

М 308657

Министерство Высшего и Среднего Специального Образования
СССР

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

На правах рукописи

КОРНЕЕВ СЕРГЕЙ ДМИТРИЕВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА
ПРИ КИПЕНИИ В ЦЕЛЕВЫХ КАНАЛАХ В УСЛОВИЯХ
МОДЕЛИРОВАНИЯ ОСЛАБЛЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

(05.14.05 - Теоретические основы
теплотехники)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва

1977

Министерство Высшего и Среднего Специального Образования
СССР

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

На правах рукописи

КОРНЕЕВ СЕРГЕЙ ДМИТРИЕВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА
ПРИ КИПЕНИИ В ЩЕЛЕВЫХ КАНАЛАХ В УСЛОВИЯХ
МОДЕЛИРОВАНИЯ ОСЛАБЛЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

(05.14.05 - Теоретические основы
теплотехники)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва

1977

17308657

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1308657

Корнеев С. Д. Исследование

Работа выполнена в Московском высшем техническом училище
им. Баумана

Научные руководители: доктор технических наук
профессор А.И.Леонтьев
кандидат технических наук
доцент Б.М.Миронов

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профес-
сор
Кириченко Ю.А. (ФТИИТ АН УССР)
кандидат технических наук
доцент Ганчев Б.Г. (МВТУ)

Ведущее предприятие: НПО КРИОГЕНМАШ (г. Балашиха)

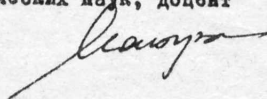
Защита состоится "31" октября 1977 г.
на заседании специализированного Совета шифр К33/5 "Тепло-
вые машины и теоретические основы теплотехники" при МВТУ
им.Баумана по адресу: Москва, Лефортовский наб., д. I,
ф-т "Энергомашиностроение".

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ
им. Н.Э.Баумана

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заве-
ренные печатью, просим направлять по адресу: 107005, Москва,
2-я Бауманская ул., :5, Ученому Секретарю.

Автореферат разослан "22" сентября 1977 г.

Ученый Секретарь Совета
кандидат технических наук, доцент



Э.А.Манушин

Л-75803. Подп. и печ. 27.06.77г. Объем 1п.л. Зак. № 1208
Тип. МВТУ. Тир. 100.

УНДА
ИНАЯ

МВТУ
им. Н.Э.Баумана
БИБЛИОТЕКА

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Процессы, позволяющие интенсифицировать тепломассообмен, находят все более широкое применение в инженерной практике и представляют большой интерес при конструировании и расчете энерготехнологических агрегатов, а также установок специального назначения, работающих в условиях ослабленной гравитации.

Особое значение в условиях действия ослабленных полей силы тяжести приобретают новые методы организации кипения жидкости в щелевых каналах, эффективные диаметры которых соизмеримы с отрывным диаметром парового пузыря. Подобные конструкции создают специфические условия теплообмена, не позволяющие использовать теоретические результаты, полученные для кипения в большом объеме. Изучение процессов теплообмена и гидродинамики в условиях ослабленной гравитации и в состоянии невесомости имеет значительный практический и теоретический интерес с широким кругом приложений. Искусственное устранение или ослабление массовых сил во многих случаях позволяет изолировать изучаемое явление, что дает возможность исследовать его в "чистом" виде. Несмотря на большие успехи, достигнутые в этом направлении, до сих пор не существует надежных методов таких расчетов, учитывающих, например, поведение паровой фазы на различных стадиях ее развития, с определением паросодержания, базируясь на корректной физической модели процесса.

Цель работы. Целью работы является изучение гидродинамики и теплообмена при кипении жидкости в щелевых каналах в условиях моделирования ослабленных полей силы тяжести, разработка приближенного метода расчета характеристик теплообмена.

Научная новизна. Впервые получены данные по динамике паровых пузырей и теплообмену в щелевых каналах при наличии подвода тепла от образующих канал стенок в условиях моделирования ослабления силы тяжести. В работе выведены

аналитические соотношения, базирующиеся на физической модели процесса кипения в целевых каналах, учитывающие влияние ускорения силы тяжести.

Для проверки надежности полученных расчетных выражений проведено сопоставление с полученными экспериментальными данными, определены границы применимости расчетных соотношений.

Показано влияние конструктивных параметров на характеристики теплообмена в условиях моделирования ослабления гравитационных полей. Получены новые данные по влиянию силы тяжести на кризис теплообмена.

Практическая ценность работы. Полученные в работе результаты могут применяться при расчете и конструировании высокоинтенсивных энерготехнологических установок, а также установок специального назначения, работающих в условиях ослабленной гравитации. Например, при расчете выпарных аппаратов, рабочие элементы которых представляют совокупность целевых каналов; гладкостенных тепловых труб, испарительная зона которых содержит концентрическую вставку, повторяющую форму корпуса трубы и т.д.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на научно-технической конференции факультета Энергомашиностроения МВТУ им. Н.Э. Баумана, декабрь 1975 г., Москва; на XX Сибирском теплофизическом семинаре, май 1976 г. г. Новосибирск; на Международном семинаре по тепло- и массообмену, август 1976 г., г. Дубровник, Югославия.

Публикация. По теме диссертации опубликовано 2 печатные работы.

Объем работы. Диссертация изложена на 77 страницах основного текста и иллюстрируется 37 рисунками на 35 страницах, состоит из введения, четырех глав, приложений, выводов и списка литературы из 65 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе. "Состояние вопроса и постановка задачи исследований" дан анализ различных способов ослабления силы тяжести, в результате которого выбран метод моделирования с помощью плоского слоя жидкости в наклонной щели, предложенный Д.А. Кириченко и А.Д. Мышкисом. Проведен анализ работы по исследованию кипения в щелевых каналах.

Динамика одиночных пузырей в наклонной щели без подвода тепла от стенок ее образующих была исследована в работах В.А. Григорьева и Д.А. Кириченко. В известных нам работах по изучению теплообмена при кипении в щелевых каналах при подводе тепла от стенок рассматривались лишь вертикальные каналы. Отсюда следует, что влияние угла наклона плоскости щелевого канала при наличии подвода тепла от его стенок, на характеристики теплообмена при кипении в нем, по-видимому, ранее не рассматривалось. На основе анализа состояния вопроса сформулированы задачи исследования.

Вторая глава "Приближенная теория теплообмена и гидродинамики при кипении жидкости в щелевых каналах в условиях нормальной и ослабленной силы тяжести" посвящена подробному рассмотрению факторов, влияющих на гидродинамику двухфазного потока и построению аналитических выражений, учитывающих влияние паросодержания и ускорения силы тяжести. Для описания особенностей рассматриваемого процесса используется физическая модель, основанная на конкретном материале, полученном при кинематографическом изучении процесса. В главе приведены основные допущения, принятые при выводе расчетных соотношений. Щелевой канал, образованный плоскопараллельными стенками, заполнен жидкостью, в которой образуются сплюснутые паровые пузыри, отделенные от граничных поверхностей нагрева тонким слоем жидкости. Основная доля тепла подводится к пузырьку путем молекулярной теплопроводности через указанный слой. В этом случае коэффициент теплоотдачи определяется из выражения

$$\alpha = \frac{\lambda_{ж}}{\delta} \quad (I)$$

где $\lambda_{ж}$ - теплопроводность жидкости
 δ - толщина жидкой пленки

Как показали расчеты, в практическом диапазоне изменения тепловых нагрузок при кипении жидкости в щелевых каналах применима формула для толщины пленки жидкости между пузырь и стенкой, полученная В.А. Григорьевым

$$\delta = \kappa_1 \nu_{ж} \left(\frac{\rho_{ж} \delta}{G \bar{v}_n} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

Здесь $\bar{v}_n$ - скорость пара, $\nu_{ж}$ - кинематический коэффициент вязкости жидкости, G - коэффициент поверхностного натяжения, $\rho_{ж}$ - плотность жидкости, δ - толщина щелевого зазора.

Исходя из того, что средний по времени локальный коэффициент теплоотдачи определяется толщиной жидкой пленки и долей времени в течение которого она на данном участке поверхности стенки существует, получаем уравнение

$$\bar{\alpha} = \frac{\lambda_{ж}}{\kappa_1 \nu_{ж}} \left(\frac{2 h G}{2 \rho_{ж} \rho_n \delta^2} \bar{q} \bar{\varphi}^2 \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

Здесь $\bar{\alpha}$ - средний по времени локальный коэффициент теплоотдачи, $\bar{q}$ - плотность теплового потока, h - текущая высота от дна канала, ρ_n - плотность пара, φ - теплота парообразования.

Выражение для истинного объемного паросодержания имеет вид

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{1 + \frac{2 \rho_n \delta}{2 \bar{q} h} \varphi_p} \quad (4)$$

Скорость всплывания пузырей в развитом двухфазном потоке (φ_p) может быть связана со скоростью всплывания одиночного парового пузыря (φ).

Уравнение, описывающее всплывание сплюсненного, растущего в канале одиночного парового пузыря, может быть составлено из баланса архимедовой силы, силы инерции, силы лобового сопротивления и силы трения между пузырем и пленкой жидкости, отделяющей его от стенки. Пренебрегая последней, получаем

$$\frac{d}{d\tau} \left(\frac{\pi D^3}{4} \rho_{ж} \vartheta \right) = \frac{\pi D^2}{4} b g (\rho_{ж} - \rho_n) - C_w D b \frac{\rho_{ж} \sigma^2}{2} \quad (5)$$

где D - диаметр пузыря, τ - время, g - ускорение силы тяжести, C_w - коэффициент лобового сопротивления

$$\text{Учитывая, что } D = D_0 \exp \frac{g}{2 \rho_n b} (\tau - \tau_0) \quad (6)$$

получено выражение для скорости всплытия одиночного парового пузыря

$$\vartheta = \frac{\pi D_0 \bar{q} g \tau}{32 \rho_{ж} b \rho_n} \quad (7)$$

где D_0 , τ_0 - диаметр парового пузыря и время с момента его возникновения, начиная с которого подвод тепла к пузырю через пленку жидкости становится определяющим.

Анализ подвода тепла к пузырю в процессе его роста позволил получить формулу

$$D_0 = \frac{b}{C_2} \left(\frac{g \rho_{ж} \bar{q} \rho_{ж}^2 b^4 C_p}{C_1^4 \lambda_{ж}^2 \mu_{ж}} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (8)$$

где C_p - удельная теплоемкость жидкости, $\beta_{ж}$ - коэффициент объемного расширения жидкости, $\mu_{ж}$ - динамический коэффициент вязкости жидкости

В конечном виде, исключив время как параметр, получаем выражение для скорости всплытия

$$\vartheta = c \left(\frac{g^6 \cdot \bar{q}^4 \cdot b^9 h^5 \rho_{ж}^7 \beta_{ж} C_p}{\mu_{ж}^6 \tau^5 \rho_n^5 \lambda_{ж}^8} \right)^{0,1} \quad (9)$$

или в критериальном виде

$$F_2 = c Re^{*0,5} Ra^{*0,1} \quad (10)$$

$$\text{где } F_2 = \frac{\vartheta}{(gh)^{0,5}}; Re^* = \frac{\bar{q} b \rho_{ж}}{\mu_{ж} \tau \rho_n}; Ra^* = \frac{g \beta_{ж} \bar{q} b^4 \rho_{ж}^2 C_p}{\lambda_{ж}^2 \mu_{ж}}$$

Учитывая связь между скоростью всплытия одиночного пузыря и скоростью всплытия пузырей в развитом двухфазном потоке, приходим к итоговому выражению для истинного объемного паросодержания.

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{1 + K_c \left(\frac{2^5 \rho_n^3 \rho_{ж}^2 \bar{v}^{19} g^4 \beta_{ж} c_p}{\bar{q}^4 h^5 \lambda_{ж}^2 \mu_{ж}^4} \right)^{0,1}} \quad (II)$$

где $K_c = 0,7 C$;

После подстановки (II) в (3) приходим к расчетной формуле для локального коэффициента теплоотдачи

$$\bar{\alpha} = \frac{\lambda_{ж}}{K_1 \bar{v}_{ж}} \left\{ \frac{2 \bar{q} h G}{2 \rho_{ж} \rho_n \bar{v}^2 \left[1 + K_c \left(\frac{2^5 \rho_n^3 \rho_{ж}^2 \bar{v}^{19} g^4 \beta_{ж} c_p}{\bar{q}^4 h^5 \lambda_{ж}^2 \mu_{ж}^4} \right)^{0,1} \right]^2} \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (I2)$$

или в критериальном виде:

$$Nu = K \left\{ Ga We Re^* \left[\frac{1}{1 + K_c \left(\frac{Ga^5 We^5 Re^{*5}}{R_e^2} \right)^{0,1}} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (I3)$$

где $Nu = \frac{\bar{\alpha} \cdot \bar{v}}{\lambda_{ж}}$; $Ga = \frac{g \bar{v}^3}{\bar{v}_{ж}^2}$; $We = \frac{G}{g (\rho_{ж} - \rho_n) \bar{v}^2}$;

$$Re^* = \frac{\bar{q} h}{2 \rho_n \bar{v}_{ж}}; \quad Gr^* = \frac{g \beta_{ж} \bar{q} \bar{v}^4 \rho_{ж}^2}{\lambda_{ж} \bar{v}_{ж}^2 \rho_n^2};$$

$$Pr = \frac{c_p \mu_{ж}}{\lambda_{ж}}; \quad K = \frac{\sqrt[3]{2}}{K_1};$$

Полученное выражение характеризует зависимость интенсивности теплоотдачи от режимных параметров системы, физических свойств жидкости, геометрических характеристик системы и, от величины силы тяжести.

Третья глава. "Описание экспериментальной установки для исследования влияния силы тяжести и методика исследования" посвящена описанию разработанной установки, методам исследования, описанию измерительных схем и оценке погрешностей измеряемых величин.

К характерным особенностям установки относятся:

1) наличие плоскопараллельного щелевого канала и обеспечение постоянства теплового потока по высоте и ширине его стенок;

2) возможность замены одной из стенок канала оптическим стеклом с напыленным светопрозрачным токопроводящим слоем, обеспечивающим сохранение симметрии подвода тепла;

3) возможность установки одиночного центра парообразования, позволяющего наблюдать развитие парового пузыря с самого начала его зарождения;

4) возможность изменения угла наклона плоскости щелевого канала к горизонту.

Экспериментальная установка включает в себя рабочий сосуд, систему питания, контрольно-измерительную аппаратуру и аппаратуру фото-и кинопередачи. Щелевой канал образован плоскостью измерительного элемента и оптическим стеклом, на наружную поверхность которого напылен токопроводящий светопрозрачный слой. Основу измерительного элемента составляет полированная стальная плита с горизонтальными пазами, делящими ее на восемь участков. Каждый участок препапарирован по толщине хромель-копелевыми термопарами диаметром 0,2 мм. Причем спай термопар располагались на расстоянии 0,27 мм и 6,5 мм от поверхности кипения. С наружной стороны измерительного элемента установлены электронагреватели.

Для исключения систематической ошибки при регистрации температуры проводилась тарировка термопар с той измерительной системой, которая в дальнейшем использовалась в эксперименте. Кроме того, была выполнена специальная тарировка по проверке глубины заделки термопар и точности соответствия их показаний температуре измерительного элемента на глубине заделки. Локальный коэффициент теплоотдачи от стенки определялся в соответствии с формулой $\alpha = \frac{\bar{q}}{T_{ст} - T_n}$, где $\bar{q}$ - плотность теплового потока, $T_{ст}$ - температура стенки, T_n - температура насыщения жидкости при данном давлении. Причем, плотность теплового потока находилась из выражения

$$\bar{q} = \lambda_{ст} \frac{\Delta T}{\delta_1 - \delta_2}$$

где $\lambda_{ст}$ - коэффициент теплопроводности материала стенки, ΔT - перепад температур в местах заделки термопар, δ_1, δ_2 - глубина заделки спаев термопар. Регистрация перепадов температур осуществлялась цифровым микровольтамперметром Ф-30.

Рабочей жидкостью служила дистиллированная вода. Все эксперименты были проведены при атмосферном давлении.

Четвертая глава. " Экспериментальное исследование гидродинамики и теплообмена при кипении жидкости в щелевых каналах в условиях моделирования ослабления силы тяжести, сравнение опытных данных с расчетными зависимостями" посвящена экспериментальной проверке основных положений, заложенных в основу расчетной теоретической модели процесса. Первый этап работы составляло исследование динамики одиночных паровых пузырей и гидродинамики развитого двухфазного потока в щелевом канале с помощью скоростной киносъемки. На рис.1а приведены зависимости скорости всплытия одиночных паровых пузырей от времени при различных значениях $\bar{g} = \frac{g_e}{g_0}$ (где g_e - эффективная сила тяжести, g_0 - ускорение свободного падения), относительной силы тяжести и фиксированном значении теплового потока. Сплошная линия соответствует расчетной зависимости (7). Как следует из экспериментальных и расчетных данных, уменьшение относительной силы тяжести приводит к уменьшению скорости всплытия. На рис.1б приведено обобщение экспериментальных данных в соответствии с критериальным уравнением (10). Как видно, расчетные и экспериментальные данные удовлетворительно согласуются. В работе проводились исследования по определению истинного объемного паросодержания в зависимости от величины щелевого зазора, плотности теплового потока, высоты от дна канала и угла наклона плоскости щелевого канала к горизонту.

На рис.2а представлена зависимость величины, обратной паросодержанию от относительной силы тяжести при различных значениях толщины щелевого зазора. Как видно из приведенных зависимостей, с уменьшением относительной силы тяжести, величина истинного объемного паросодержания существенно увеличивается. Здесь же приведено сопоставление с расчетной

10.

зависимостью (II) . Обобщение экспериментальных данных в соответствии с критериальным уравнением (I3) приведено на рис. 26.

Во второй серии опытов изучались зависимости коэффициента теплоотдачи при кипении в щелевом канале от плотности теплового потока, геометрических характеристик щелевого канала и угла наклона плоскости канала к горизонту. Влияние относительной силы тяжести на характеристики теплообмена при кипении воды в щелевом канале для различных зазоров отражено на рис.3. Увеличение коэффициента теплоотдачи в щелевом канале с уменьшением угла наклона плоскости канала к горизонту объясняется увеличением паросодержания, что согласуется с расчетными зависимостями (II, I2).

На рис.4 представлены экспериментальные данные различных авторов по характеристикам теплообмена при кипении воды в большом объеме. Здесь приведены данные настоящей работы по кипению воды в щелевом канале в условиях моделирования ослабления силы тяжести. Как следует из представленных данных, в области умеренных тепловых нагрузок росту коэффициента теплоотдачи способствует как уменьшение величины щелевого зазора, так и уменьшение относительной силы тяжести.

Проведенные экспериментальные исследования кризисных явлений в щелевых каналах показали существенное влияние величины силы тяжести на критическую плотность теплового потока и выявила область тепловых нагрузок, в которой целесообразно применение щелевых каналов (рис.4). Причем при горизонтальном положении плоскости щелевого канала ($\bar{g} = 0$) происходит полное испарение жидкости в щели. Выявлены границы применимости расчетных соотношений при изменении конструктивных параметров канала.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основе физической модели процесса кипения в щелевом канале получена теоретическая формула для расчета коэффициента теплоотдачи, учитывающая влияние силы тяжести.

2. Выполнено экспериментальное исследование гидродинамики и теплообмена при кипении воды в щелевых каналах в условиях моделирования ослабления силы тяжести. В процессе экспе-

римента проведена поэтапная проверка расчетных соотношений.

3. Установлено влияние истинного объемного паросодержания и ускорения силы тяжести на характеристики теплообмена при кипении в щелевых каналах. Уменьшение относительной силы тяжести приводит к увеличению паросодержания в канале, что в свою очередь, в определенных пределах ведет к увеличению коэффициента теплоотдачи.

4. Исследовано влияние конструктивных параметров канала на характеристики теплообмена.

5. Получены данные по влиянию силы тяжести на кризис теплообмена. Уменьшение относительной силы тяжести вызывает снижение критической тепловой нагрузки.

6. Определены границы применимости расчетных соотношений.

7. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных подтвердило справедливость основных положений, заложенных в модель процесса.

Основное содержание диссертации достаточно полно изложено в следующих работах:

1. Исследование теплообмена при кипении в условиях ослабленной гравитации. "Вопросы теплопередачи". Материалы научного семинара. ИВТУ, МЭИ, МЛТИ, Москва, 1976 (соавторы Б.М.Миронов, Х.К. Курбанов)

2. Исследование теплообмена при кипении водных растворов этанола в щелевом канале. "Известия ВУЗ-ов", "Машиностроение", № 3, 1977 (соавторы А.И.Лесонтьев, Б.М.Миронов, Х.К. Курбанов).

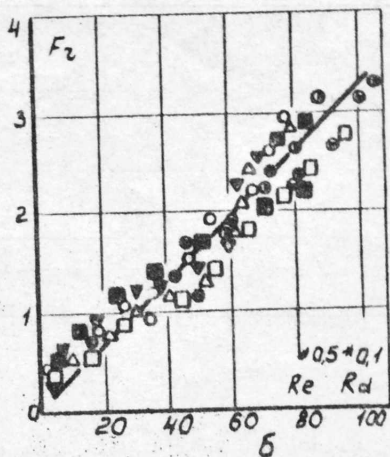
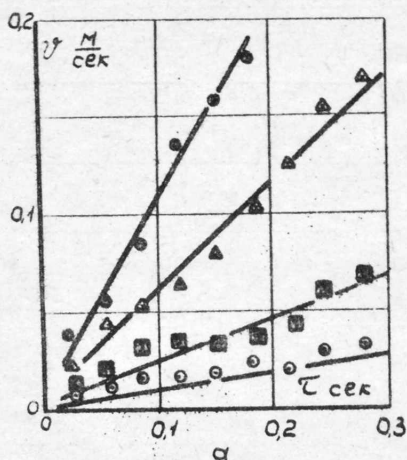


Рис. 1 Скорость всплывания паровых пузырей.

а) $b = 1,5 \text{ мм}$; $\bar{q} = 0,92 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$; $\bullet - \bar{q} = 1$; $\Delta - \bar{q} = 0,5$; $\blacksquare - \bar{q} = 0,259$; $\circ - \bar{q} = 0,122$

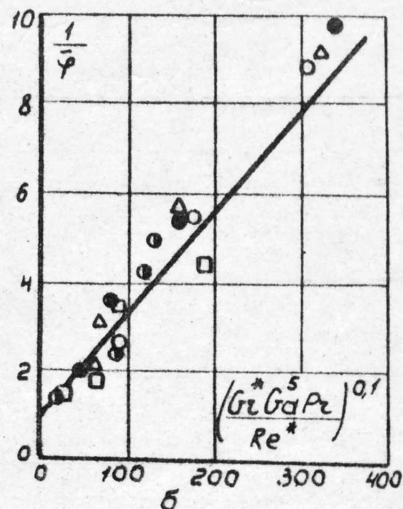
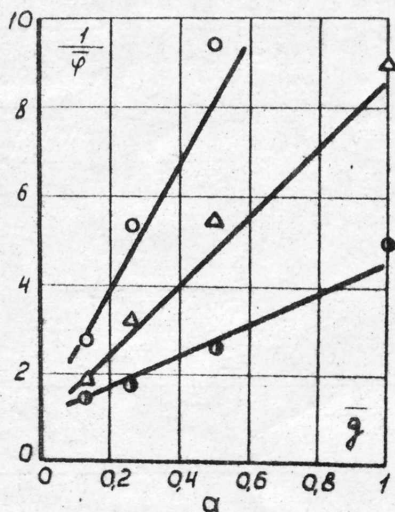


Рис. 2 Истинное объемное паросодержание.

13

а) $\bar{q} = 0,92 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$; $h = 18 \text{ мм}$; $\circ - b = 2,5 \text{ мм}$; $\Delta - b = 1,5 \text{ мм}$; $\bullet - b = 1,0 \text{ мм}$

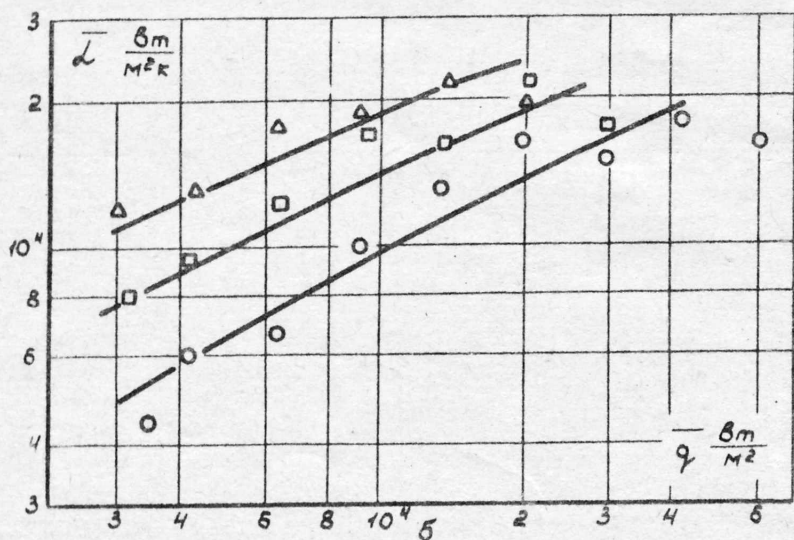
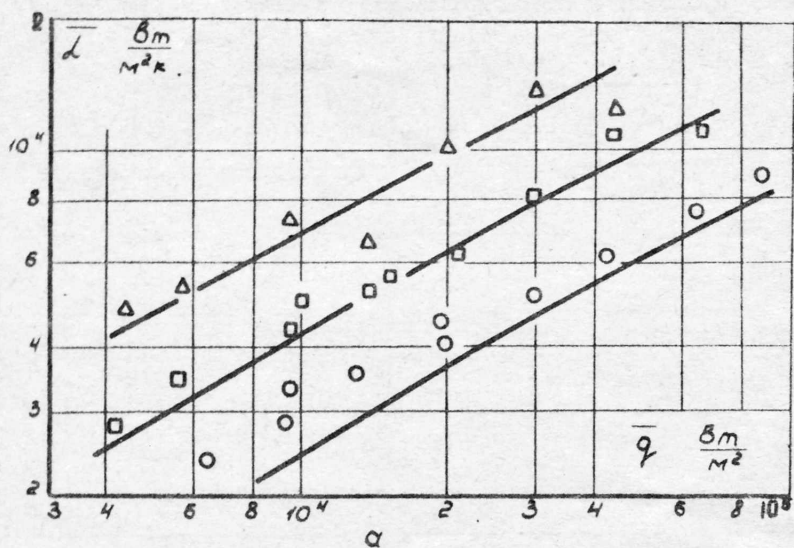


Рис. 3 Характеристики теплообмена.

14

$\circ - \bar{q} = 1,$
 $h = 18 \text{ мм}$

$\square - \bar{q} = 0.259,$
 $\alpha / \beta = 2.5 \text{ мм}$

$\Delta - \bar{q} = 0.052$
 $\beta / \delta = 1.0 \text{ мм}$

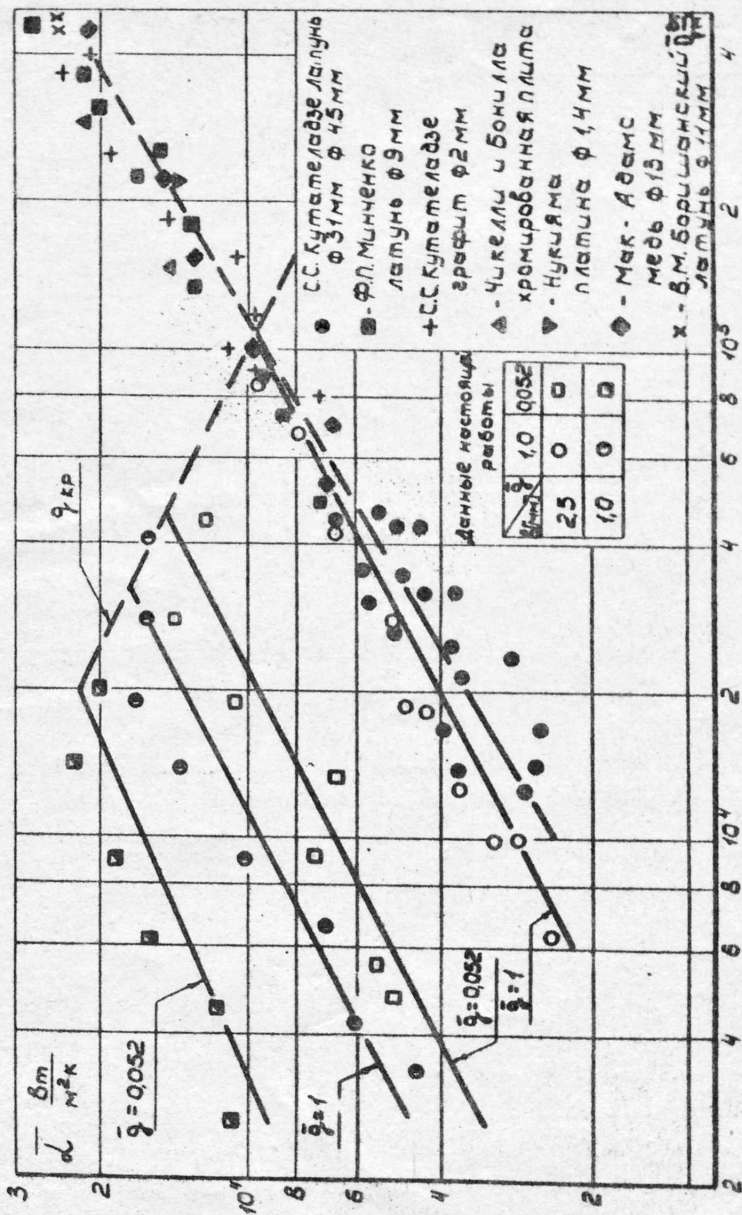


Рис. 4. Сопоставление с данными по кипению в фольгом объеме.