

М239965

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

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

КОРНЕЕВ Александр Дмитриевич

На правах рукописи

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА
ПРИ КИПЕНИИ В ВЕРТИКАЛЬНЫХ
ЩЕЛЕВЫХ КАНАЛАХ

(Специальность № 05.14.05 — Теоретические основы
теплотехники)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



1239965

Корнеев А. Д. Исследование

Работа выполнена в Московском ордена Ленина и ордена
Трудового Красного Знамени высшем техническом училище
им. Н. Э. Баумана.

Научные руководители —
доктор технических наук, профессор А. И. ЛЕОНТЬЕВ;
кандидат технических наук, доцент Б. М. МИРОНОВ.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук В. И. ПЕТРОВИЧЕВ (МИФИ)
кандидат технических наук Б. Г. ГАНЧЕВ (МВТУ)

Ведущее предприятие — будет указано в решении Ученого
Совета.

Автореферат разослан « »

1974 г.

Защита д
на заседани
МВТУ им. Н
манская ул.

1974 г.

роение»
2-я Бау-

Ваши от
ные печатьк

заверен-
у.

С диссер
им. Н. Э. Б

МВТУ

Учен

1239965

В числе задач, поставленных развитием новой техники, важное место занимают вопросы интенсификации энергетических процессов и, в частности, — проблемы, связанные с созданием высоконапряженных теплообменных и испарительных аппаратов, отличающихся компактностью, малым весом, высокой надежностью, большим ресурсом работы. В таких аппаратах широко применяются процессы кипения, для которых характерны высокие значения тепловых потоков при малых и умеренных температурных напорах.

Закономерности процесса кипения изучались и изучаются весьма широко. Однако, сложность физической картины и чрезвычайно широкое разнообразие условий протекания процесса приводят к тому, что до настоящего времени отсутствует единая точка зрения на механизм этого явления. Отсутствует и замкнутое математическое описание процесса. Подавляющее большинство экспериментальных исследований процесса теплообмена при кипении проводилось в условиях, которые характеризуются как "кипение в большом объеме".

В последнее время привлекают внимание новые методы организации теплообмена при кипении в узких щелях и капиллярных каналах, эффективные диаметры которых соизмеримы с отрывным диаметром шарового пузыря или меньше его. Особое значение приобретает такой метод при организации кипения в условиях действия уменьшенных массовых сил, например — пониженного ускорения силы тяжести.

Условия развития процесса кипения в узких каналах весьма специфичны, поэтому экспериментальные и теоретические результаты, описывающие кипение в большом (свободном) объеме не могут быть непосредственно использованы для расчета теплообмена при кипении в щелевых и капиллярных системах.

Настоящая работа посвящена исследованию теплообмена и гидродинамики при кипении дистиллированной воды в вертикальных щелевых каналах.

Имеющиеся в литературе сведения о процессах кипения в каналах малого гидравлического диаметра сравнительно немногочисленны. Критический анализ экспериментальных исследований Чернышского К.И., Тананайко Ю.Н., Кошкина В.К., Лапина А. выявил некоторые особенности теплообмена при кипении в щелевых каналах. Однако физическая картина исследуемого процесса в этих работах не отражена и, как отмечают сами авторы, проведенные опыты требуют дополнительных исследований.

В.А. Григорьевым и Ю.И. Крохиным исследовался процесс кипения при вынужденном движении жидкости в вертикальных щелевых каналах в области низких и умеренных тепловых потоков.

М 239966

На основании анализа изученной литературы перед настоящей работой была поставлена основная задача: исследование теплообмена и гидродинамики при кипении воды в условиях естественной конвекции в щелевых каналах, ширина которых соизмерима или меньше отрывного диаметра парового пузыря.

При теоретическом описании процесса за основу взята модель, разработанная в институте Теплофизики СО АН СССР профессором Леонтьевым А.И. и сотрудниками. Авторы рассматривают две стадии существования пузыря. Для первой стадии получены аналитические зависимости исходя из того, что все тепло, подведенное к сферическому целиком расходуется на генерацию пара. После того, как пузырь достигает края вертикального щелевого канала начинается вторая стадия, в которой, по мнению авторов, жидкость из тонкого слоя у стенки полностью испаряется.

Проведенный анализ полученных нами экспериментальных данных показал, что такая физическая модель не полностью отражает действительные процессы, протекающие при кипении воды в вертикальном щелевом канале. Оказалось, что изменение толщины микрослоя вследствие его испарения за время существования пленки в исследуемом диапазоне тепловых нагрузок $q = 5 \cdot 10^3 + 6 \cdot 10^4$ Вт/м² и ширины канала $\delta = 0,3 + 2,5$ мм пренебрежимо мало по сравнению с начальной толщиной пленки и практически отсутствует вторая стадия полного испарения пленки. Кроме того, паровой сфероид может оторваться от дна щелевого канала до того, как достигнет верхнего края.

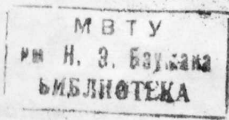
Для описания особенностей теплообмена при кипении в вертикальных щелевых каналах, используется следующая модель, основанная на визуальном и кинематографическом изучении процесса (рис. I).

Пространство, ограниченное изотермическими поверхностями дна и стенок щели, заполнено перегретой жидкостью. В жидкости образуются сплюснутые паровые пузыри, отделенные от граничных поверхностей тонким слоем жидкости.

Тепло, расходуемое на генерацию пара, подводится к поверхности сплюснутых пузырей от граничных поверхностей нагрева путем молекулярной теплопроводности через указанный слой жидкости. В этих условиях коэффициент теплоотдачи от поверхности нагрева к жидкости определяется формулой

$$\alpha = \lambda / \delta$$

(I)



где λ - коэффициент теплопроводности жидкости,
 δ - толщина микрослоя.

Учитывается, что процесс зарождения, роста и отрыва паровых пузырей в щелевом канале протекает иначе, чем при кипении в большом объеме. В своем развитии паровой пузырь проходит две различные стадии существования в щелевом канале.

На первой стадии существования паровой пузырь в процессе роста принимает форму увеличивающегося в размере сфероида и удерживается в щели силами поверхностного натяжения (рис. 1 а, б). Толщина слоя жидкости (δ), отделяющего поверхность сфероида от стенок щелевого канала, входящая в формулу (1), при малой ширине щели определяется взаимодействием сил поверхностного натяжения на границе раздела пар-жидкость, сил вязкости и сил инерции. В соответствии с рекомендациями В.А.Григорьева и Ю.И.Крожина принимаем

$$\delta = K \sqrt[3]{\frac{\sigma' b}{\rho' u''}} \quad (2)$$

Здесь: σ' - коэффициент поверхностного натяжения; b - ширина канала; ρ' - плотность жидкости; $\sqrt[3]{}$ - кинематический коэффициент вязкости; u'' - скорость перемещения границы раздела пар-жидкость; K - постоянный коэффициент.

На второй стадии существования диаметр парового пузыря-сфероида становится больше отрывного, сфероид отрывается от нижней стенки и поднимается по щели, увеличиваясь в размере (рис. 1 в, д).

При рассмотрении модели процесса приняты следующие допущения, позволяющие существенно упростить математическую формулировку задачи:

1. Сплюснутый паровой пузырь в процессе роста сохраняет форму сфероида (векторы скоростей всех точек поверхности парового пятна, находящихся на окружности m , проходя через центр парообразования O , рис. 1 б);

2. подвод тепла со стороны жидкости, окружающей паровой сфероид, не является определяющим;

3. подвод тепла по стержню (образование одиночного парового пузыря происходит за счет локального обогрева поверхности) пренебрежимо мал по сравнению с теплоподводом от стенок щелевого канала;

4. изменение толщины микрослоя вследствие его испарения за время существования пленки пренебрежимо мало по сравнению с начальной толщиной пленки;

5. конвективный перенос тепла в пленке, а также теплопроводность вдоль нее не учитываются; учитывается только теплопроводность поперек пленки;

6. физические параметры жидкости и пара определяются по температуре насыщения;

7. время прохождения через элемент поверхности паровой фазы значительно больше времени прохождения жидкостной пробки, отделяющей паровые пузыри друг от друга.

Основные допущения, принятые при описании процесса, позволили существенно упростить математическую формулировку задачи. В результате получены для первой стадии существования зависимости:

изменения положения границы раздела пар-жидкость

$$D = D_0 \exp\left[\frac{\bar{q}}{\tau s'' b} (\tau - \tau_0)\right] \quad (3)$$

скорости роста парового сфероида

$$\frac{dD}{d\tau} = \frac{\bar{q} \cdot D_0 \exp\left[\frac{\bar{q}}{\tau s'' b} (\tau - \tau_0)\right]}{\tau s'' b} \quad (4)$$

коэффициента теплоотдачи

$$\alpha = \frac{\lambda \left\{ \sigma \bar{q} D_0 \exp\left[\frac{\bar{q}}{\tau s'' b} (\tau - \tau_0)\right] \right\}^{1/3}}{\kappa \nu [s' s'' b^2 \tau]^{1/3}} \quad (5)$$

Здесь: λ - скрытая теплота парообразования, s' - плотность пара, τ - время роста парового сфероида, D_0 - начальный диаметр сфероида, соответствующий моменту времени τ_0 , начиная с которого справедливо допущение (3); $\bar{q}$ - удельный тепловой поток.

Формулу (5) можно привести к безразмерному виду:

$$Nu = \frac{1}{\kappa} (Gr \cdot We \cdot Re \cdot \exp \tilde{\tau})^{1/3} \quad (6)$$

где

$$Nu = \frac{\alpha \cdot b}{\lambda}; \quad We = \frac{\sigma}{q (s' - s'') b^2};$$

$$Gr = \frac{q \cdot b^3}{\nu^2}; \quad Re = D_0 \frac{\bar{q}}{\tau s'' \nu}; \quad \tilde{\tau} = \frac{(\tau - \tau_0) \cdot \bar{q}}{\tau s'' b};$$

На второй стадии существования, когда диаметр парового сфероида становится больше отрывного, сфероид отрывается от дна и поднимается по щели, увеличиваясь в размере (рис. 1 с, d). В этом случае к скорости роста парового сфероида прибавляется скорость подъема его в щели U_n и получаются зависимости, аналогичные для первой стадии.

Для экспериментальной проверки основных положений, заложенных в основу расчетной теоретической модели процесса создана установка, отличительными особенностями которой являются:

1) наличие одиночного центра парообразования; 2) возможность регулировки ширины щелевого канала; 3) возможность регулировки обогрева щелевого канала, образованного двумя плоскопараллельными оптическими стеклами.

Опытная установка состоит из сосуда, в котором происходит кипение, системы электропитания и системы контрольно-измерительной аппаратуры. В нижнюю часть экспериментального сосуда вставляется нагревательный элемент, позволяющий получить одиночный центр парообразования методом локального обогрева поверхности. Щелевой канал образовывался плоскопараллельными оптическими стеклами с металлизированным прозрачным покрытием, что позволило визуализировать процессы, протекающие внутри канала. Измерение локальных тепловых потоков производилось на специальной модели, основным элементом которой являлась металлическая пластина из материала ХТННТ. Пластина препарировалась хромель-копелевыми термопарами, расположенными по высоте канала на расстоянии 0,25 мм от внутренней поверхности. Вторая группа термопар заделывалась в тех же горизонтальных сечениях, что и первая на расстоянии 6 мм от внутренней поверхности. Перетечки тепла в вертикальном направлении предотвращались термостатами. Локальные коэффициенты теплоотдачи определялись по формуле: $\alpha = q / (T_{ст} - T)$ где $q = \frac{\lambda_{ст} \Delta T}{\ell}$ Здесь: λ - коэффициент теплопроводности пластины; ΔT - перепад температур в местах заделки термопар по толщине пластины $\ell = 5,75$ мм; $T_{ст}$ температура внутренней поверхности канала; T - температура насыщения при данном давлении.

Регистрация перепада температур осуществлялась микровольт-микроамперметром типа 6 И6/1, а регистрация температуры поверхности нагрева - потенциометром Р309.

Сопоставление опытных данных по динамике роста паровых пузырей в вертикальных щелевых каналах с теоретической зависи-

мость (3) в виде функции безразмерного параметра D/D_0 от безразмерного времени $\tilde{\tau}$ представлена на рис. 2. При сопоставлении возникает вопрос об определении τ_0 . Эксперименты показали, что при $\tilde{\tau}_0 \approx 0,25 = \frac{\bar{q} \cdot \tau_0}{\tau \cdot \rho'' \cdot b}$ опытные данные находятся в удовлетворительном соответствии с расчетной формулой (3).

Проведенные эксперименты показали существенную зависимость интенсивности теплоотдачи при кипении в щелях от геометрических параметров системы. На рис. 3 представлено сопоставление опытных данных $\alpha = f(q)$ с аналитической зависимостью (5), которую в соответствии с (3) можно записать в виде:

$$\alpha = \frac{\lambda (\sigma \cdot \bar{q} \cdot H)^{1/3}}{K \cdot D (\rho' \rho'' g^2 \tau)^{1/3}}$$

Коэффициенты теплоотдачи, приведенные на рис. 3, измерялись на расстоянии $H = 15$ мм от низа щели. Коэффициент K соответствует значению $K = 66$. На рис. 4 представлены обобщенные данные по теплообмену при кипении в щелевых каналах. Следует отметить удовлетворительное соответствие экспериментальных данных с теоретической зависимостью.

Экспериментальные данные и теоретические исследования показывают существенную зависимость интенсивности теплоотдачи при кипении от геометрических параметров системы. Из рис. 3 следует, что уменьшение ширины щелевого канала от 2,5 мм до 0,3 мм вызывает увеличение коэффициента теплоотдачи приблизительно в 5 раз.

Проведенные автором экспериментальные исследования кризисных явлений в узких вертикальных щелевых каналах показали, что возникновение кризиса связано с исчезновением микропленки жидкости на обогреваемой поверхности. Существенную роль при этом играют гидродинамические условия, способствующие разрушению пленки из-за неустойчивости режима течения на предшествующем участке. Получены опытные данные о кризисе теплообмена $q_{кр}$ при кипении воды в узких вертикальных щелях ($b < 1$ мм).

В ы в о д ы

1. Уточнена физическая модель, предложенная проф. А.И.Леонтьевым и сотрудниками, получены расчетные аналитические зависимости, описывающие теплообмен при кипении в щелевых каналах.

2. Получены экспериментальные данные для одиночного центра парообразования, действующего в щелях различной ширины.

3. На основании предложенной модели получена аналитическая зависимость для расчета скорости роста паровых пузырей в щелевых каналах, исследованы некоторые динамические характеристики при росте паровых пузырей для различных режимных параметров.

4. Показана зависимость интенсивности теплоотдачи при кипении от геометрических параметров системы.

5. Получены экспериментальные данные о кризисе теплообмена при кипении воды в узких вертикальных щелях.

6. Проведенный сравнительный анализ теоретических и экспериментальных исследований подтверждает справедливость физических представлений, положенных в основу теоретической модели.

Основные положения настоящей работы обсуждались на научно-технических семинарах в МВТУ им.Баумана, в Институте высоких температур АН СССР, на У Всесоюзной конференции по теплообмену и гидравлическому сопротивлению в элементах энергетических машин и аппаратов, Ленинград, 1974 г.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Миронов Б.М., Корнеев А.Д., Рудь Г.М., Экспериментальное исследование процесса пузырькового кипения оптическим методом, Труды МВТУ № 170 "Исследование процессов теплообмена в элементах конструкций", Москва, 1973 г.

2. Миронов Б.М., Корнеев А.Д., Рудь Г.М., Условия возникновения паровой фазы на вертикальной поверхности нагрева, Труды МВТУ № 170 "Исследование процессов теплообмена в элементах конструкций", Москва, 1973 г.

С. Леонтьев А.И., Миронов Б.М., Корнеев А.Д., Рудь Г.М.
"Исследование гидродинамики и теплообмена при кипении
жидкости в вертикальных щелевых каналах". Тезисы У Все-
союзной конференции по теплообмену и гидравлическому
сопротивлению в элементах энергетических машин и аппа-
ратов, Ленинград, 1974 г.

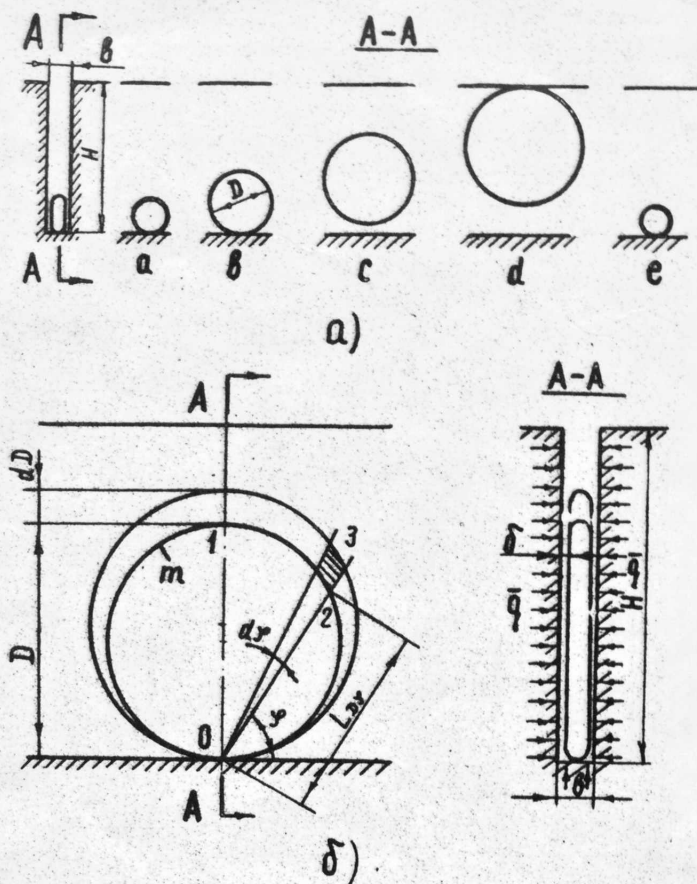


Рис. 1 . Физическая модель процесса теплообмена и гидродинамики при кипении жидкости в вертикальных щелевых каналах

а), б) - I-ая стадия существования парового сфероида (образование, рост, $D < D_{отр}$)
 в), г) - II-ая стадия существования парового сфероида (отрыв, всплытие, $D > D_{отр}$)
 д) - образование нового пузыря.

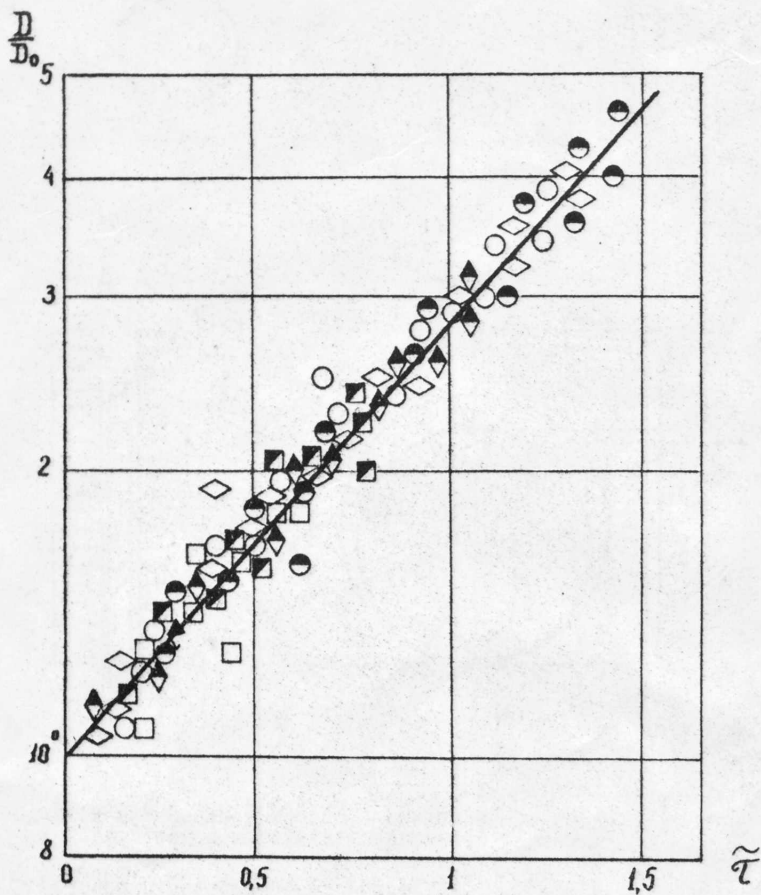


Рис. 2 Обобщение опытных данных по динамике роста парового пузыря в щелевом канале.

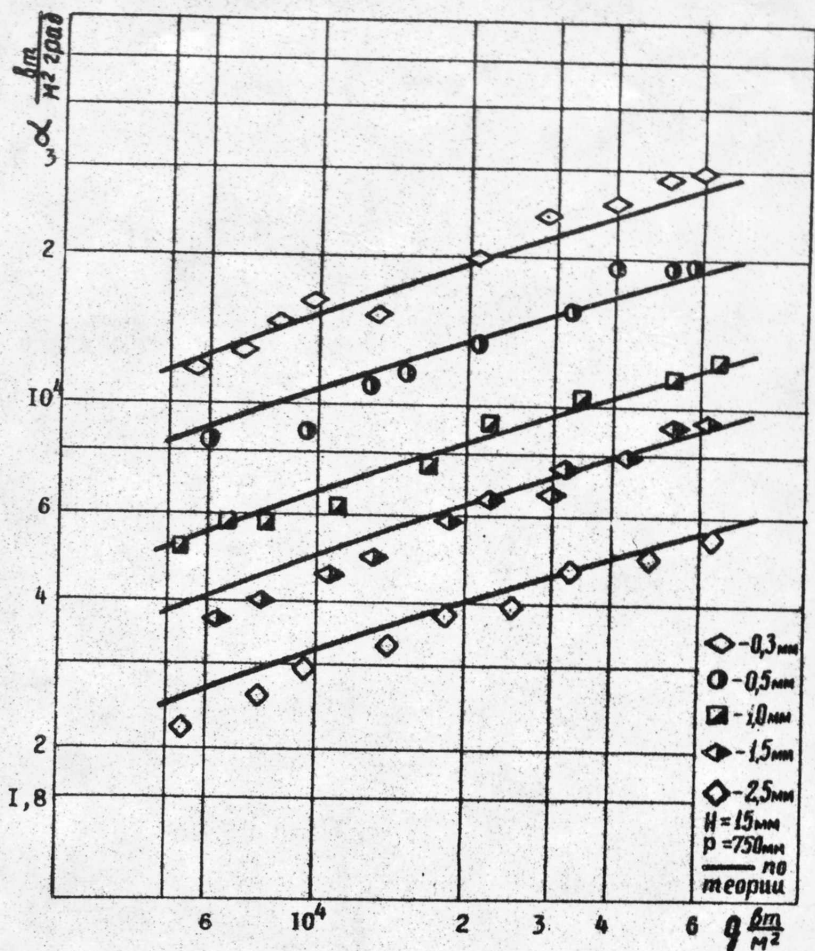


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплоотдачи от удельного теплового потока при кипении воды в вертикальных щелевых каналах.

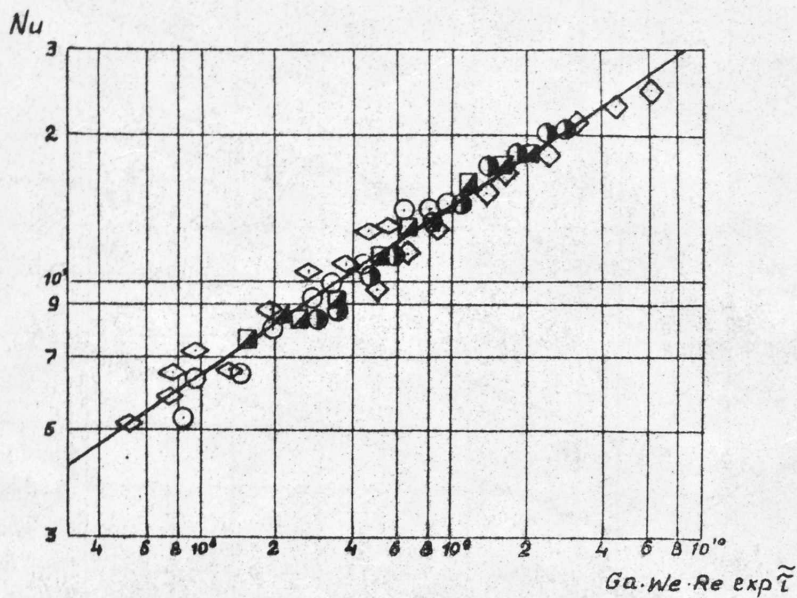


Рис. 4 . Обобщение опытных данных по теплообмену при кипении жидкостей в вертикальных щелевых каналах.