \exp \left[\frac{Gv_l}{kL\rho_2} \left(h + \frac{v_2}{v_l} \frac{\dot{Q}h^2}{2GL} \right) \right] - T_{\text{нач}} \right\}. \quad (29)$$

Соотношение (28) связывает температуру на выходе из пористого образца T_g с температурой в начале зоны кипения T_0 . При уменьшении расхода жидкости через пористую матрицу, согласно (28) и (29), температура по всей толщине пористого образца стремится к температуре насыщения, соответствующей давлению на выходе из образца. Этот вывод подтверждается опытными данными Поляева В.М., Сухова А.В., полученные при фильтрации воды через пористый образец, в котором осуществлялось объемное тепловыделение за счет пропускания через него электрического тока.

При увеличении тепловой нагрузки в пористой матрице образуется зона осушения (рис. 8). При этом температура в конце зоны парообразования H оказывается неизвестной в отличие от предыдущей задачи. В этом случае для определения основных неизвестных параметров были получены распределения температуры и давления в каждой из зон и производилась процедура сращивания решений.

Граничные условия имеют вид:

$$\begin{aligned} x &= 0; \quad G = \text{const}; \quad T = T_0, \\ x &= \delta; \quad x_n = 0, \\ x &= H; \quad x_n = l, \end{aligned} \quad (30)$$

$$x = h; \quad P = P_h.$$

Используя те же основные уравнения и допущения, что и в предыдущей задаче, с учетом граничных условий, для определения неизвестных T_δ , T_h , δ , H и P_h получена система уравнений:

$$\delta = \frac{c_l(T_\delta - T_0)G}{\dot{Q}}, \quad \delta = H - \frac{GL}{\dot{Q}}, \quad T_h = T_\delta \exp\left(-\frac{G^2 v_2}{2k\rho_2 \dot{Q}}\right),$$

$$G = \frac{k(P_h - P_h)}{v_2(h - H)}, \quad T_h = T_* \ln^{-1}(P_h/P_h). \quad (31)$$

Из системы уравнений (31) следует, что при уменьшении расхода, при прочих фиксированных параметрах, разница температур пористой стенки на выходе и входе возрастает. Этот вывод подтверждается экспериментальными результатами Поляева В.М. и Сухова А.В., когда осуществлялось осушение внешней поверхности пористой матрицы.

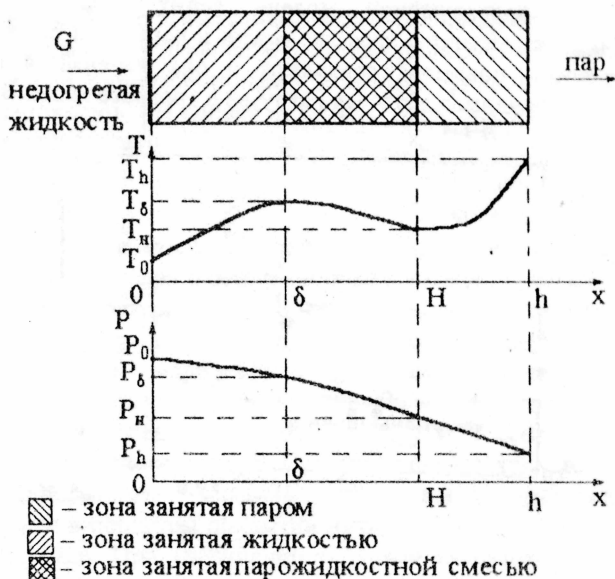


Рис. 8. Схема кипения жидкости в пористом образце при вынужденном течении с внутренними источниками тепла.

В четвертой главе рассматриваются задачи по кипению жидкости на поверхностях с пористыми покрытиями в условиях естественной конвекции. В рамках единого подхода разработаны модели, позволяющие объяснить

основные закономерности при кипении чистых компонентов и растворов на поверхностях с пористыми покрытиями при различной ориентации греющей поверхности относительно поля тяжести. Построенные модели применимы лишь для описания начальных участков кривых кипения, когда согласно экспериментальным данным Chien L.-H., Webb R.L. и др., основная часть подводимой тепловой нагрузки расходуется на фазовый переход.

Построена модель для описания явления гистерезиса "отклонения температуры", характерного для начального участка кривой кипения (рис. 9). Сущность этого явления заключается в том, что в законе теплообмена $q \sim \Delta T^n$, показатель степени n при росте тепловой нагрузки выше, чем при ее снижении. Это явление экспериментально наблюдалось для большого ряда жидкостей (вода, хладоны -113, 134a, 407c) и типов пористых покрытий в опытах Hsieh S.S., Weng C.J., Ayub Z.H., Bergles A.E., Малышенко С.П., Андрианов А.Б. и др.

В основе предложенной модели лежат следующие основные предположения: температуры пара, жидкости и пористого скелета в данном сечении пористого покрытия совпадают и она изменяется по толщине покрытия; вся подводимая тепловая нагрузка в процессе кипения идет

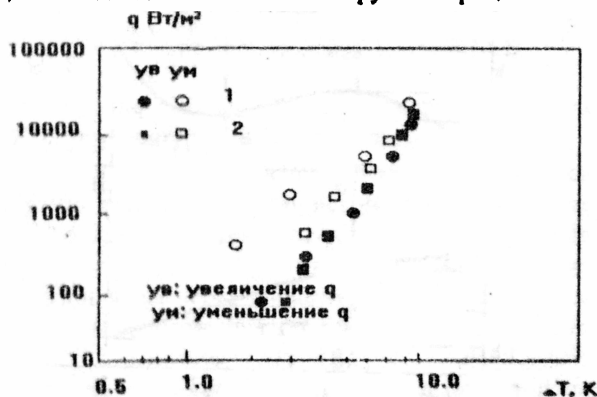


Рис. 9. Кривые кипения R-134a на медной поверхности с пористым покрытием из алюминия Hsieh S.S., Weng C.J.: 1 - диаметр трубки 19 мм, $h=50$ мкм, $s=0.0377$, $d_p=3$ мкм; 2 - диаметр трубки 19 мм, $h=300$ мкм, $s=0.026$, $d_p=5$ мкм.

только на фазовый переход; покрытие представляет собой пористую матрицу, так что для связи перепада давления и скорости истекающего пара можно использовать закон Дарси; рассматривается стационарный процесс кипения.

Перепад давления на пористом покрытии можно оценить исходя из закона Дарси:

$$\Delta P_2 \approx \frac{\mu_2 h q}{k K_2 L \rho_2} \quad (32)$$

Так, например, при кипении воды на поверхности с нихромовым покрытием с параметрами, ($\epsilon=0.3$, $k=8 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$, $h=0.8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$) при $q=2 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$ перепад давления на покрытии составляет $\Delta P_2 \approx 0.1 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Как показывают экспериментальные данные этой величине тепловой нагрузки соответствует значение температурного напора $\Delta T = 3^0 \text{ С}$. В соответствии с бинадалью для воды, при изменении температуры от 100^0 С до 103^0 С давление по отношению к атмосферному изменяется на величину $0.125 \cdot 10^5 \text{ Па}$. На основании данной численной оценки можно сделать вывод о том, что при кипении жидкости на поверхностях с пористыми покрытиями значение температурного напора определяется потерями давления при движении пара от греющей поверхности в основной объем жидкости. Используя допущение о термодинамической равновесности парожидкостной смеси, с учетом малости перепадов давления на пористом покрытии, участок бинадали можно аппроксимировать линейной функцией. В этом случае величина температурного напора связана с потерями давления при выходе пара из покрытия по закону Клапейрона – Клаузиуса:

$$\Delta T = \frac{T_n(\rho_1 - \rho_2)\Delta P_2}{\rho_1 \rho_2 L} \quad (33)$$

В связи с зависимостью величины температурного напора от потерь давления при выходе пара в основной объем жидкости, явление гистерезиса “отклонения температуры” можно объяснить тем, что при увеличении тепловой нагрузки происходит рост объемного паросодержания в пористом покрытии, которое определяется количеством активных центров парообразования на греющей поверхности. От паросодержания в покрытии зависит перепад давления по пару и в соответствии с (33) – величина температурного напора. При уменьшении тепловой нагрузки все ранее активированные впадины продолжают работать, поэтому паросодержание в пористом покрытии начинает слабо зависеть от величины тепловой нагрузки. При увеличении тепловой нагрузки паросодержание в покрытии невелико, вследствие чего покрытие частично заполненное жидкостью характеризуется низким коэффициентом относительной фазовой проницаемости, по сравнению со стадией уменьшения q . Поэтому при одном и том же значении q перепад давления по пару выше при росте тепловой нагрузки, чем при ее снижении, что в соответствии с формулой (33) приводит к неравенству ΔT (при росте q) $>$ ΔT (при уменьшении q) при одном и том же значении q . Исходя из соотношений (32), (33) с учетом зависимости

коэффициента относительной фазовой проницаемости от паросодержания $K_2 \approx \varphi$, для стадии роста q получен закон теплообмена

$$q = \Psi_1 \frac{L^4 k \rho_2^4 \rho_1 h}{\mu_2 \sigma^2 T_n^3 (\rho_1 - \rho_2) \varepsilon} \Delta T^3, \quad (34)$$

где эмпирический множитель $\Psi_1 = 1.1 \cdot 10^{-5}$.

С ростом тепловой нагрузки активизируется все большее количество впадин на греющей поверхности и при этом паросодержание в покрытии возрастает. Паросодержание ограничено неравенством $\varphi < 1$, поэтому на величину температурного напора, до значения которого возможен рост паросодержания в покрытии, накладывается ограничение

$$\frac{\Delta T h L \rho_2}{\sqrt{\varepsilon \sigma T_n}} < const_1, \quad (35)$$

где эмпирический множитель $const_1 = 480$.

При снижении тепловой нагрузки все ранее активированные впадины продолжают работать и паросодержание в покрытии может быть принятым постоянным, соответствующее достигнутому уровню при росте q . При снижении тепловой нагрузки закон теплообмена примет вид:

$$q = \Psi_2 \frac{k \rho_1 (\rho_2 L)^2}{\mu_2 h T_n (\rho_1 - \rho_2)} \Delta T, \quad (36)$$

где эмпирический множитель $\Psi_2 = 0.1$.

Согласно соотношениям (35) и (36), с ростом толщины пористого покрытия гистерезис "отклонения температуры" вырождается (угол раствора гистерезисной петли уменьшается). Этот вывод подтверждается опытными результатами (Hsieh S.S., Weng C.J.) (рис. 9). Этими же авторами экспериментально установлено, что при кипении на гладкой поверхности в условиях, аналогичных кипению на поверхностях с пористыми покрытиями, гистерезис "отклонения температуры" не был обнаружен. Этот факт может служить качественным подтверждением принятой в данной работе модели, согласно которой скопление пара в пористом покрытии и его влияние на пропускную способность пористой матрицы является основной причиной гистерезиса.

Согласно принятой модели существование гистерезиса связано с различным паросодержанием в покрытии при фиксированной тепловой нагрузке, соответствующей стадии роста и уменьшения q . Паросодержание в покрытии зависит от количества активных впадин греющей поверхности и поэтому изменение их плотности может оказывать влияние на существование гистерезиса. Этот вывод подтверждается экспериментальными данными (Hsieh S.S., Weng C.J.), так при переходе от хладагента – 407с к хладону – 134a гистерезис практически вырождался. Это связано с тем, что хладон – 407с

лучше проникает во впадины, чем хладон – 134a, что приводило к их дезактивации. В связи с дезактивацией активных впадин паросодержание в покрытии при росте q значительно меньше, чем при уменьшении q . В опытах (Yan Y.Y., Neve R.S. и др.) влияние на плотность активных впадин на греющей поверхности производилось путем воздействия электрического поля. Так при кипении хладона – 114 на поверхности со структурированными поверхностями типа Tefmexcel и Gewa при воздействии электрического поля гистерезис “отклонения температуры” вырождается. Этот экспериментальный результат можно с позиции предложенной модели объяснить тем, что в присутствии электрического поля облегчается активация центров парообразования, в результате чего уже при росте тепловой нагрузки в покрытии скапливается значительное количество пара и характер теплоотдачи не изменяется при смене направления тепловой нагрузки.

Соотношения (34) и (36) могут быть использованы для описания начального участка кривой кипения и при отсутствии гистерезиса. Для толстых покрытий в связи большим гидравлическим сопротивлением, оказываемый пар у выхода его из покрытия, уже при стадии роста q может произойти “запаривание” покрытия. Поэтому для толстых покрытий сразу после закипания может выполняться закон теплообмена (36). Этот вывод подтверждается опытными данными Ройзена Л.И., Рачицкого Д.Г. и др., полученные при кипении азота и хладона – 113. Ими было установлено, что при переходе к толстым покрытиям с толщиной более десяти размеров частиц характер зависимости закона теплообмена приближается к линейному $q \sim \Delta T$.

В рамках предложенной модели могут быть объяснены особенности по кипению жидкости на обращенной вниз поверхности с пористым покрытием (рис. 10). Рассматривается кипение жидкости на обращенной вниз поверхности с пористым покрытием в условиях естественной конвекции. В процессе кипения, образовавшиеся пузыри на внешней поверхности покрытия двигаются вдоль поверхности и, дойдя до края пластины, поднимаются в основном объеме жидкости (рис. 10). Принимаются следующие основные допущения и предположения: все характеристики являются осредненными величинами по всей поверхности теплообмена; температура пористого скелета, жидкости и пара в данном сечении покрытия совпадают и изменяются по толщине пористой матрицы.

При исследовании кипения на обращенной вверх поверхности с пористым покрытием предполагалось, что величина температурного напора, определяется перепадом давления по пару ΔP_2 на пористом покрытии. В случае кипения на обращенной вниз поверхности сопротивление движению пара оказывается не только со стороны пористого покрытия ΔP_2 , но и при

его движения вдоль поверхности $\Delta P_{тр}$. Суммарные потери давления можно оценить как

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_2 + \Delta P_{тр}. \quad (37)$$

На основе соотношения (37) можно рассматривать два предельных случая: во-первых, когда потери давления по пару со стороны пористого скелета значительно превосходят $\Delta P_{тр}$:

$$\Delta P_2 \gg \Delta P_{тр}. \quad (38)$$

При выполнении неравенства (38) основные закономерности теплоотдачи определяются процессами внутри пористого покрытия и не зависят от ориентации поверхности относительно поля тяжести. В этом предельном случае для расчета для расчета теплоотдачи на обращенной вниз поверхности можно использовать соотношение (34) или (36) в зависимости от знака неравенства (35). Эти выводы, например, подтверждаются экспериментальными данными Pasek A.D. (рис. 11) при кипении азота и результатами Chang J.Y., You S.M. при кипении FC-72.

В другом противоположном предельном случае, когда выполняется неравенство:

$$\Delta P_2 \ll \Delta P_{тр} \quad (39)$$

основные закономерности теплоотдачи при кипении на обращенной вниз поверхности с пористым покрытием будут уже определяться не процессами внутри покрытия. Для оценки потерь давления при движении пара вдоль греющей поверхности Грановским В.С. и др. предложено соотношение:

$$\Delta P_{тр} \sim \frac{q^{1/2} \rho_1^{1/4} g^{3/4} (\rho_1 - \rho_2)^{3/4} D_n^{3/4}}{L^{1/2} \rho_2^{1/2}}. \quad (40)$$

Используя соотношения (33) и (40) получим закон теплоотдачи, применимый при выполнении неравенства (39):

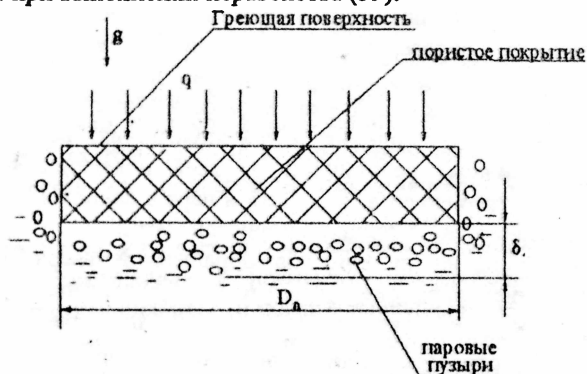


Рис. 10. Схема кипения жидкости на обращенной вниз поверхности с пористым покрытием.

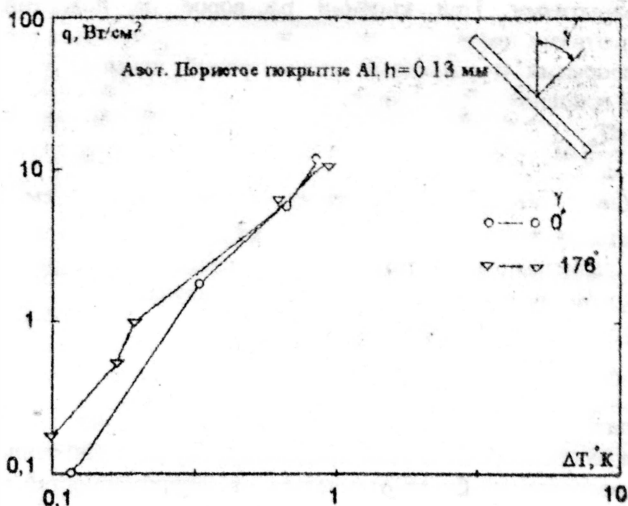


Рис. 11. Кривые кипения азота при атмосферном давлении на поверхности с пористым покрытием толщиной 0.13 мм, Pasek A.D.

$$q \sim \frac{\rho_1^{3/2} \rho_2^3 L^3}{T_n^2 (\rho_1 - \rho_2)^{7/2} g^{3/2} D_n^{3/2}} \Delta T^2. \quad (41)$$

Закон теплоотдачи (41) имеет место, когда для параметра

$$\beta = \frac{\Delta P_2}{\Delta P_{mp}} \sim \frac{\mu_2 h q^{1/2}}{k L^{1/2} \rho_2^{1/2} g^{3/4} (\rho_1 - \rho_2)^{3/4} D_n^{3/4}}$$

выполняется неравенство $\beta \ll 1$. В соответствии с данным неравенством, с ростом линейного размера греющей поверхности, при уменьшении коэффициента проницаемости покрытия и его толщины величина ΔP_2 уменьшается, а ΔP_{mp} — возрастает, поэтому для длинных поверхностей, обращенных вниз, с рыхлыми покрытиями необходимо использовать вместо формул (34), (36) — соотношение (41). Эти выводы подтверждаются экспериментальными результатами Jung D.S. и др. На основе данного анализа можно сделать вывод, что в тех случаях, когда необходимо, чтобы работа теплообменника в котором осуществляется кипение жидкости на поверхностях с пористыми покрытиями не зависела от ориентации греющей поверхности относительно поля тяжести, необходимо применять в нем поверхности с плотными покрытиями, иными словами должен выполняться критерий $\beta \gg 1$.

В рамках развитого подхода разработана модель, описывающая основные закономерности по кипению растворов на поверхностях с

пористыми покрытиями. При кипении растворов на поверхностях с пористыми покрытиями температурный напор будет определяться перепадом давления на покрытии и разностью концентраций примеси у греющей поверхности и в основном объеме жидкости:

$$\Delta T = \frac{dT_n}{dP} \Delta P + \frac{dT_n}{dC} \Delta C. \quad (42)$$

Производная dT_n/dC определяет зависимость температуры насыщения раствора при данном давлении от концентрации нелетучего компонента. В зависимости от того какой из слагаемых в правой части преобладает, можно рассматривать два предельных случая.

В том случае, когда выполняется неравенство

$$\frac{dT_n}{dP} \Delta P \gg \frac{dT_n}{dC} \Delta C \quad (43)$$

влиянием скопления примеси у греющей поверхности на температуру насыщения можно пренебречь. В этом предельном случае закон теплоотдачи при кипении растворов не будет отличаться от закономерностей кипения чистого компонента (34), (36). При кипении растворов теплофизические параметры, входящие в (34), (36) необходимо выбирать с учетом концентрации примеси.

В противоположном предельном случае, когда выполняется неравенство

$$\frac{dT_n}{dP} \Delta P \ll \frac{dT_n}{dC} \Delta C \quad (44)$$

значение температурного напора определяется в основном процессом обогащения примесью области у греющей стенки.

При выполнении неравенства (44) величина температурного напора связана с ростом концентрации примеси у поверхности соотношением:

$$\Delta T = \frac{dT_n}{dC} \Delta C. \quad (45)$$

Предполагается, что рост концентрации нелетучей примеси у греющей поверхности определяется двумя процессами. С одной стороны, в процессе парообразования нелетучий компонент скапливается у греющей поверхности. С другой стороны, за счет разности концентраций примеси у греющей поверхности и в основном объеме жидкости возникает диффузионный поток, который приводит к ее снижению.

С ростом интенсивности подведенной тепловой нагрузки возрастает скорость парообразования, следовательно, предельное соотношение (45) будет применимо при больших тепловых нагрузках. Для случая, когда выполняется равенство (45) получен предельный закон теплообмена:

$$q \sim \frac{L \rho_1^2 D \epsilon}{\chi h \rho_2 (dT_n / dC)^2} \Delta T^2. \quad (46)$$

Неравенство (43) можно переписать в виде:

$$q \ll q_* \approx \frac{\left(\frac{dT_n}{dC}\right)^2 \rho_2^5 L^3 k^2 \chi}{T_n^2 (\rho_1 - \rho_2)^2 \mu_2^2 h D \epsilon}. \quad (47)$$

Соотношение (46) применимо при выполнении неравенства $q > q_*$.

Полученные теоретические результаты подтверждаются экспериментальными данными (Memory S.B. и др.) по кипению раствора минерального масла в хладоне -114 (рис. 12). Так уже при концентрации масла 3% на кривой кипения можно выделить два характерных участка. При малых значениях температурного напора, согласно экспериментам $q \sim \Delta T^{2.5}$, а при больших значениях - $q \sim \Delta T^{1.2}$. Эти экспериментальные результаты согласуются с выводами теории. Так, согласно неравенству (47), при малых значениях теплового потока, кривая кипения описывается согласно (34) зависимостью $q \sim \Delta T^3$ (для рыхлых и тонкопористых покрытий), а при больших значениях теплового потока, когда выполняется неравенство $q > q_*$, согласно (46) - $q \sim \Delta T^2$. Как следует из экспериментальных результатов этих же авторов при кипении чистого компонента во всем рассматриваемом диапазоне изменения теплового потока существует лишь

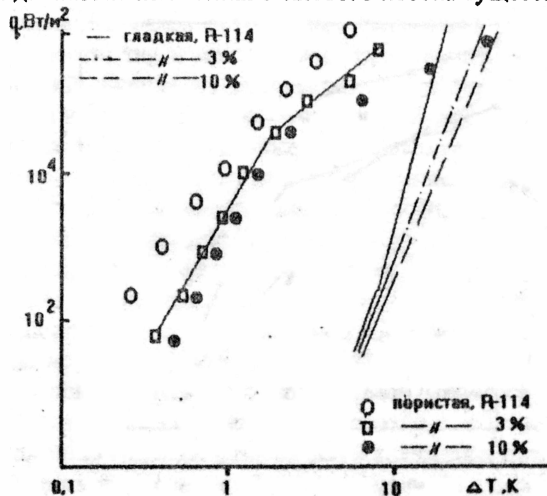


Рис. 12. Кривые кипения для R-114 и раствора R-114 с маслом на пористой поверхности, Memory S.B., и др.

один участок кривой кипения, соответствующий зависимости (34), что связано с отсутствием процесса скопления нелетучей примеси у греющей поверхности.

При исследовании процесса кипения жидкости на поверхностях с пористыми покрытиями одной из важных задач является определение условий отрыва парового пузыря при его росте на внешней поверхности покрытия. Авторами (Chien L.-H., Webb R.L.) экспериментально установлена зависимость отрывного диаметра пузыря от величины подводимой тепловой нагрузки (рис. 13).

Для обоснования подобных результатов предложена модель для определения условий отрыва пузыря. При этом за момент отрыва пузыря принимается потеря устойчивости межфазной границы фаз. Реальная сферическая форма пузыря заменяется цилиндрической поверхностью. Предполагая, что отрывной диаметр пропорционален наименьшей длине неустойчивой волны на границе раздела фаз, получено соотношение:

$$d_b = \text{const} \frac{d_p}{\sqrt{\frac{4d_b^6 f^2 \rho_2}{9\sigma d_p^3} + 1}}, \quad (48)$$

где $\text{const}=4$.

Сопоставление теории и эксперимента дано на рис. 14. Зависимость (48) в отличие от соотношений, полученных при квазистатическом подходе,

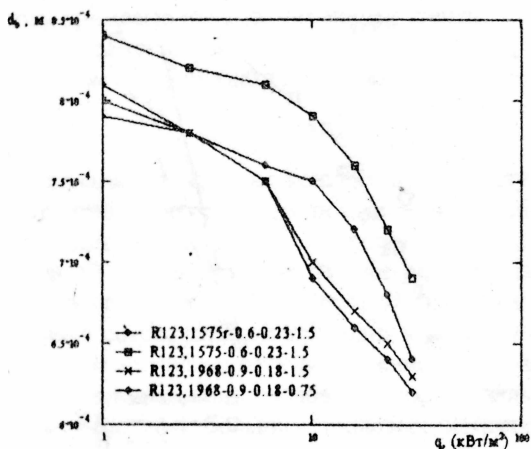


Рис. 13. Зависимость отрывного диаметра пузыря d_b от тепловой нагрузки, Chien L.-H., Webb R.L..

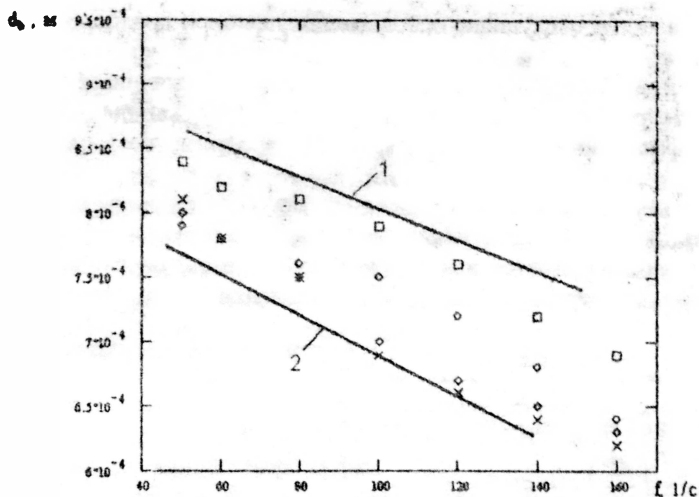


Рис. 14. Сопоставление экспериментальных данных Chien L.-H., Webb R.L. с расчетной зависимостью (48): 1 – $d_p=0.23$ мм; 2 – $d_p=0.18$.

позволяет учесть влияние скорости истекающего пара в пузырь на величину отрывного диаметра.

В пятой главе исследуется воздействие испарения жидкости из КРФ на его работоспособность. Запуск и работа жидкостных ракетных двигательных установок требует гарантированного забора жидких компонентов из топливных баков без газовых включений как в условиях практической невесомости, так и при наличии переменных по величине и направлению ускорений. Одним из перспективных технических решений задачи отбора топлива из бака без газовых включений является применение капиллярных заборных устройств, которые при сравнительно малой сухой массе в наиболее полной мере отвечают современным требованиям по возможности многоразового применения, долговечности, при использовании агрессивных и криогенных компонентов.

При функционировании фазоразделителя в баках с криогенными компонентами топлива на режимах выдачи и хранения могут возникать ситуации, когда существенное воздействие на работоспособность системы оказывают процессы испарения. В работе построена модель, позволяющая определять КУС фазоразделителя при воздействии процесса испарения. Целью анализа являлось определение условий, соответствующих неподвижному положению границы раздела фаз в капилляре, при испарении жидкости (рис. 15). Часть капилляра от 0 до x_f заполнена газом, а от x_f до L_k – жидкостью. Капилляр соединяет емкости бака, занятые газом и

жидкостью. Приняты следующие основные допущения и предположения: 1) предполагается, что движение фаз происходит достаточно медленно, так, что инерционными силами можно пренебречь; 2) жидкость смачивает капилляр; 3) поверхность раздела достаточно удалена от концов капилляра, так что концевыми эффектами пренебрегается; 4) молекулярные веса пара и газа равны.

Поскольку толщина зоны мениска по порядку величины совпадает с радиусом капилляра, следовательно, она мала по сравнению с длиной капилляра и рассматривается как плоская поверхность, перпендикулярная оси капилляра, на которой распределение давления вдоль оси капилляра терпит скачок:

$$P_{cm} - P_l = \Delta P_\sigma = \frac{2\sigma \cos \theta}{a}. \quad (49)$$

Для средней скорости каждой фазы можно записать:

$$u_i = -\frac{a^2}{8\mu_i} \left(\frac{dP}{dx} \right)_i, \quad i = cm, l \quad (50)$$

Граничные условия:

$$x = 0, \quad P = P(0); \quad x = x_f - 0, \quad P = P_{cm}(x_f);$$

$$x = x_f + 0; \quad P = P_{ж}(x_f); \quad P_{cm}(x_f) - P_l(x_f) = \Delta P_\sigma; \quad x = L_k, \quad P = P(L_k).$$

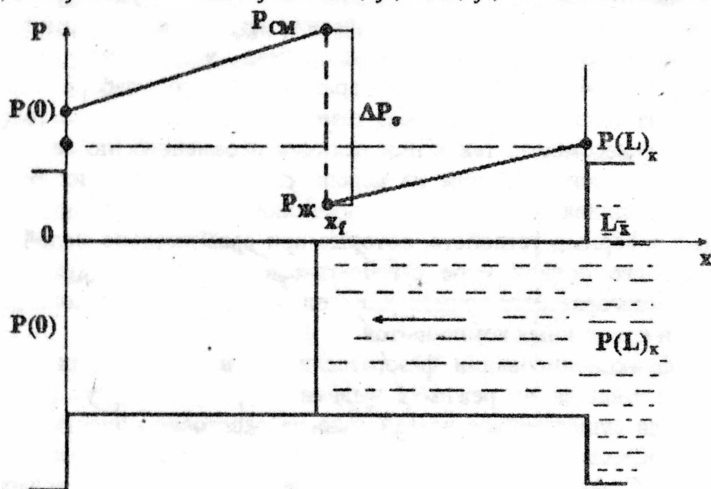


Рис. 14. Распределение давления по длине капилляра.

В силу неподвижности границы раздела фаз установившиеся плотности потоков массы пара и газа в капилляре

$$M_n = D \frac{d\rho_n}{dx} + \rho_n \frac{a^2}{8\mu_{cm}} \frac{dP}{dx}, \quad (51)$$

$$M_z = D \frac{d\rho_z}{dx} + \rho_z \frac{a^2}{8\mu_{cm}} \frac{dP}{dx} = 0. \quad (52)$$

Соотношение (52) учитывает тот факт, что в силу неподвижности границы раздела фаз массовый поток газа равен нулю.

В результате интегрирования (50) по длине капилляра с учетом граничных условий, величины скачка давления (49) и выражений (51), (52), получен критерий соответствующий неподвижности границы раздела фаз:

$$\Delta P = \Delta P_\sigma - \frac{8\rho_{cm} D v_{cm}}{a^2} \ln \frac{P - P_n(0)}{P - P_{нас}}. \quad (53)$$

Соотношение (53) задает значение перепада давления между емкостями бака, занятых газом и жидкостью, соответствующее неподвижности границы раздела фаз.

В том случае, когда испарение отсутствует, мениск в капилляре неподвижен при выполнении условия $\Delta P = \Delta P_\sigma$. В случае воздействия испарения для неподвижности мениска перепад давления в капилляре должен быть уменьшен на величину, зависящую от скорости испарения. На рис. 16 приводятся результаты сопоставления экспериментальных данных Paynter H.L., Page R.G. с зависимостью (53). При малых температурах величина КУС сетки хорошо описывается соотношением $\Delta P = \Delta P_\sigma$ и



Рис. 16. Влияние температуры сетчатого фазоразделителя на его капиллярную удерживающую способность: o - экспериментальные данные, Paynter H.L., Page R.G..

влияние температуры проявляется за счет зависимости $\sigma(T)$, а при росте температуры необходимо учитывать влияние испарения.

В шестой главе анализируется теплогидравлическая устойчивость двух последовательно расположенных теплообменников-испарителей.

В ряде технических устройств, например системах терморегулирования больших космических аппаратов многочисленные (десятки и сотни единиц) испарительные теплообменники объединены трубопроводами в сети, которые имеют сложную параллельно-последовательную структуру. В связи с этим, возникает важная задача обеспечения устойчивости таких систем. Для анализа устойчивости работы реакторов с фазовым переходом, в рамках одномерной модели, в настоящее время используется два подхода, один из которых основан на численном интегрировании нелинейной системы уравнений (временной анализ), а другой - на частотном анализе (линейная модель). Техника анализа в конечных разностях устойчивой работы теплообменников с фазовыми переходами требует больших затрат машинного времени, поскольку ввиду отсутствия аналитического решения для построения области устойчивости необходим детальный перебор вариантов решения. Кроме того, возникают трудности с разделением действительной физической неустойчивости и неустойчивости численного решения. В данной работе в рамках линейной

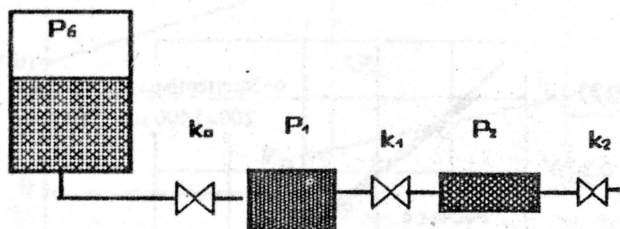


Рис. 17. Гидравлическая схема двух последовательно расположенных реакторов.

модели исследовалась теплогидравлическая устойчивость системы: бак с двумя последовательно расположенными теплообменниками (рис. 17), в которых осуществляется фазовый переход охладителя. В основе принятой модели лежат следующие основные допущения и предположения: в реакторах скорости фаз равны; течение одномерное; перепад давления по длине реактора отсутствует; температура постоянна. С учетом этих предположений нестационарная модель реактора имеет следующий вид:

$$\frac{\partial p_c}{\partial t} + \frac{\partial G}{\partial x} = 0, \quad 0 \leq x \leq L_p, \quad t \geq 0, \quad (54)$$

$$\rho_c \frac{\partial x_n}{\partial t} + G \frac{\partial x_n}{\partial x} = W, \quad (55)$$

$$\frac{1}{\rho_c} = \frac{x_n}{\rho_2} + \frac{1-x_n}{\rho_1}, \quad P = \rho_2 R_o T, \quad \frac{\partial P}{\partial x} = 0. \quad (56)$$

Краевые условия имеют вид:

$$P_0 - P_{\{1\}} = k_0 G_0, \quad P_1 - P_{\{2\}} = k_1 G_1, \quad P_{\{2\}} = k_2 G_2, \quad G_{\{1\}L} = G_{\{2\}0} \quad (57)$$

Алгоритм исследования устойчивости такой системы состоит в следующем. Сначала уравнения сохранения линеаризуются вблизи стационарных профилей. Полученные дифференциальные уравнения преобразуются по методу Фурье и формулируется спектральная задача, анализ которой позволяет определить область устойчивости работы реакторов. Условие неустойчивости примет вид:

$$F(n_{\{1\}}, n_{\{2\}}, h_{\{1\}}, h_{\{2\}}, \frac{W_{\{1\}s}}{W_{\{2\}s}}, \frac{T_{\{1\}}}{T_{\{2\}}}) > 0, \\ F = -n_{\{1\}} \frac{(h_{\{2\}} + 1)^2}{h_{\{2\}}} + \frac{W_{\{1\}s}}{W_{\{2\}s}} \frac{T_{\{1\}}}{T_{\{2\}}} n_{\{1\}} [(1 - \varepsilon_{\{2\}})(n_{\{2\}} - 1) - 1] + \\ + (h_{\{2\}} + 1)(1 - \varepsilon_{\{1\}})(n_{\{1\}} - 1) - \frac{(h_{\{2\}} + 1)^2}{h_{\{2\}}} \frac{\varepsilon_{\{1\}} n_{\{2\}}}{h_{\{1\}}}. \quad (58)$$

На основе критерия устойчивости (58) можно выработать ряд практических рекомендаций, способствующих повышению устойчивости системы. В частности рост температуры и интенсивности паропроизводства во втором реакторе приводит к повышению устойчивости системы, если выполняется система неравенств:

$$\begin{cases} n_{\{2\}} > \frac{1}{1 - \varepsilon_{\{2\}}} + 1, \\ n_{\{1\}} \frac{(h_{\{2\}} + 1)^2}{h_{\{2\}}} + \frac{(h_{\{2\}} + 1)^2 \varepsilon_{\{1\}} n_{\{2\}}}{h_{\{2\}} h_{\{1\}}} > (h_{\{2\}} + 1)(1 - \varepsilon_{\{1\}})(n_{\{1\}} - 1) \end{cases} \quad (59)$$

При заданной глубине фазового перехода с точки зрения устойчивости системы выгоднее применять два последовательно расположенных реактора, разделенных гидравлическим сопротивлением, чем одиночный с той же глубиной фазового перехода.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. ВЫВОДЫ

1. Решена задача о фильтрации газонасыщенной жидкости в пористой среде, когда в процессе фильтрации происходит газовыделение. Получена зависимость расхода от перепада давления на пористом образце при фильтрации газонасыщенной жидкости, сопровождаемой газовыделением. Данная зависимость позволяет учесть влияние теплофизических свойств жидкости и газа, характеристики пористой матрицы и концентрацию растворенного газа в жидкости на гидравлические характеристики. Показано, что рост концентрации растворенного газа в жидкости приводит к уменьшению расхода смеси через пористый образец при прочих равных условиях.

2. Проведено экспериментальное и теоретическое исследование работы газожидкостной форсунки с пористым смесительным элементом по распылу смеси воздух-вода. На основе гидравлической модели определены значения потерь давления при фильтрации газожидкостного потока в пористой среде. Разработана модель для оценки диаметра капель, образующихся в процессе распыла. Показано, что размер капель в основном определяется режимом фильтрации двухфазного потока в ПС и диаметром пор $D \sim d_n^{2/3}$.

3. Теоретически и экспериментально исследована задача по вынужденной фильтрации парожидкостного потока в ПС при отсутствии в нем теплоподвода. Экспериментально доказана гипотеза о термодинамической равновесности процесса кипения жидкости в ПС при вынужденной фильтрации. Показано, что уменьшение коэффициента проницаемости пористой матрицы приводит к сокращению зоны кипения, при фиксированном расходе жидкости, которая в пределе переходит в стефановскую границу.

4. Разработана модель кипения жидкости в ПС с объемным тепловыделением при вынужденном течении. Получены зависимости по распределению температуры и давления по толщине пористого образца, которые позволяют учесть влияние основных теплофизических параметров и структурных характеристик пористой матрицы.

5. Предложена модель по кипению жидкости на поверхностях с пористыми покрытиями в условиях естественной конвекции. На основе гипотезы о зависимости температурного напора от перепада давления при выходе пара из покрытия, получены расчетные соотношения для

коэффициентов теплоотдачи. Теоретически показано, что для тонкопористых, покрытий $q \sim \Delta T^3$, а для плотных покрытий - $q \sim \Delta T$. Получен критерий, разграничивающий эти два режима кипения. На основе разработанной модели описано явление гистерезиса "отклонения температуры", характерного для начального участка кривой кипения. Показано, что явление гистерезиса связано с различием гидравлических характеристик пористого покрытия, частично заполненного жидкостью при росте и уменьшении тепловой нагрузки в процессе кипения.

6. Предложена модель для описания закономерностей теплоотдачи при кипении жидкости на обращенных вниз поверхностях с пористыми покрытиями. Показано, что при кипении на поверхностях с плотными пористыми покрытиями закономерности теплоотдачи на обращенной вверх и вниз поверхностях совпадают. Получен критерий, разграничивающий два предельных режима кипения.

7. Предложена модель по кипению растворов на поверхностях с пористыми покрытиями. В зависимости от степени концентрации нелетучей примеси у греющей поверхности показано существование двух предельных режимов кипения. Получен критерий, разграничивающий эти режимы кипения. В одном из них величина температурного напора определяется гидравлической характеристикой пористого покрытия, а в другом - процессом скопления нелетучей примеси у греющей поверхности.

8. Разработана модель для определения условий отрыва пузыря, при кипении на поверхностях с пористыми покрытиями. Показано, что условие отрыва пузыря обусловлено возможностью развития неустойчивости на поверхности границы раздела жидкость - пар.

9. Исследована проблема испарения жидкости из сетчатых фазоразделителей КЗУ. Определены условия работоспособности КРФ с учетом процессов испарения.

10. Проанализирована теплогидравлическая устойчивость двух последовательно расположенных теплообменников-испарителей с фазовым переходом. Выявлено влияние основных режимных и конструктивных параметров на устойчивость такой системы.

12. Полученные в работе экспериментальные данные, теоретические результаты используются при проектировании газожидкостных форсунок с пористыми элементами, систем транспирационного охлаждения и теплообменники в - испарителей с КПИ.

Основное содержание диссертации отражено в 34 публикациях, в том числе следующих:

1. Поляев В.М., Кичатов Б.В. Обобщенное уравнение Рэлея - Ламба для сферического пузыря в пористой среде // Изв. РАН. Энергетика.- 1996. -N4.- С.155-159.

2. Поляев В.М., Кичатов Б.В. Обобщенное уравнение Рэлея - Ламба для парового пузыря в пористой среде // Процессы теплообмена в энергомашиностроении: Межвузовский сборник.- Воронеж: ВГТУ, 1996. - С.5.

3. Кичатов Б.В., Поляев В.М. Турбулентный теплообмен на проницаемой поверхности в области сверхкритических вдувов газа // Доклады Академии Наук. - 1997. - Т.356, N5. - С.630-633.

4. Поляев В.М., Кичатов Б.В., Багров В.В. Модель кипения жидкости на пористой поверхности // Теплофизика высоких температур.- 1997.- Т.35, N3. - С.500-504.

5. Boyko I.V., Kichatov B.V. Tho-phase flow with phase transitions instability// Physics of Heat Transfer in Boiling and Condensation: Proc. of the Int. Shool-Seminar of Young Scientists and Specialists.- Moscow, 1997.- P.137-138.

6. Поляев В.М., Кичатов Б.В., Любимов В.Э. О величине начального перегрева жидкости при закипании на пористой поверхности // Инженерно-физический журнал.- 1998.- Т.71, N1.- С.173-175.

7. Багров В.В., Кичатов Б.В., Поляев В.М. Использование пористых покрытий с целью минимизации температурного напора начала кипения в теплообменниках - испарителях // Передовые технологии на пороге XXI века: Тез. докл. Междунар. конф. -Москва, 1998.- С.298-300.

8. Кичатов Б.В. Распространение стационарных возмущений в газожидкостной смеси, находящейся в пористой среде // Теплоэнергетика: Межвузовский сборник.- Воронеж: ВГТУ, 1998. -С.85-91.

9. Дисперсный состав капель при истечении перегретой струи жидкости/ В.М. Поляев, А.А. Щербаков, Б.В. Кичатов и др. //Теплоэнергетика.- 1997.- N11.- С.66-68.

10. Поляев В.М., Кичатов Б.В., Бойко И.В. Исследование кавитирующей струи жидкости // Изв. РАН. Энергетика.- 1998. -N4. -С.169-175.

11. Поляев В.М., Кичатов Б.В., Бойко И.В. Истечение перегретой струи воды в атмосферу //Теплофизика высоких температур.- 1998.- Т.36, N1. - С.102-105.

12. Поляев В.М., Кичатов Б.В. Структура зоны кипения при фильтрации жидкости в пористой среде // Изв. РАН. Энергетика. -1998. -N5. - С.108-112.

13. Поляев В.М., Кичатов Б.В. Механизм возникновения колебаний при развитии режиме кипения жидкости на поверхностях с пористыми покрытиями // Изв. вузов. Машиностроение. -1998.- N10-12.- С.61-68.

14. Кичатов Б.В. Переходные процессы при кипении жидкости на пористой поверхности // Теплоэнергетика: Межвузовский сборник.-Воронеж ВГТУ, 1998.- С.135-140.

15. Кичатов Б.В., Онищенко Д.О. О характерном расстоянии между центрами выхода пара при развитом режиме кипения на поверхностях с пористыми покрытиями // Тр. 2-й РНКТ. -М.,1998. -Т8.- С.75-76.
16. Кичатов Б.В., Лихоконь С.А. Кипение жидкости на поверхностях с пористыми покрытиями при высоких значениях температурного напора // Тр. 2-й РНКТ. -М.,1998. -Т8.- С.73-74.
17. Кичатов Б.В., Коршунов А.В. Температурный напор, соответствующий началу кипения на поверхностях с пористыми покрытиями // Тр. 2-й РНКТ.- М.,1998. -Т8.- С.69-70.
18. Поляев В.М., Кичатов Б.В. Кипение жидкости на поверхностях с пористыми покрытиями с каналами для выхода пара // Фундаментальные проблемы механики и теплообмена: Тез. докл. Международной научной конференции по ракетно-космической технике.- Москва, 1998. -С.110.
19. Кичатов Б.В., Недосекин Р.В. Модель кипения жидкости на поверхностях с пористыми покрытиями // Тр. 2-й РНКТ.- М.,1998.- Т8. -С.73-74.
20. Кичатов Б.В. Транспирационный датчик для измерения лучистых тепловых потоков // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение.- 1998.- N4. - С.73-77.
21. Поляев В.М., Кичатов Б.В. Транспирационный датчик для измерения лучистых тепловых потоков // Ракетно-космические двигательные установки: Тез. докл. Российской межвузовской и межотраслевой научно-технической конференции.- Москва, 1998. -С.44.
22. Поляев В.М., Кичатов Б.В. Фильтрация газонасыщенной жидкости через пористые элементы ЖРД // Ракетно-космические двигательные установки: Тез. докл. Российской межвузовской и межотраслевой научно-технической конференции.- Москва, 1998. -С.32.
23. Герасимович В.П., Кичатов Б.В. Распыл жидкости при помощи центробежной форсунки с пористым вкладышем // Проблемы газодинамики и теплообмена в энерг. установках: Тр. 12-й шк.-сем..-М.,1999.-С.142-145.
24. Поляев В.М., Кичатов Б.В. Проблемы испарения в капиллярных разделителях фаз/ Теплопер. процессов горения и охрана окружающей среды: Тез. докл. Всероссийской научно-технической конференции.- Рыбинск, 1999.-С.45.
25. Поляев В.М., Кичатов Б.В. Кризис кипения на поверхностях с пористыми покрытиями в условиях естественной конвекции// Изв. вузов. Машиностроение. -1999. -N1-2.- С.40-45.
26. Кичатов Б.В. Истечение перегретой жидкости через струйную форсунку // Проблемы газодинамики и теплообмена в энерг. установках: Тр. 12-й шк.-сем..-М.-1999.-С.159-161.
27. Елаев А.Б., Кичатов Б.В., Коршунов А.В. Экспериментальное исследование истечения парожидкостной смеси через пористый образец

// Проблемы газодинамики и теплообмена в энерг. установках: Тр. 12-й шк.-сем.-М.-1999.-С.227-228.

28. Поляев В.М., Кичатов Б.В. Кипение жидкости при фильтрации в пористой среде // Теплофизика высоких температур. -1999.- Т.37, N3 .- С.434-437.

29. Поляев В.М., Кичатов Б.В. Структура зоны кипения при фильтрации химически реагирующего охладителя в пористой среде //Теор. основы хим. технологии.-1999. -Т.33, N2.-С.140-143.

30. Поляев В.М., Кичатов Б.В. Кипение жидкости на поверхностях с пористыми покрытиями // Теплоэнергетика.- 1999. -N3.- С.72-76.

31. Поляев В.М., Кичатов Б.В. Гистерезисные явления при кипении на поверхностях с пористыми покрытиями // Изв. вузов. Машиностроение. - 1999. N2-4.- С.50-55.

32. Поляев В.М., Кичатов Б.В. Влияние ориентации поверхности с пористым покрытием на закономерности теплоотдачи при кипении растворов//Вестник ВГТУ. Сер. Энергетика.-1999.-N1.-С.44-51.

33. Поляев В.М., Кичатов Б.В. Работоспособность капиллярного разделителя фаз с учетом испарения//Фундаментальные исследования в технических университетах: Материалы 3-й РНКТ.- СПб.,1999.-С.74.

34. Поляев В.М., Кичатов Б.В. Анализ устойчивости двух последовательно расположенных реакторов с фазовыми переходами // Теплофизика высоких температур.- 1999.-Т.37, N5.-С.844-847.