

Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»
АО «ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ –
ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени А.И. Лейпунского»

ФЭИ – 3276

П. Л. Кириллов

Банк данных по теплообмену в жидких металлах

Часть 2. Теплообмен при кипении жидких металлов

Обнинск 2017

Кириллов П.Л.

Банк данных по теплообмену в жидких металлах.

Часть 2. Теплообмен при кипении жидких металлов.

ФЭИ – 3276. Обнинск: ФЭИ, 2017. – 40 с.

Рассматриваемые в препринте данные посвящены теплообмену и кризису при кипении жидких металлов в большом объеме и каналах. Причин интереса к этим вопросам в основном две. Во-первых, изучение процессов теплообмена и кризиса в каналах при вынужденном движении жидкого металла применительно к аспектам безопасности реакторов на быстрых нейтронах, когда при ряде нестандартных ситуациях в каналах ТВС возможно возникновение кипения. Знание интенсивности теплообмена при кипении жидкого металла важно для оценки поведения расплавов реакторных металлов, которые могут образоваться при аварийных ситуациях. Во-вторых, чисто научный интерес, связанный с процессом кипения высокотеплопроводных сред. Теплопроводность воды составляет около 0,5 Вт/(мК), а натрия порядка 50–70, таким образом, отличие составляет более 100. Было не очень ясно, как это различие в свойствах изменит характер кипения и характеристики теплообмена...

СОДЕРЖАНИЕ

Введение

2.1	Теплообмен при кипении жидких металлов в большом объеме и в каналах	4
2.1.1	Особенности теплообмена при кипении жидких металлов	4
2.1.2	Методика экспериментов по кипению жидких металлов	7
2.1.3	Теплообмен при кипении жидких металлов в большом объеме	12
2.1.4	Теплообмен при кипении жидких металлов каналах	17
2.2	Кризис теплообмена при кипении жидких металлов.....	25
2.2.1	Кризис теплообмена при кипении жидких металлов в большом объеме	25
2.2.2	Кризис теплообмена при кипении жидких металлов в каналах	28
	Список литературы части 2	36

2.1 ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ В БОЛЬШОМ ОБЪЕМЕ И В КАНАЛАХ

2.1.1 Особенности теплообмена при кипении жидких металлов

В России первые эксперименты по кипению металлов были выполнены на ртути в 40-е годы С.С. Кутателадзе, М.А. Стыриковичем и др. [1, 2, 3]. Дальнейшее развитие исследований кипения металлов было обусловлено потребностями атомной энергетики. В первую очередь, требовалась оценка поведения активной зоны реактора на быстрых нейтронах, охлаждаемого натрием, в условиях отклонения от нормального режима эксплуатации, когда может возникнуть закипание натрия (блокировки ТВС в связи с распуханием твэлов, закупорка сечения и др.). Подробный анализ работ российских и зарубежных исследователей по кипению металлов применительно к атомной энергетике дается в [4–7].

Ряд стран (Япония, США, Франция, Англия, Германия), начиная с 70-х годов, начали реализацию долгосрочных программ по безопасности реакторов с жидкометаллическим охлаждением. Основное внимание уделялось динамике развития паровой фазы в ТВС, особенностям охлаждения при кипении теплоносителя в области за блокадой в ТВС и т.д. В частности, в Японии проведены поэтапные исследования аварийных процессов с кипением жидкометаллического теплоносителя в кольцевых каналах и в многостержневых сборках. В Германии исследовались нестационарные процессы, связанные с изучением аварии при потере теплоносителя и блокировке части проходного сечения ТВС. Во Франции выполнены исследования кипения в ТВС в стационарных условиях, при медленных переходных процессах с падением расхода, при естественной конвекции, в быстропротекающих процессах с ростом мощности или падением расхода. В США было проведено исследование перегрева теплоносителя на начальной стадии кипения при разных тепловых потоках и скоростях теплоносителя.

В настоящее время одной из актуальных задач является обобщение накопленных результатов исследований по процессам кипения в жидких металлах, вследствие следующих факторов:

1. результаты исследований могут быть безвозвратно утеряны в связи со сменой поколений;
2. разработка новых теорий процессов кипения и кризиса (как правило, имеющих полуэмпирический характер) невозможна без всего экспериментального материала, накопленного ранее.
3. при современных условиях развития науки и техники проведение экспериментальных исследований кипения металлов при температурах 800÷1000 °С является достаточно дорогостоящим мероприятием.

Теплообмен в кипящих металлах характеризуется высокой интенсивностью, коэффициенты теплообмена имеют порядок (10÷100) кВт/(м²·К). Несмотря на это, при высоких плотностях тепловых потоков могут возникать существенные разности температур между теплопередающей поверхностью и кипящим металлом. По своему характеру процесс кипения жидких металлов в области давлений порядка атмосферного в значительной степени аналогичен кипению неметаллических жидкостей в области вакуума. Это связано с затруднением в парообразовании на поверхности нагрева при кипении металлов.

При условии одинакового давления насыщения, для образования зародыша пузырька при кипении жидких металлов необходим значительно больший перегрев поверхности нагрева, чем при кипении неметаллических жидкостей. Большой критический радиус парового зародыша в металлах $R_{cr} \sim \sigma T_S v''$ приводит к затруднённому вскипанию металла, чему способствует также высокая интенсивность теплообмена жидкого металла при свободной конвекции. В частности, R_{cr} для натрия в 10 раз, а для калия $\sim$ в 5 раз больше, чем у воды. Для уменьшения R_{cr} , необходимо увеличить перегрев жидкости ($R_{cr} \sim 1/\Delta T$). Поэтому температура металла перед образованием парового пузыря может значительно превысить температуру насыщения при заданном давлении (на 100 °C и более).

Возникновение более высоких перегревов перед закипанием жидких металлов по сравнению с перегревами при закипании обычных жидкостей обусловлено следующими свойствами жидких металлов [8, 9]:

- более высокая теплопроводность по сравнению с обычными молекулярными жидкостями;
- большие величины поверхностного натяжения;
- хорошая смачиваемость, то есть малая величина удельного краевого угла;
- большая химическая активность при взаимодействии с кислородом воздуха, водой и конструкционными материалами;
- увеличение растворимости инертных газов в жидких металлах с ростом температуры;
- высокий объем пара, приводящий к большим отрывным размерам паровых пузырей;
- давления при кипении жидких металлов обычно значительно ниже критических, что отвечает области малого наклона кривой упругости пара (dp_s/dt).

Установлено, что перегрев перед закипанием жидких металлов является функцией более 15 переменных, и различные теоретические расчеты оказываются мало полезными для инженерной практики. Для натрия при давлениях до 0,2 МПа и числах $Re \sim 10^5$ следует считаться с возможностью перегрева порядка 100 °C.

Кипение жидких металлов в области давлений порядка атмосферного характеризуется существованием следующих режимов [10]:

1. При режиме свободной конвекции, вследствие затрудненного образования зародышей пузырьков на поверхности нагрева, парообразования на поверхности не происходит. Тепло от поверхности нагрева к зеркалу испарения передается посредством теплопроводности и свободной конвекции, а испарение идет на поверхности жидкости.
2. При повышении теплового потока температура жидкости и стенки увеличивается. На поверхности нагрева возникают отдельные паровые пузыри. При этом температура жидкости и поверхности нагрева падает. Затем весь цикл повышения температуры и зарождения паровых пузырей повторяется. Начинается режим неустойчивого кипения, характеризующийся пульсацией температуры греющей стенки и жидкости.
3. При дальнейшем увеличении теплового потока начинается режим развитого пузырькового кипения. При повышении давления теплоносителя замечен переход от свободной конвекции к развитому пузырьковому кипению.

Данные режимы, включая участки различных видов кипения и переходов, показаны на рис. 1, 2, которые приведены в [7].

На рис. 3 дается кривая кипения для металлов (или кривая Нукиямы), выражающая зависимость между плотностью теплового потока на поверхности нагрева и температурным напором [5, 7].

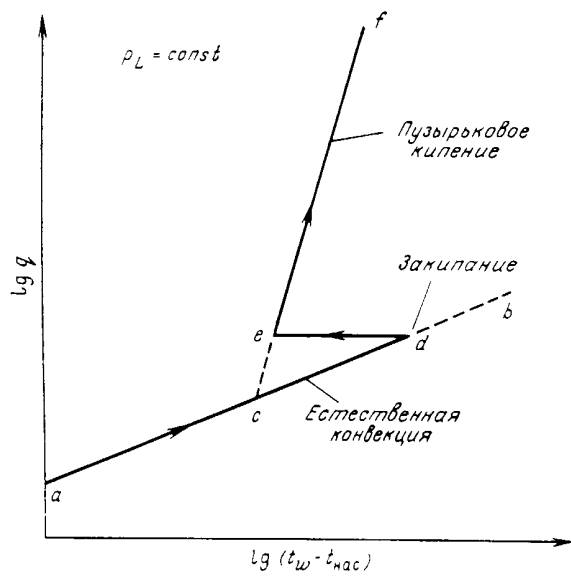


Рис. 1. Связь между плотностью теплового потока на поверхности нагрева и температурным напором $t_w - t_s$ в эксперименте по пузырьковому кипению в большом объеме

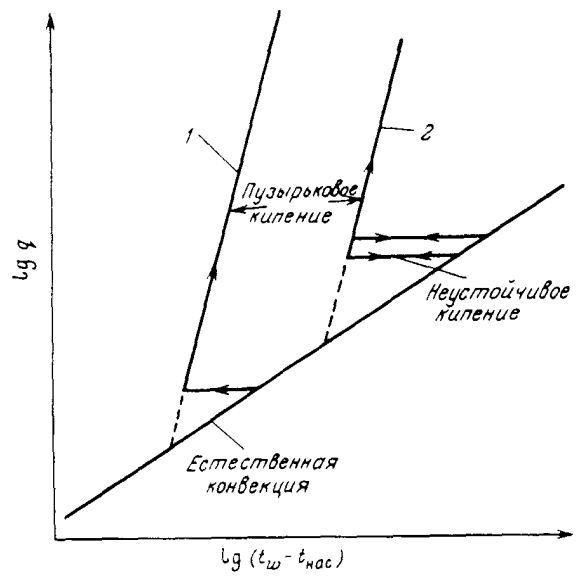


Рис. 2. Качественное влияние давления на характер теплообмена при пузырьковом кипении:
1 – высокое значение давления p_L ;
2 – низкое значение давления p_l

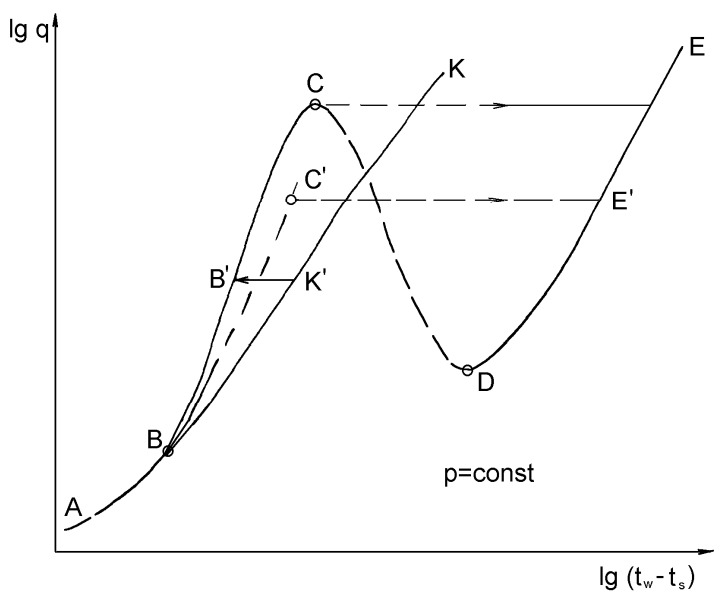


Рис. 3. Кривая кипения металла (для низких давлений):
 АВ – свободная конвекция; В – начало пузырькового кипения;
 ВС – пузырьковое кипение; ВК – затянута свободная конвекция; С – точка кризиса;
 СЕ – переход к плёночному кипению; ВС' – неустойчивое кипение;
 К'В' – переход от конвекции к пузырьковому кипению;
 С'Е' – переход от неустойчивого кипения к плёночному кипению

К числу особенностей процесса кипения жидких металлов, кроме затрудненного парообразования на поверхности нагрева, относятся:

- большая толщина теплового пограничного слоя в пристенной области жидкости;
- существенный перегрев основной массы жидкости относительно температуры насыщения (по сравнению с неметаллическими жидкостями);
- значительный скачок температуры на границе пар–жидкость у зеркала испарения, который достигает примерно 5 К при развитом кипении и 15 К при свободной конвекции.

Исследования по установлению влияния различных факторов (шероховатости, поверхностных условий, растворённого газа и др.) на величину перегрева жидкого металла перед закипанием не позволили выявить каких-либо однозначных зависимостей. Первоначально обнаруженные высокие величины перегрева жидкого металла перед закипанием в 100–200 и более градусов вызывали тревогу у разработчиков реакторов в связи с возможностью быстрого образования в активной зоне больших объёмов пара. Вскипание металла при больших его перегревах могло привести к росту реактивности, закупорке каналов паром, ухудшению теплосъёма. Последующие исследования показали, что опасность перегревов переоценивалась. На практике перегревы не существуют, в связи с тем, что в металле почти всегда присутствуют растворённые газы, примеси, которые являются центрами парообразования. Однако до сих пор нет убеждённости и доказательств в том, что такие перегревы не смогут когда-либо реализоваться.

Наличие значительного перегрева жидкости и температурного скачка на границе раздела фаз связано с малым числом паровых пузырей в объеме жидкости (т. е. с небольшой поверхностью раздела фаз) или вообще с их отсутствием (при свободной конвекции) и значительным термическим сопротивлением на границе раздела фаз. Приближенные оценки граничного термического сопротивления, сделанные на основании измерений теплового потока и разности температур на свободной поверхности раздела фаз [11], показывают, что для натрия в диапазоне давлений насыщения порядка 0,1–1 ата термическое сопротивление на границе раздела фаз составляет около 0,086 (м² ч град)/кВт.

Многочисленные исследования физики кипения жидких металлов показали, что устойчивое кипение металла не приведет к серьезной аварии, тогда как неустойчивое кипение металла может быть опасным. Режимы, называемые как неустойчивое кипение, характеризуются большими колебаниями температуры поверхности и интенсивности теплообмена. Процесс неустойчивости при кипении жидких металлов является следствием высокой интенсивности теплообмена при конвективном движении и низких приведённых давлений (p/p_c). В результате возникает затягивание естественной конвекции за счет расширения температурного диапазона ее существования, и возникает возможность нерегулярного перехода от режима кипения к естественной конвекции и обратно [5, 8].

2.1.2 Методика экспериментов по кипению жидких металлов

Следует отметить, что в начале работ по кипению металлов (1955–1957 гг.) не были известны даже грубые значения упругости паров натрия, калия и других металлов при высоких температурах (~1000 °С). Такие измерения были осуществлены в ФЭИ для натрия при 800÷1300 °С и калия при 550÷1280 °С [12, 13]. Полученные зависимости были использованы для обработки первых опытов по кипению металлов. Дальнейшие си-

стематические исследования упругости паров металлов и других свойств были выполнены в ИВТ РАН [15].

В 60-е годы для исследования кипения щелочных металлов в большом объеме в ФЭИ была сооружена установка, в которой нагрев поверхности осуществлялся электронной «лампой» мощностью до 20 кВт. Исследовалось кипение на поверхностях из различных материалов. Температура поверхности измерялась микротермопарами. Проводилось рентгеновское фотографирование процесса кипения металла. Первые опыты показали ряд «особенностей» этого процесса. Было установлено, что в большинстве случаев отличия кипения металлов от кипения обычных жидкостей (вода, спирты и др.) связаны с низкими рабочими давлениями и высоким поверхностным натяжением металлов [14].

В настоящее время известны три основных метода экспериментального определения коэффициентов теплообмена в жидких металлах:

- метод теплообменника, включающий измерение четырех температур на концах теплообменника с известной поверхностью и простым поперечным сечением, например, труба в трубе;
- метод измерения температуры стенки или метод электронагрева, основанный на измерении температуры в потоке металла;
- метод измерения распределений температуры в потоке металла.

Последний метод, хотя и является самым сложным, характеризуется следующими преимуществами по сравнению с остальными методами:

- возможность проведения прямого сравнения экспериментальных данных с расчетными данными;
- исключение влияния термического сопротивления на границе стенки с жидким металлом и возможность измерения его величины.

При постоянном тепловом потоке через стенку, коэффициент теплообмена находится из выражения:

$$\alpha = q / (t_w - \bar{t}_f). \quad (1)$$

Здесь $\bar{t}_f$ – средняя температура теплоносителя, определяемая интегрированием измеренного распределения температуры:

$$\bar{t}_f = 2 \int_0^1 t(\xi) u(\xi) d\xi, \quad (2)$$

где $t(\xi)$ – распределение температуры по радиусу трубы; $u(\xi)$ – безразмерный профиль скорости, $\xi = r/R$ – относительный радиус.

Таким образом, коэффициент теплообмена определяется лишь из измерения поля температуры и известного распределения скорости:

$$\alpha = -\lambda \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=R} / \left[t_w - 2 \int_0^1 t(\xi) u(\xi) \xi d\xi \right]. \quad (3)$$

Выполнение экспериментов по кипению металлов потребовало решения таких проблем как высокие температуры и плотности тепловых потоков, необходимость измерения малых разностей температуры, необходимость специальных конструкционных материалов для опытной установки, обеспечение тщательного контроля чистоты металла.

Обычно разница температур в опытах с жидкими металлами составляет несколько градусов при достаточно высоком уровне температуры. В этих условиях на корольке термопары наблюдается существенный перепад температуры. Увеличение разности температур возможно, если повысить плотность теплового потока с помощью мощных электрических нагревателей, теплового клина или обогрева другим теплоносителем. Снижение уровня температуры достигалось путем использования металлов с достаточно низкой температурой плавления, например, эвтектических сплавов типа Na-K ($t_{пл} = -12\text{ }^{\circ}\text{C}$) или Pb-Bi ($t_{пл} = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Для измерения малых разностей температуры в ФЭИ были разработаны микротермопары в капиллярных чехлах из нержавеющей стали диаметром до 0,2 мм [15, 16]. Спай микротермопары в виде плоской лопаточки 0,1 мм заделывается вблизи поверхности теплообмена во фрезерованные канавки. Затем производится напыление материала стенки и обработка поверхности. Позже было налажено полупромышленное производство микротермопар из стандартного термопарного кабеля. Для измерения профилей температуры непосредственно в потоках теплоносителей была разработаны конструкции передвижных зондов, одна из которых показана на рис. 4 [17].

Для очистки теплоносителей от примесей и продуктов коррозии была разработана технология, включавшая отстаивание, использование фильтров, холодных и горячих ловушек разного типа. Это позволило получать содержание примесей не более 5–10 ppm, т. е. $(5-10) \cdot 10^{-4}\text{ } \%$.

Была успешно решена задача создания работоспособных циркуляционных стенов для жидких металлов. Для этого были разработаны спиральные электромагнитные насосы для щелочных металлов, центробежные насосы со специальными уплотнениями, созданы электромагнитные расходомеры для жидких металлов.

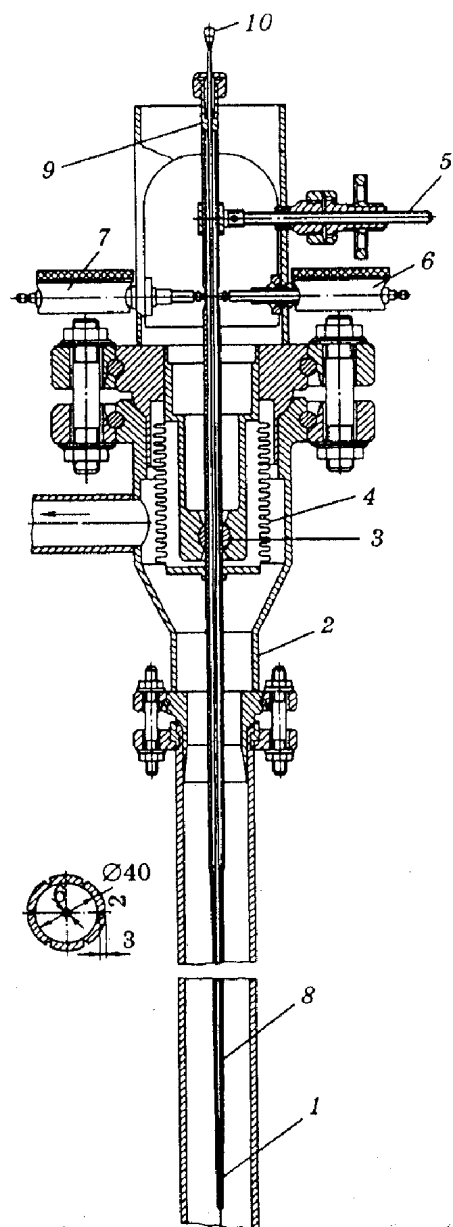


Рис. 4. Термозонд для измерений профилей температуры жидкого металла: 1 – термопарный зонд, 2 – корпус камеры, 3 – шарнир, 4 – сильфон, 5 – винт, 6, 7 – индикаторы, 8 – защитный чехол, 9 – сальник, 10 – термоэлектроды

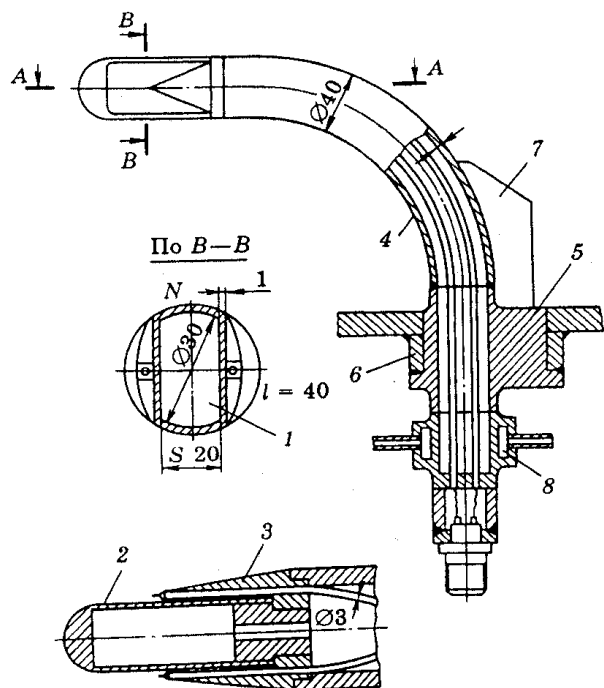


Рис. 5. Расходомер Ду-300 для сплава Pb-Bi:
1 – магнит, 2 – чехол, 3 – переходник,
4 – трубка, 5 – втулка, 6 – штуцер, 7 – ребро жесткости, 8 – замораживатель сплава

Для быстрых реакторов наряду с данными по теплообмену при кипении жидких металлов в большом объеме и в каналах большое значение имеет оценка устойчивости процесса кипения в параллельных каналах, связанных между собой, то есть в ячейках ТВС. С конца 90-х годов в ФЭИ проводятся исследования процессов кипения жидких металлов в условиях естественной циркуляции в модельных сборках ТВС быстрого реактора.

Экспериментальная установка для проведения исследований кипения эвтектического натрий-калиевого сплава (22 % Na + 78 % K) в условиях естественной конвекции (рис. 6) содержит два вертикальных канала высотой 3 метра, соединенных между собой сверху и внизу и образующих соответственно опускную и подъемную ветви контура циркуляции. В нижней части подъемного канала расположен рабочий участок, содержащий семистержневую сборку имитаторов твэлов. Сборка состоит из 7 имитаторов и 12 стержней-вытеснителей, расположенных в треугольной решетке с относительным шагом $s/d = 1,185$ и заключенных в трубу из нержавеющей стали $50 \times 1,5$ мм длиной 3 м [93, 94].

Имитаторы твэлов представляют собой калиброванные трубки заводского изготовления из нержавеющей стали марки X18H10 диаметром 8×1 мм, внутри которых установлены спиральные нагреватели из молибденовой проволоки диаметром 1 мм. Диаметр спирали 4 мм, длина 420 мм. Зазор между нагревателями и оболочками имитаторов заполнен порошком из плавленной окиси магния.

Оснащение модельной сборки ТВС значительным количеством измерительных каналов, содержащих различные первичные преобразователи (датчики), позволило получить обширный экспериментальный материал для исследования процесса кипения жидкометаллического теплоносителя в сборке электрообогреваемых имитаторов твэлов.

Большие проблемы имели место при разработке расходомера для Pb-Bi сплава (рис. 5), так как на его поверхностях, контактирующих с этим сплавом возможно образование слоев с высоким электрическим сопротивлением [18, 19].

В конце 60-х годов в ФЭИ были спроектированы и сооружены несколько установок для экспериментов при естественной и принудительной циркуляции натрия и калия. Освоенная техника эксперимента на высокотемпературных установках при температурах до 1000°C позволила получить данные о теплообмене при кипении натрия и калия в трубе при разных способах обогрева (металлом или электричеством) [20, 21]. Подобные исследования проводились другими исследователями как В.М. Боришанский и др. [22], И.Т. Аладьев и др. [23], Ю.А. Зейгарник и В.Д. Литвинов [24].

Выбор эвтектического Na-K сплава в качестве теплоносителя для модельной ТВС был обусловлен следующими факторами:

- низкая температура плавления сплава (-12°C), которая устраняет необходимость разогрева трубопроводов и оборудования при проведении опытов, в отличие от экспериментов по кипению натрия (96°C);
- более низкая температура кипения ($\sim$ на 100°C ниже по сравнению с Na), что упрощает проведение экспериментов и позволяет использовать менее тугоплавкие конструкционные материалы;
- термодинамическое подобие сплава и натриевого теплоносителя.

В результате анализа, проведенного в работе [48], показано, что экспериментальные результаты по теплообмену при кипении эвтектического Na-K сплава могут быть использованы при расчете теплообмена при кипении для натуральных реакторных условий с охлаждением натрием.

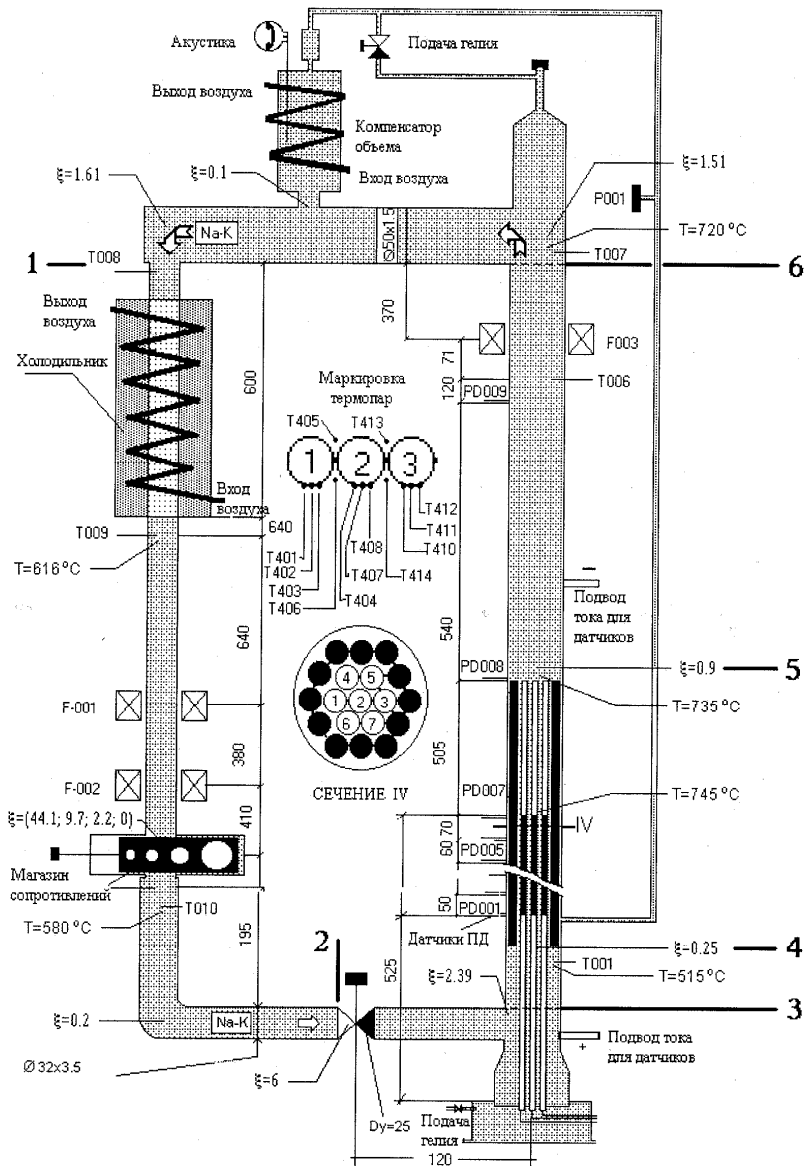


Рис. 6. Схема модельной ТВС, охлаждаемой эвтектическим Na-K сплавом, для исследования процессов кипения жидких металлов

2.1.3 Теплообмен при кипении жидких металлов в большом объеме

Характеристики экспериментальных исследований теплообмена при кипении жидких металлов в большом объеме приводятся в таблице 1 [25–46].

Основное влияние на коэффициент теплообмена при кипении оказывают тепловой поток, давление насыщения и состояние поверхности нагрева. Влияния содержания кислорода на теплообмен при кипении щелочных металлов четко не обнаружено. Существуют различные режимы кипения в большом объеме. Участок кривой кипения, соответствующий теплообмену путем естественной конвекции, в случае жидких металлов имеет значительно большую протяженность, чем в случае обычных жидкостей. При постепенном увеличении плотности теплового потока реализуются условия, когда теплообмен внезапно переходит из режима естественной конвекции в режим пузырькового кипения с меньшим перегревом стенки.

Таблица 1. Характеристики экспериментальных исследований теплообмена при кипении жидких металлов в большом объеме

Автор, год	Металл	Экспериментальные условия			
		P , МПа	q , МВт/м ²	Характеристики рабочего участка	Режим
Фармер [25] (1952)	РТУТЬ	0,0008		Горизонтальная пластина из меди	Развитое кипение
Лайон и др. [26] (1955)		0,1	0,08÷0,3	Горизонтальная труба из нержавеющей стали Ø 19 мм	Развитое кипение
Корнеев [27, 28] (1955)		0,1÷1	0,06÷0,715	Вертикальные трубы из углеродистой стали Ø 22 мм	-
Бонилла и др. [29] (1957)		0,007÷0,21	0,04 ÷0,54	Горизонтальная пластина низкоуглеродистой стали Ø 70 мм	-
Лунарддини [30] (1963)		0,07÷0,1	0,107÷0,315	Горизонтальная пластина из нержавеющей стали	-
Бонилла и др. [31] (1965)		0,1	0,031÷0,315	Горизонтальная пластина из низкоуглеродистой стали Ø 70 мм	-
Митиеси и др. [32] (1975)		0,1	0,105÷0,5	Горизонтальный цилиндр	Развитое кипение
Вагнер и Ликоудис [33] (1981)		0,1	0,3	Горизонтальная пластина из нержавеющей стали Ø 60 мм	Развитое кипение
Лайон и др. [26] (1955)	НАТРИЙ	0,1	0,047÷0,41	Горизонтальная труба из нержавеющей стали	Развитое кипение
Нойс [34] (1963)		0,007÷0,056	0,09÷2,55	Горизонтальная труба из нержавеющей стали, молибдена Ø 9,5 мм, L = 76 мм	Развитое кипение
Боришанский и др. [22] (1965)		0,016÷0,125	0,015÷0,145	Горизонтальная и вертикальные трубы из нержавеющей стали Ø 20÷40 мм, L=160÷200 мм	Развитое кипение

Автор, год	Металл	Экспериментальные условия			
		<i>P</i> , МПа	<i>q</i> , МВт/м ²	Характеристики рабочего участка	Режим
Марто и Розенов [35] (1966)	НАТРИЙ	0,008	0,17÷0,76	Горизонтальный диск из никеля Ø 63,5 мм	-
Деев и др. [36] (1967)		0,0005÷0,075	0,093÷2	Горизонтальная плотность нержавеющей стали	Развитое кипение
Петухов, Ковалев и др. [37] (1967)		0,001÷0,082	0,1÷1,75	Горизонтальная труба из нержавеющей стали Ø 29,6 мм, L = 58 мм	Развитое кипение
Субботин, Сорокин и др. [4] (1969)		0,01÷0,1 до 0,03 0,03÷	0,1÷3,5 от 0,1 до <i>q</i> _{кр} от 0,1 до <i>q</i> _{кр}	Горизонтальный диск из нержавеющей стали Ø 38 мм То же То же	Кипение под дав- лением собствен- ных паров (раз- витое кипение) Кипение под дав- лением аргона (свободная кон- векция)
Фуджиширо и др. [38] (1971)		0,002÷0,21	0,232÷0,7	Горизонт. пластина из никеля Ø 40 мм	-
Ковалев и Жуков [39] (1973)		0,001÷0,005	0,504÷1,4	Горизонтальный цилиндр из нержав. стали Ø 21,5 мм	Развитое кипение
Сакураи и др. [40] (1978)		0,002÷0,03	1,1÷2,8	Горизонт. цилиндр из Инконеля Ø 7,6; 10,7 мм	Развитое кипение
Бонилла и др. [41] (1963)	КАЛИЙ	0,0003÷0,2	0,05÷0,35	Горизонтальная пластина из никеля Ø 78 мм	Развитое кипение
Колвер и Бальжизер [42] (1964)		0,063÷0,098	0,315÷2,2	Горизонтальная труба Ø 9,5 мм	Развитое кипение
Боришанский и др. [22] (1965)		0,004÷0,115	0,017÷0,16	Горизонтальная и верти- кальные трубы из нержа- вующей стали Ø 20÷40 мм, L = 160÷200 мм	Развитое кипение
Субботин и др. [4] (1969)		0,0003÷0,2	0,058÷0,35	Горизонтальная пластина из нержавеющей стали, никеля	Развитое кипение
Такенака [43] (1984)		0,004÷0,013	0,82	Горизонт. цилиндр из Инконеля Ø 7,8 мм	Развитое кипение
Михиеси и др. (1985), (1986)		0,004÷0,1	0,12÷1,6	Горизонтальная пластина из никеля Ø 40 мм	Развитое кипение
Лайон и др. [26] (1955)	СПЛАВ Na-K	0,1	0,046÷0,41	Горизонтальная труба из нержавеющей стали	Развитое кипение (Сплав 56-59% K)
Мадсен, Бонилла [46] (1960)		2,7·10 ⁻³ ÷0,104	0,063÷0,425	Горизонтальная пластина из никеля	Развитое кипение (Сплав 56 % Na, 44 % K)
Субботин, Сорокин и др. [4] (1969)	ЦЕЗИЙ	0,002÷0,01 0,01÷0,32	0,4÷1,4 от 0,1 до <i>q</i> _{кр}	Горизонтальный диск из нержавеющей стали Ø 38 мм	Развитое кипение

При низких давлениях и малых плотностях тепловых потоков может возникнуть неустойчивое пузырьковое кипение, при котором коэффициент теплообмена колеблется между значением для свободной конвекции и значением пузырькового кипения. Средние значения коэффициента теплообмена при неустойчивом кипении ниже, чем при установившемся режиме пузырькового кипения. Колебания температуры поверхности в этом режиме могут оказывать неблагоприятные влияния на конструкции.

В [4] коэффициент теплоотдачи при развитом пузырьковом кипении щелочных металлов в большом объеме описывается следующими зависимостями (рис. 7):

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= 4,96q^{2/3} \left(\frac{\lambda r \rho'}{\sigma T_s^2} \right)^{1/3} \left(\frac{p}{p_{кр}} \right)^{0,45} && \text{для } \frac{p}{p_{кр}} = 4 \cdot 10^{-5} \dots 10^{-3} \\ \alpha &= 0,62q^{2/3} \left(\frac{\lambda r \rho'}{\sigma T_s^2} \right)^{1/3} \left(\frac{p}{p_{кр}} \right)^{0,15} && \text{для } \frac{p}{p_{кр}} = 10^{-3} \dots 2 \cdot 10^{-2} \end{aligned} \right\}, \tag{4}$$

где λ , ρ' и σ – теплопроводность, плотность и поверхностное натяжение жидкой фазы соответственно, r – скрытая теплота парообразования. Формулы (4) пересчитаны в систему СИ из приведенных в первоисточнике соотношений в технической системе единиц. Согласно [4] эти формулы обобщают с точностью $\pm 20\%$ опытные данные для натрия, калия, цезия из [22] и калия из [41].

На основании принципа термодинамического подобия щелочных металлов, все теплофизические свойства (λ , r , σ , ρ , T_s) можно выразить через $p/p_{кр}$. Тогда формулы (4) примут более простой вид:

$$\alpha = Aq^{2/3} \left(\frac{p}{p_{кр}} \right)^n. \tag{5}$$

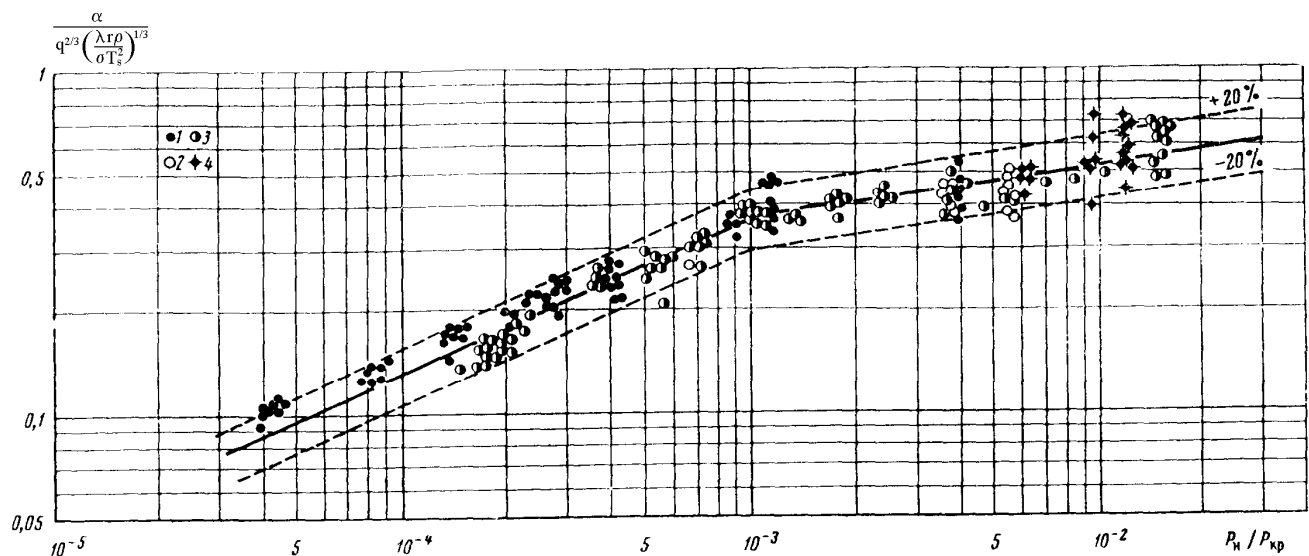


Рис. 7. Теплообмен при развитом пузырьковом кипении щелочных металлов в большом объеме: 1 – натрий; 2 – калий; 3 – цезий (данные [22]); 4 – калий (данные Бонилла и др. [41]).

Здесь использованы системы единиц: q – ккал/(м²·ч); α – ккал/(м²·ч·К)

Аналогичные эмпирические соотношения для расчета теплообмена при развитом пузырьковом кипении различных жидкометаллических теплоносителей в виде следующей формулы

$$\alpha = Aq^m p^n, \tag{6}$$

где q – плотность теплового потока, Вт/м²; p – давление, МПа, были предложены В.М. Боришанским и другими [22]. Значения коэффициентов A, m, n в формуле (6) для различных металлов приведены в таблице 2. Соотношения, задаваемые формулой (6) и таблицей 2 совпадают с формулами для пузырькового кипения воды и других жидкостей при $p = 0,1$ МПа, которые приведены таблице 3. Причиной данного сходства являются близкие величины скорости испарения: ($w_{ev} = q/r \cdot p''$) так как теплоты испарения на единицу объема разных жидкостей примерно одинаковы (см. таблицу 4).

Таблица 2. Значения коэффициентов в формуле (6) $\alpha=A \cdot q^m \cdot p^n$

Источник	Металл	(<i>P</i>) 10 ⁻³ , МПа	<i>A</i>	<i>m</i>	<i>n</i>	α, кВт/(м²·К)
Лайон и др. [26] (1955)	НАТРИЙ	100	–	–	–	17÷90
Нойс [34] (1963)		7÷56	26,7	0,58	–	
Боришанский и др. [22] (1965)		16÷125	1,3	0,7	0,15	в формуле (6) $p=P_s$
Субботин и др. [4] (1969)		10÷120	4,2	2/3	–	
		≤ 30	4,2	2/3	0,4	в формуле (6) $p=P_s$
		30	1,86	2/3	0,1	
Бонилла и др. [41] (1963)	КАЛИЙ	0,3÷200	1,7·10 ⁻³	0,885	0,293	в формуле (6) $p=P_s$
Боришанский и др. [22] (1965)		4÷115	0,56	0,7	0,15	в формуле (6) $p=P_s$
Субботин и др. [4] (1969)		0,3÷200	4,83·10 ⁻²	0,885	0,293	[α] – кал/(м²·ч) в формуле (6) $p=P_s$
Лайон и др. [26] (1955)	СПЛАВ Na-K	100	–	–	–	23÷76 (Сплав 56–59 % К)
Мадсен, Бонилла [46] (1960)		2,7÷104	210	0,2	0,2	в формуле (6) $p=P_s$ (Сплав 44 % Na, 56 % К)
Субботин и др. [4] (1969)	ЦЕЗИЙ	2÷10	0,098	2/3	0,4	в формуле (6) $p=P_s$
		102÷320	1,53	2/3	0,1	

Таблица 3. Формулы для расчета теплообмена при кипении металлов и жидкостей

Металлы	Жидкости
Для кипения калия в большом объеме и в трубах $\alpha = 3q^{0,7} p^{0,15}$	Для H ₂ O $\alpha = 4,75q^{0,7} P^{0,18}$
Для кипения магниевых амальгам $\alpha = 3,13q^{0,7}$ или $\alpha = 5,85q^{0,7}$	Для CCl ₄ $\alpha = 2,3q^{0,7}$

Здесь q – Вт/(м²·ч), α – Вт/(м²·ч·К) и p – МПа.

Таблица 4. Некоторые свойства разных жидкостей

Теплоноситель	p_c , МПа	p , МПа	p/p_c	r , кДж/кг	ρ'' , кг/м ³	$r\rho''$, кДж/м ³
Вода	22,1	0,10	0,0045	2257	0,597	1347
Калий	15,4	0,07	0,0045	1890	0,871	1646
Натрий	26,2	0,12	0,0046	3848	0,391	1505
Ртуть (магниева амальгама)	166	0,20	0,0012	293	7,58	2220
Четыреххлористый углерод CCl ₄	4,56	0,10	0,022	189	7,1	1340

Таким образом, с точностью $\pm 50\%$ теплообмен при кипении не только термодинамически подобных металлических, но и других жидкостей описывается практически одинаковыми соотношениями. Этот факт может явиться предметом более пристального рассмотрения при создании общей теории кипения жидкостей.

В таблице 5 приведены в качестве примера экспериментальные данные по теплообмену при кипении ртути в большом объеме в условиях свободной конвекции для наружной поверхности вертикальной трубы диаметром 21 мм [92].

Таблица 5. Экспериментальные данные по теплообмену при кипении ртути в большом объеме в условиях свободной конвекции для наружной поверхности вертикальной трубы диаметром 21 мм [2]

Удельная тепловая нагрузка q , ккал/(м ² ч)	$t_{\text{нас}}^{\text{рт}}$, °C	$t_{\text{нар}}^{\text{ст}}$, °C	$\Delta t_{\text{ст-рт}}$, °C	α , ккал/(м ² ·ч·K)
15000	357,45	350,85	2,4	6250
19100	357,2	362,45	5,25	3635
28500	357,0	367,3	10,3	2768
31200	356,1	370,6	14,5	2150
35090	357,7	378	20,3	1730
45000	356,7	387,2	30,5	1475
49500	357,0	399,25	42,25	1171
57200	356,8	410,8	54,0	1060
63700	357,3	438,35	81,05	785
75350	357,15	489,4	132,25	570
77000	357,4	672,95	315,55	255,5
15370	357,7	360,65	3,0	5100
23000	358,8	366,8	8,0	2873
29680	357,5	375,85	18,35	1620
38670	358,65	388,9	30,25	1280
45000	358,25	415	56,75	796
55200	359,7	464,2	104,5	528
64800	359,4	535,1	175,7	369
75000	360,2	690,6	330,4	227
55500	358,3	400,3	42,0	1320
59300	358,3	443,3	85,0	700
67000	360,1	517,1	157,0	426
72000	358,1	576,1	221,0	326
74600	360,1	618,1	258,0	289

$t_{\text{нас}}^{\text{рт}}$ – температура насыщения ртути, °C; $t_{\text{нар}}^{\text{ст}}$ – температура наружной поверхности стенки, °C; $\Delta t_{\text{ст-рт}}$ – температурный напор между стенкой и ртутью, °C; α – коэффициент теплоотдачи, ккал/(м²·ч·K).

Боришанским В.М. и др. [5] предложено проводить сопоставление данных при кипении жидких металлов в большом объеме в критериях подобия на основе следующей зависимости:

$$Nu = 8,7 \cdot 10^{-4} Pe^{0,7} K_p^{0,7}, \tag{7}$$

где $Nu = \alpha l/\lambda'$; $Pe = (q/rp'')c\rho' l/\lambda'$; $K_p = p/K_p^{0,7} = p\sqrt{\sigma g(\rho' - \rho'')}$; $l = \sqrt{\sigma/g(\rho' - \rho'')}$.

Здесь верхние индексы в виде одного штриха и двух штрихов относятся, соответственно к жидкой и паровой фазам. Обобщение известных экспериментальных данных также выполнено в работах [47, 48]. Сопоставление опытных данных по теплообмену при кипении жидких металлов в критериях подобия приводится на рис. 8.

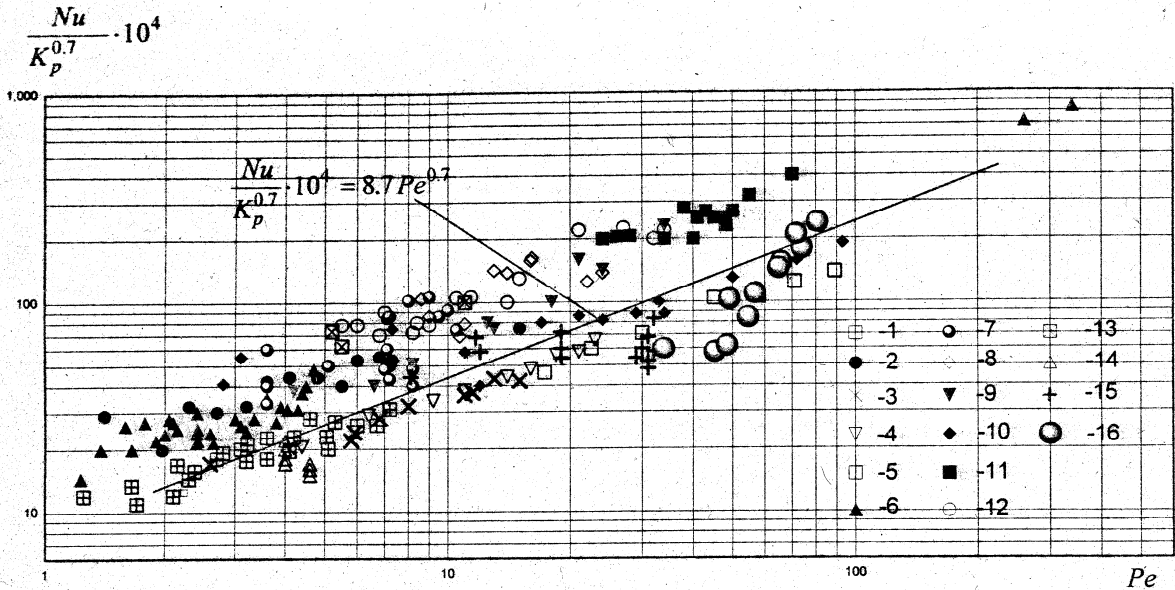


Рис. 8. Сопоставление опытных данных по теплообмену при кипении жидких металлов в критериях подобия:

1, 2, 3, 4, 5 – кипение калия в большом объеме при $p=1,2; 1,1; 0,7; 0,4; 0,04$ атм [22 – Боришанский, 1965]; 6, 7 – кипение натрия в большом объеме при $p=1,0; 0,472$ атм [22]; 8, 9 – кипение натрия в большом объеме при $p=0,26; 1,0$ атм [26 – Lyon et al., 1955]; 10 – кипение натрия в большом объеме [22]; 11 – натрий, щель $\varnothing=2$ мм [22]; 12 – натрий, щель $\varnothing=4$ мм [22]; 13 – натрий, щель $\varnothing=1$ мм [22]; 14, 15 – калий, труба $\varnothing=22; 8,3$ мм [цит. по 48 – Корхову и др., 1997]; 16 – 7-стержневой пучок ФЭИ [цит. по 48 – Корхову и др., 1997]

2.1.4 Теплообмен при кипении жидких металлов в каналах

Схема режимов течения при стационарном кипении жидкого металла в канале (труба прямоточного генератора при $x_{in} < 0$ и $x_{out} = 1$) показана на рис. 9. В режиме I происходит переход от однофазного течения к двухфазному состоит в периодическом возникновении на единичном центре парообразования снарядов, последующем их отрыве и уносе. Сразу за сечением закипания II следует снарядный режим течения III, который переходит затем в кольцевой IV, дисперсно-кольцевой V и дисперсный VI режимы [49].

При вынужденном течении парожидкостной смеси металлов в трубе (при давлениях около $\sim 0,1$ МПа) уже при массовых паросодержаниях 0,01–0,05 наступает дисперсно-кольцевой режим. Он характеризуется тем, что 95–99 % жидкости находится в виде капель в центральной области потока. Коэффициент теплообмена при таких условиях имеет примерно такую же величину, что и при кипении в большом объеме.

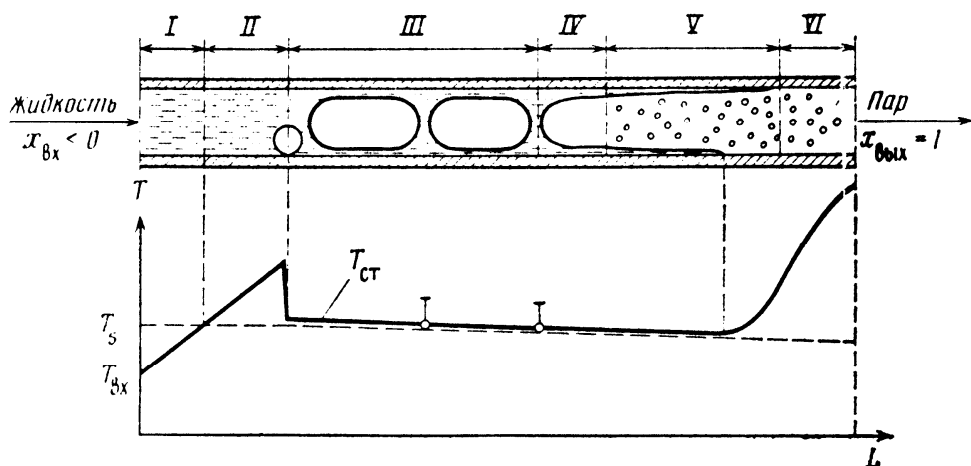


Рис. 9. Режимы течения жидкого металла в канале

Предполагается, что в дисперсно-кольцевом режиме фазовый переход связан с испарением с поверхности пристенной пленки жидкого металла, поскольку она имеет малую толщину и высокую теплопроводность [24]. Влияния массовой скорости и паросодержания на теплообмен, по-видимому, несущественны. Выполненные эксперименты [6] подтвердили это предположение – коэффициент теплоотдачи при кипении натрия в широком диапазоне плотностей теплового потока ($q=0,2 \dots 1,1$ МВт/м²) оставался по существу неизменным и равным $(2,5 \dots 4)10^5$ Вт/(м² К).

Однако в опытах [23] при кипении калия наблюдалась хорошо известная зависимость $\alpha \sim q^{0,7}$ (рис. 10), причем, как и для неметаллических жидкостей, эта зависимость оказалась близкой к случаю кипения в большом объеме. Совпадение зависимости

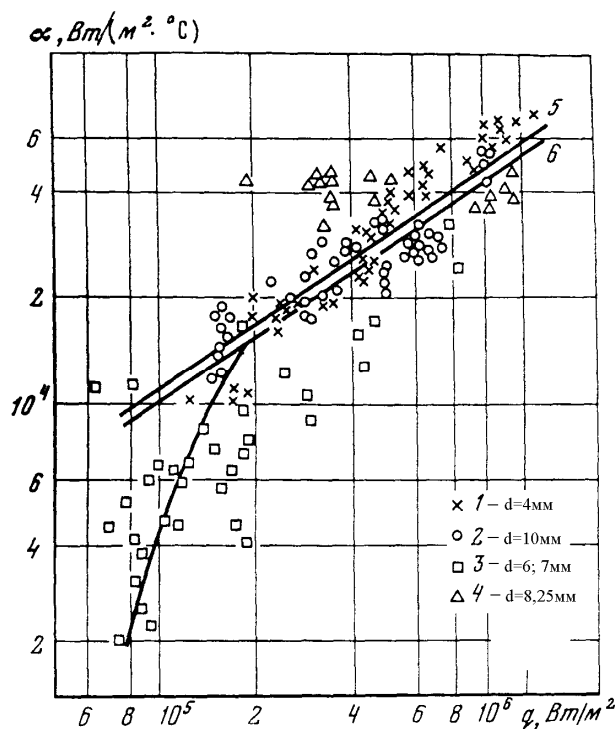


Рис. 10. Теплообмен при кипении калия в трубах [6, 21–24]. Диаметр трубы, мм: $\times$ – 4, $\square$ – 6 и 7, $\triangle$ – 8,25

$\alpha(q)$, полученное в опытах с кипением жидкого металла в большом объеме и в трубах скорее не случайно. Аналогичное совпадение имеет место при кипении воды, а именно: теплообмен при кипении в каналах и умеренных скоростях смеси соответствует соотношениям для теплообмена при кипении воды в большом объеме. При малых скоростях пароводяной смеси $\alpha \sim q^{0,7}$, а при больших – $\alpha \sim w^{0,8}$, как это наблюдается при конвекции. Однако такое заключение пока не может быть окончательным, поскольку коэффициенты теплообмена жидкого металла при кипении и при конвекции не отличаются сильно $\alpha_{\text{кип}}/\alpha_{\text{конв}} = 0,6 \div 2,5$, хотя совершенно разный характер процессов с точки зрения гидродинамики очевиден.

Из рис. 9 также видно, что опытные данные в режимах с малой неустойчивостью (небольшие q) имеют большой разброс и, как правило, оказываются ниже значений, полученных в условиях устойчивого кипения. Сегодня остаются неясными причины, которые обусловили различия механизмов фазового перехода в экспериментах [6] и [22, 23]. Этот вопрос требует дополнительного исследования.

Многие исследователи полагают, что оба механизма парообразование (α_b) и конвекция ($\alpha_{\text{кон}}$) проявляются так, что их вклады суммируются

$$\alpha = \alpha_b \cdot S + \alpha_{\text{кон}} \cdot F, \tag{8}$$

где S – коэффициент подавления пузырькового кипения; $F=f(X_{tt})$ – функция параметра Мартинелли (эффект усиления конвекции).

$$X_{tt} = \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0,9} \left(\frac{\rho''}{\rho'}\right)^{0,5} \left(\frac{\mu'}{\mu''}\right)^{0,1}. \tag{9}$$

Сравнение экспериментальных данных на воде и калии в координатах $\alpha_{\text{кип}}/\alpha_{\text{кон}}=f(1/X_{tt})$ дается на рис. 11 [8].

Опытные данные ФЭИ, а также Оук Ридж и Дженерал Электрик, взятые из [50], хорошо согласуются между собой и сильно отклоняются от групп точек, характеризующих двухфазные водяные смеси (как кипящие, так и не кипящие).

Ченом [50, 51], обнаружил интересный эффект при кипении дисперсно-кольцевого потока металла в трубах, который был затем подтвержден исследователями из ФЭИ [21]. Распределение температур по длине и сечению канала для этого случая, измеренное экспериментально, показано на рис. 12.

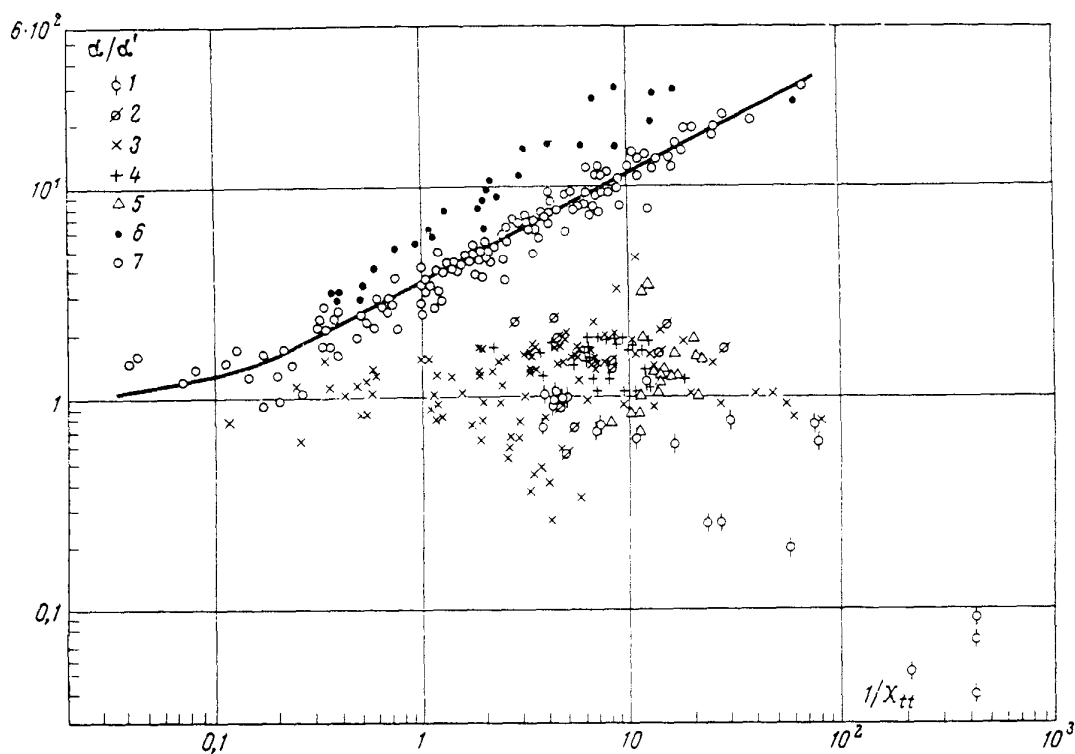


Рис. 11. Сравнение экспериментальных данных на воде и калии в координатах $\alpha_{\text{кип}}/\alpha_{\text{кон}}=f(1/X_{tt})$:
 1, 2 – средние значения (ФЭИ); 3 – локальные значения (ФЭИ); 4 – Оук Ридж;
 5 – Дженерал Электрик; 6, 7 – вода (кипящий и адиабатический двухфазные потоки)

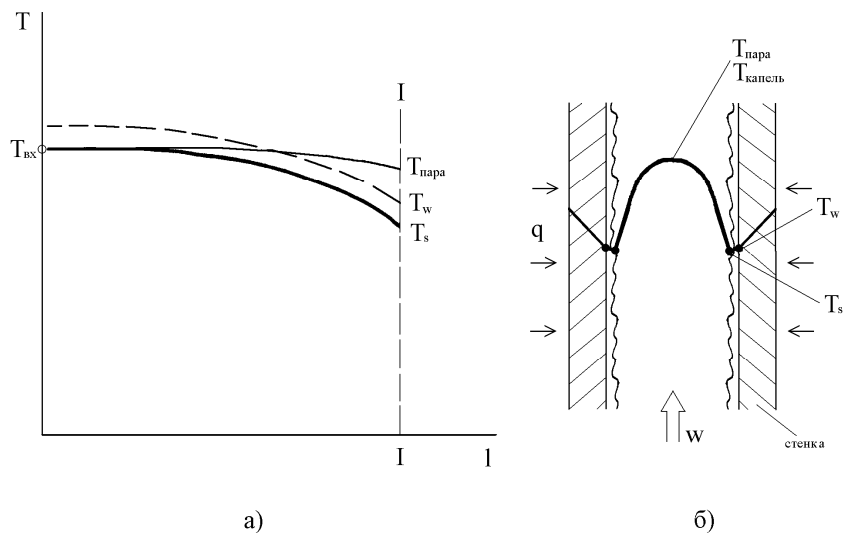


Рис. 12. Распределение температур в канале:
а) по длине канала; б) по сечению канала с кипящим металлом

Несмотря на подвод тепла, температура внутренней поверхности трубы оказывается ниже, чем температура ядра парожидкостного потока (рис 12). При больших скоростях парожидкостной смеси, в рассматриваемом сечении I-I, температура пара и капель близки к температуре насыщения на входе в трубу T_s . Температура капель фиксируется термомпарой, установленной в ядре потока. Таким образом, температура внутренней поверхности трубы практически отслеживает изменение T_s , превышая её на несколько градусов, ибо перепад температуры на тонкой плёнке жидкого металла (Na, K) составляет всего несколько градусов. Надо с осторожностью оценивать коэффициент теплообмена в таких неравновесных условиях. Предстоит еще проанализировать рассмотренный эффект, его роль и корректный метод расчета коэффициента теплообмена в таких условиях.

Общий вывод, который напрашивается на основании этих фактов, состоит в том, что роль процесса испарения при кипении в теплообмене двухфазной металлической смеси невелика. Таким образом, приходим к противоречию. Однако это противоречие кажущееся, ибо коэффициент теплообмена при кипении металлов в большом объёме и коэффициент теплообмена при турбулентном течении металла в трубе при тех скоростях, которые были в опытах, имеют одинаковый порядок. На данном уровне наших знаний не представляется возможным разделить области преимущественного влияния конвекции и кипения, как это сделано для воды.

При кипении металлов в каналах при величинах паросодержаниях (x), равных уже нескольким процентам, наступает дисперсно-кольцевой режим. Это является следствием низких приведенных давлений $p/p_{кр}$. Фазовый переход в этом случае, как правило, осуществляется испарением металла с поверхности пристенной пленки без образования пузырьков пара на стенке. Это связано с малой толщиной и высокой теплопроводностью жидкой пленки. Эффективные коэффициенты теплообмена при этом достигают сотен $\text{кВт/м}^2\cdot\text{К}$. Влияние массовой скорости и массового паросодержания невелико. В неустойчивых (пульсирующих) потоках металлов коэффициенты теплообмена ниже, чем в стационарных потоках.

Характеристики проведенных экспериментальных работ по исследованию теплообмена при кипении жидких металлов в трубах приводятся в таблице 6 [52–71].

Таблица 6. Характеристики экспериментальных исследований теплообмена при кипении жидких металлов в трубах

Автор, год	Металл	P, МПа	d, мм	L, м	L/d	G, кг/(м ² с)	χ	q, МВт/м ²	α, кВт/(м ² К)
Стырикович и Семеновкер [52] (1940)	РТУТЬ	0,35÷2,2	20÷50	–	–	694÷42000	0÷0,035	0,03÷0,15	
Ложкин и Канаев [53] (1946)		0,12÷0,16	16	1,475	92	3770÷7770	0,001÷0,039	<0,03	0,232÷0,7
Ромье и др. [54] (1960)		0,068÷0,255	5,56	0,102	18,3	3000÷12000	0,001÷0,1	0,073÷2	22÷53
Гельман и Копп [56] (1965)		0,03÷2,2	13,4; 20,2	0,435	20,5; 32,4	1360÷5300	0,47	0,137÷2,4	1÷500
Корнеев [57, 58] (1955)	Ам. магния	0,1÷1,1	24; 40	0,82	20,5÷34	50÷972	0,044÷0,12	0,0093÷0,023	1,5÷2,0
Тонг и др. [59] (1964)	КАЛИЙ	–	7,74	0,168	21,8	–	–	0,13-1,2	2,8÷6,5 (ам. калия)
Гофман и Краковяк [60] (1962)		0,1	8,25; 22,1	0,305; 1,83	135÷42	125÷290 20÷50	0,11÷0,76 0,32÷0,81	0,185÷1,1 0,097÷0,12	35÷50 8÷15
Бонилла и др. [41] (1963)		3·10 ⁴ ÷0,2	78	–	–	–	–	0,058÷0,35	
Лонго и Брукс [61] (1963)		0,56	23,6	1,71	72,7	70÷811	0,1÷0,65	1,42	5,8÷62,64
Берзин и Хоран [62] (1964)		0,014÷0,225	7,9	1,53	194	55÷140	0,45÷1,0	0,058÷0,23	5÷50
Беренсон и Киллиаки [63] (1964)		0,16÷0,32	4,57	0,325	71	75÷550	0,23÷0,96	1,35	37÷203
Бернштейн и Петрик [64] (1964)		0,294÷0,49	4,73	–	–	120÷180	0÷1,0	0,05÷0,2	0,6÷600
Бернштейн и Рендалл [65] (1964)		0,296÷0,44	4,73	0,25	53	120÷180	0,1÷1,0	–	–
Боришанский и др. [22] (1965)		0,004÷0,115	20÷40	0,16÷0,2	5÷8	–	–	0,017÷0,16	–
Аладьев и др. [23] (1966)		0,01÷0,43	4	0,22; 0,33	50÷82	21,9÷270	0,04÷0,8	0,1÷1,4	7÷75

Автор, год	Металл	P, МПа	d, мм	L, м	L/d	G, кг/(м²с)	x	q, МВт/м²	α, кВт/(м² К)
Боришанский [22] (1966)	КАЛИЙ	0,042÷3,65	10	0,6; 0,8	60; 80	70÷1500	0,15	0,077÷0,7	
Грачев, Зеленский [21] (1968)		0,07÷0,44	6; 7	0,36÷0,56	60; 80	25÷570	0,05÷1,0	0,08÷1,0	3÷40
Аладьев и др. [67] (1974)		0,09÷2,0	4; 10	0,56÷2,86	140; 286; 242	14÷205	0,03÷0,84	0,03÷0,51	–
Горлов и др. [68] (1974)		0,2÷1,7	4	0,4	100	20÷660	0,02÷0,75	0÷1,8	–
Лайон, Фоуст, Катц [26] (1955)	НАТРИЙ	0,1	19	0,127	6,7	–	–	0,05÷0,41	–
Боришанский и др. [22] (1965)		0,016÷0,125	20÷40	0,16÷0,2	5-8	–	–	0,016÷0,145	6÷30
Марто, Розенов [35] (1965-1966)		0,008; 0,022; 0,055	63	–	–	–	–	0,116÷0,74	–
Нойс, Лурье [69] (1966)		0,007÷0,056	9,5; 6,4	0,076; 0,051	5,4÷12	–	–	0,09÷2,9	–
Петухов, Ковалев, Жуков [37] (1967)		0,0011÷0,082	29,6	0,058	2	–	–	0,116÷1,74	–
Деев и др. [36] (1967)		5·10 ⁻⁴ ÷7,5·10 ²	28	–	–	–	–	0,09÷2	–
Петухов, Зейгарник, Литвинов [70] (1970)		0,07÷0,19	3,5	0,77	220	165÷310	До 0,6	0,2÷0,7	15÷50
Зейгарник, Литвинов [24] (1975)		0,1÷0,2	5	0,725	145	150÷400	До 0,45	0,2÷1,05	Более 100
Лайон, Фоуст, Катц [26] (1955)	Сплав Na-K	0,1	19	0,127	–	–	–	0,05÷0,4	–
Мадсен, Бонилла [46](1960)		2,7·10 ⁻⁶ ÷0,104	78	–	–	–	–	0,06÷0,42	–
Нойс [34] (1963)		0,007÷0,056	9,5	0,076	–	–	–	До 2,5	–
Фишер [71] (1964)	Рубидий	0,12÷0,8	7	–	42	155÷1160	До 0,8	До 1,03	До 90
Кириллов [55] (1968)	Цезий	0,13÷0,53	7	0,5005	71,5	400÷850	0,07÷0,68	0,115÷0,7	20÷78

Различают четыре области теплоотдачи при кипении жидких металлов в каналах:

- 1) область перегрева жидкости (она может отсутствовать);
- 2) область развитого кипения (интенсивного теплообмена при $0 < x < x_{\text{lim}}$;
- 3) переходная область при $x'_{\text{lim}} < x < x''_{\text{lim}}$;
- 4) область ухудшенного теплообмена (закризисная область) при $x'_{\text{lim}} < x < 1$.

Область перегрева жидкости

Наличие перегрева связано с отсутствием на поверхности действующих центров парообразования. Для их активации необходим перегрев поверхности. Степень перегрева может быть оценена по формуле

$$(T_m - T_s)/T_m = (p_s/rp'') \ln(1 + 4\sigma/p_s d_m), \quad (10)$$

где $(T_m - T_s)$ – перегрев; p_s – Н/м²; r – Дж/кг; σ – Н/м²; d_m – диаметр шероховатости, м.

Область развитого кипения (интенсивного теплообмена)

Область развитого кипения охватывает паросодержания от нуля до x'_{lim} . Для расчета коэффициента теплоотдачи при кипении металлов в трубах можно воспользоваться формулами, полученными для случая кипения металлов в большом объеме. Для расчета теплового потока и паросодержания на границе между областью интенсивного теплообмена и переходной областью получены зависимости

$$q_{\text{lim}} = 0,0186 \frac{r\sigma g}{v} \left[\left(\frac{Gv}{\sigma} \right) \frac{d}{l} \sqrt{\frac{q_{\text{lim}}}{q_0}} \right]; \quad (11)$$

$$x'_{\text{lim}} = 0,064 \left[\left(\frac{Gv}{\sigma} \right) \frac{d}{l} \sqrt{\frac{q_{\text{lim}}}{q_0}} \right]^{-0,2}, \quad (12)$$

где q_0 – тепловой поток при $x = 0$, Вт/м²; l – длина зоны развитого кипения, м.

Другой метод расчета при кипении в каналах, предложенный Ю.А. Зейгарником и В.Д. Литвиновым [6], основывается на соотношении:

$$\Delta T_\alpha = q/\alpha = \Delta T_{\text{film}} + \Delta T_{\text{ph}}, \quad (13)$$

$$\Delta T_{\text{film}} \approx qd(1 - \phi)/4\lambda, \quad (14)$$

$$\Delta T_{\text{ph}} = [qT_s v'' (2\pi R T_s / M)^{0,5}] / r^2 \beta. \quad (15)$$

Здесь ΔT_{film} – перепад температуры в пленке, ΔT_{ph} – разность температур, обусловленная фазовым переходом при испарении, M – молекулярная масса; β – коэффициент испарения; R – универсальная газовая постоянная. Зная ΔT_α , можно найти и коэффициент теплообмена, если задана плотность теплового потока.

Для натрия имеется частное соотношение:

$$\Delta T_{\text{ph}} = 2,08 \cdot 10^{-4} [q (RT_s^5)^{0,5}] / [\beta r \exp(-12020/T_s + 21,94)], \text{ где } \beta = 1,67. \quad (16)$$

Разность $(1 - \phi)$ определяется из соотношения Арманда:

$$1 - \phi = \frac{4 + 8/7 \cdot m}{5 + \left(\frac{\beta}{1 - \beta} + 8/7 \right) \cdot m}, \quad (17)$$

$$\text{где } m = 4a(\text{Re}')^{0,125} \sqrt{\rho''/\rho'}; \quad a = 0,69 + (1-\beta)(4 + 21,9\sqrt{Fr_{l0}}); \quad \text{Re}' = \rho w(1-x)d/\mu'; \quad (18)$$

$$Fr_{l0} = [\rho w \cdot (1-x)]^2 / (\rho')^2 g \cdot d; \quad \beta = x\rho' / [x\rho' + (1-x) \cdot \rho'']. \quad (19)$$

Переходная область

Предполагается, что в переходной области часть поверхности (ω) омывается жидкостью, а остальная часть поверхности ($1 - \omega$) – паром.

$$\omega = (x''_{\text{lim}} - x') / (x''_{\text{lim}} - x'_{\text{lim}}), \quad (20)$$

где x – текущее массовое паросодержание; x'_{lim} – массовое паросодержание в начале переходной области; x'' – массовое паросодержание в конце переходной области, определяемое формулой:

$$x''_{\text{lim}} = 1 - 380(Gv/\sigma), \quad (21)$$

где G – массовый расход, v – скорость потока, σ – поверхностное натяжение.

Коэффициент теплообмена находят из соотношения

$$\alpha = \omega \left[\frac{1}{\alpha'} \left(\frac{q_{\text{lim}}}{q_0} \varpi \right)^{0,7} + \frac{s}{\pi \lambda_w} (1 - \varpi)^2 \right]^{-1} + \alpha'' (1 - \varpi), \quad (22)$$

где α' – коэффициент теплоотдачи в начале переходной области при $x + x'_{\text{lim}}$; α'' – коэффициент теплоотдачи к влажному пару; q – тепловой поток в соответствующем сечении; λ_w – коэффициент теплопроводности материала стенки; $s = 3,2 \cdot 10^{-3}$ м – эмпирическая величина.

Закризисная область (область ухудшенного теплообмена)

Коэффициент теплообмена в закризисной зоне с некоторым запасом (т. е. он будет несколько занижен) рассчитывается по формуле:

$$\text{Nu}'' = 0,023 (\text{Re}'')^{0,8} (\text{Pr}'')^{0,4}, \quad (23)$$

где все физические свойства относятся к сухому насыщенному пару.

Для парокалиевой смеси, текущей в змеевиковых трубах, при давлениях 0,1÷0,3 МПа получена формула:

$$\text{Nu}'' = 0,017 \text{Re}^{0,8} (pr_w)^{0,8} Y, \quad (24)$$

$$\text{где } \text{Re} = (Gd/\mu'') [1 + x (\rho'/\rho'' - 1)], \quad (25)$$

$$Y = 1 + 0,5(\rho'/\rho'' - 1)^{0,8}(1 - x) \text{ для } \rho'/\rho'' < 450, \quad (26)$$

$$Y = 1 + 70(1 - x) \text{ для } \rho'/\rho'' > 450. \quad (27)$$

Режимы кипения в модельной ТВС

Эксперименты по кипению эвтектического Na-K сплава проводились в модельной ТВС (рис. 6) при увеличении мощности энерговыделения имитаторов твэлов. Были исследованы режимы с естественной конвекцией в диапазоне массовых скоростей потока от 20 до 700 кг/(м²·с) и плотностей теплового потока до 260 кВт/м². Эксперименты показали существование трех самостоятельных режимов кипения: 1) пузырькового,

2) снарядного, 3) дисперсно-кольцевого. Дисперсно-кольцевой режим являлся предельным режимом кипения, который обеспечивает охлаждение тепловыделяющей сборки. При этом в снарядном режиме расход теплоносителя менялся между значениями для пузырькового режима кипения и дисперсно-кольцевого режима.

При переходе от пузырькового к дисперсно-кольцевому режиму происходит увеличение расхода теплоносителя в контуре циркуляции примерно в три раза. При тепловых потоках свыше 250 кВт/(м²·с) отмечалось падение расхода теплоносителя в контуре циркуляции и переход от дисперсно-кольцевого к дисперсному режиму кипения (закризисный теплообмен). Полученная карта режимов течения парометаллического потока для исследованной петли хорошо совпадала с картой режимов, которая была определена Ямагути [90] в экспериментах по кипению натрия в 37-стержневой сборке [93, 94].

Результаты опытов, проведенные в ФЭИ, показали, что при определенных условиях закипание жидкого металла не приводит к аварийной ситуации и сопровождается устойчивым теплосъемом с поверхности твэлов в течении продолжительного времени.

2.2 КРИЗИС ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ

2.2.1 Кризис теплообмена при кипении металлов в большом объеме

Основные различия между характеристиками кризиса теплообмена в жидких металлах и обычных жидкостях обусловлены разными значениями их коэффициентов теплопроводности и углов смачивания. Большую роль (по сравнению с обычными жидкостями) играет кризис, наступающий в области неустойчивого кипения, которое характерно для малых приведенных давлений (p/p_c). В жидких металлах при пузырьковом кипении значительная доля тепла отводится от поверхности за счет теплопроводности и конвекции.

Главные результаты по исследованию критических тепловых потоков (КТП) при кипении металлов в большом объеме изложены в монографии [4]. Принято считать, что тепловой поток при кипении складывается из трёх составляющих: 1) испарения q_r в паровой пузырь, 2) конвекции q_{con} к жидкости, окружающей пузырь, 3) теплопроводности в объем жидкости:

$$q = q_r + q_{con} + q_{\lambda} \quad (28)$$

Для обычных жидкостей последние две составляющие малы и не зависят от давления. Для жидких металлов ($q_{con} + q_{\lambda}$) $\approx q_r$ и зависит от давления (с ростом давления доля q_r увеличивается), поэтому учёт составляющих q_{con} и q_{λ} оказывается необходимым. Гидродинамическая модель кризиса кипения металлов (для большого объема) рассматривает наступление кризиса как результат нарушения устойчивости структуры пристенного двухфазного слоя, при условии $q_{cr} \cong q_r$. Величины q_{cr} , для кипения металлов в большом объеме, рассчитываемые по этой модели в 2 и более раз ниже экспериментальных.

В ходе исследований кризиса теплообмена в жидких металлах обнаружена зависимость КТП от начальных условий перехода к кризису. Так, при наступлении кризиса из режима неустойчивого кипения, величина КТП в 2 и более раз оказывается ниже, чем из режима устойчивого пузырькового кипения. Этот эффект учитывает формула

из [4], которая практически совпадает с формулой для КТП, предложенной С.С. Кутателадзе:

$$q_{cr} = A \cdot 0,14r \sqrt{\rho''} [g\sigma(\rho' - \rho'')]^{1/4}, \quad (29)$$

где r – удельная теплота парообразования (кДж/кг), ρ' , ρ'' – удельная плотность (кг/м³), соответственно, жидкости и пара, σ – поверхностное натяжение (Н/м). Однако формула (29) содержит поправку $A = 1 + q_f/q_v$ к формуле Кутателадзе, где $q_f = q_{\text{кон}} + q_\lambda$ и $q_v = q_\lambda$ – тепловые потоки, отводимые жидкостью и паром.

Авторы [4] получили для A соотношение:

$$A = 1 + \frac{C}{P_{cr}} \left(\frac{p}{p_c} \right)^{-0,4}, \quad (30)$$

где $C = 45$ для развитого кипения, $C = 18$ для неустойчивого кипения.

При низких давлениях число действующих центров парообразования мало и паровые пузыри велики по размерам. Поэтому кризис может наступить после прекращения охлаждения части поверхности под пузырьём пара при его росте, то есть $q_{cr} \sim dR/d\tau \sim \lambda^n$. С другой стороны, поскольку значительная часть тепла от поверхности передаётся в паровой пузырь через жидкость, можно предположить, что $q_{cr} \sim \lambda^n$. Учет всех этих факторов позволил вывести достаточно простую формулу для расчета КТП щелочных металлов и ртути, кипящих в большом объеме [36]:

$$q_{cr} = 0,66\lambda^{0,6} (p/p_c)^{1/6}, \text{ МВт/м}^2, \quad (31)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); $p/p_c = (10^{-4}) \div (3 \cdot 10^{-2})$. Таким образом, обобщение опытных данных по критическим тепловым нагрузкам для различных жидкостей целесообразно проводить в координатах $q_{cr} = f(p/p_c)$.

В ФЭИ были выполнены опыты по измерению КТП при кипении жидких металлов в условиях свободной конвекции для следующих металлов: натрий ($p = 1,5 \cdot 10^{-3} \div 0,15$ МПа), калий ($p = 10^{-3} \div 0,15$ МПа), цезий ($p = 1,8 \cdot 10^{-3} \div 0,35$ МПа) и рубидий ($p = 3,5 \cdot 10^{-3} \div 0,19$ МПа). Опытами был охвачен диапазон относительных давлений $p/p_c \approx 4 \cdot 10^{-5} \div 3 \cdot 10^{-2}$. В качестве рабочих элементов использовались плоские и цилиндрические нагреватели [4]. Обобщение этих экспериментальных по соотношению (31) приводится на рис. 13, из которого видно, что при $p/p_c < 10^{-3}$ разброс данных увеличивается. По-видимому, это является следствием неустойчивости режимов кипения при малых приведенных давлениях.

Критические тепловые потоки при кипении щелочных металлов в большом объеме могут оцениваться по следующей формуле [4]:

$$q_{cr} = B \cdot r (g \rho'')^{0,5} [\sigma (\rho' - \rho'')]^{0,25} \left[1 + \frac{C}{p_c} \left(\frac{p_c}{p} \right)^{0,4} \right], \quad (32)$$

где $B = 1,203$; $C = 4,5$ для развитого кипения и $1,8$ для неустойчивого; p_c – МПа; r – кДж/кг; ρ' , ρ'' – кг/м³; σ – Н/м; q_{cr} – Вт/м².

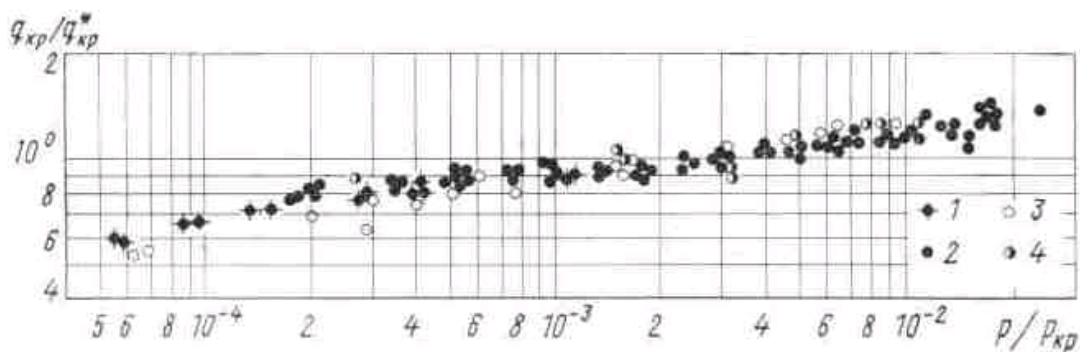


Рис. 13. Зависимость критических тепловых потоков для щелочных металлов от приведенного давления:

1 – натрий; 2 – цезий; 3 – калий; 4 – рубидий. Обобщение данных по формуле (31)

Критический тепловой поток при кипении натрий-калиевого сплава

В [73] исследовали КТП в условиях полностью развитого кипения натрий-калиевого эвтектического сплава (22 вес. % Na-78 вес. % K). Опыты были выполнены на гладкой поверхности горизонтального диска из нержавеющей стали диаметром 38 мм, расположенного в основании рабочего бака внутренним диаметром 70 мм. Полученные экспериментальные данные этих исследований даются на рис. 14, на котором для сравнения проведены две прямые линии. Прямая *A*, описываемая уравнением (31), построена на основе результатов, полученных в [73, 74, 75] для кипения натрия, тогда как прямая *B*, соответствует данным для кипения калия. Экспериментальные точки для Na-K сплава располагаются значительно выше прямых, соответствующих двум чистым компонентам. Такая особенность кипения характерна и для обычных жидкостей, когда один из компонентов значительно более летуч, чем другой.

Общепринятое объяснение указанного явления состоит в том, что при кипении чистой жидкости паровые пузыри быстро растут, проходя через перегретую жидкость, поскольку их температуры ниже температуры жидкости. Однако при кипении бинарной смеси температура паровых пузырей выше температуры жидкости, через которую они проходят, и поэтому их рост происходит иначе, чем в условиях непрерывного испаре-

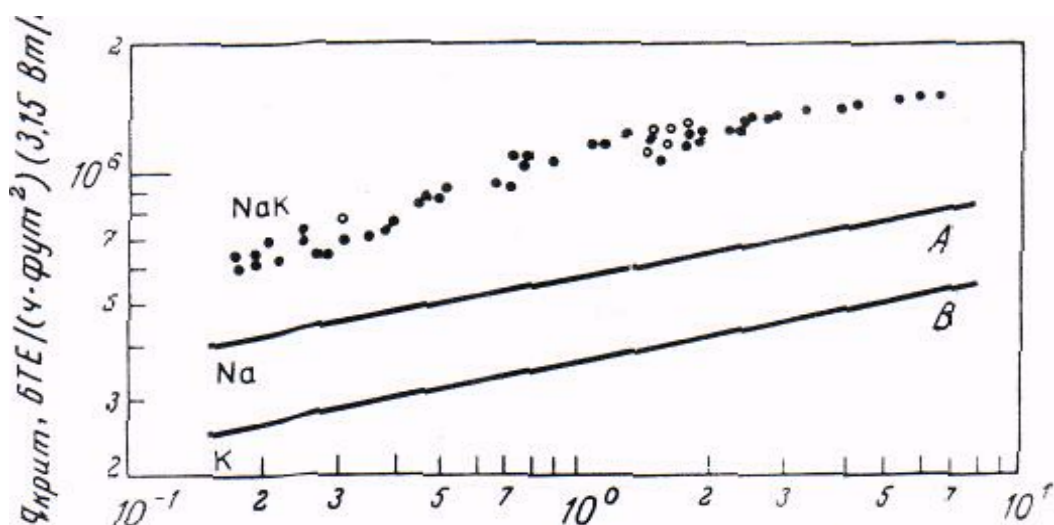


Рис. 14. Результаты измерений критических плотностей тепловых потоков в условиях полностью развитого кипения насыщенного 22 вес. % Na-78 вес. % K эвтектического сплава [73]

ния. Концентрация более летучего компонента в жидкости уменьшается при приближении к поверхности нагрева. Температура вновь образованных пузырей будет равна температуре стенки, которая выше температуры остальной массы жидкости. Струи мелких пузырей способствуют усилению контактного теплообмена с жидкой фазой, что приводит к более высоким значениям плотности теплового потока вплоть до прекращения режима пузырькового кипения.

Отсюда со всей очевидностью следует, что ни одно из соотношений для КТП описывающее опытные данные при кипении чистых компонентов, не будет пригодным для бинарных смесей, даже если использовать соответствующие физические свойства. Для значительного расширения наших представлений о КТП при кипении бинарных жидкометаллических смесей и понимания предмета исследования необходимо провести большую дополнительную экспериментальную работу.

Пленочное кипение

Тепловой поток при пленочном кипении может быть представлен в виде суммы двух составляющих $q = q_{\text{con}} + q_{\text{rad}}$, где $q_{\text{con}} = \alpha(t_w - t_s)$ – конвективная составляющая; $q_{\text{rad}} = \sigma_0 \epsilon_{\text{eff}} (T_w^4 - T_s^4)$ – составляющая, связанная с излучением через паровую пленку (рассчитывается по формулам теплообмена излучением)

Конвективная составляющая рассчитывается по соотношению:

$$\text{Nu}_f = A (Ra^* \theta')_f^{0,25} \quad (33)$$

где $\text{Nu}_f = \alpha / \lambda'' d$; $Ra^* = Gr^* Pr'' = (c_p'' \mu'' / \lambda') g \rho'' \rho' l^3 (\mu'')^{-2}$; $\theta' = r' / c_p'' (t_w - t_s)$; $l = \sqrt{\sigma / g (\rho' - \rho'')}$; $r' = r + c_p'' (t_w - t_s) / 2$ – эффективная теплота парообразования – разность между теплосодержанием пара при $t_f = (t_w + t_s) / 2$ и теплосодержанием жидкости при t_s ; l – характерный размер, длина Лапласа; $A = 0,42 \div 0,72$ по данным разных авторов.

2.2.2 Кризис теплообмена при кипении металлов в каналах

Под термином «кризис теплообмена» при кипении в каналах понимается резкое ухудшение теплообмена, сопровождающееся увеличением температуры теплоотдающей поверхности. Имеющиеся экспериментальные данные показывают, что при кипении металлов в каналах возникает кризис теплообмена второго рода. В условиях дисперсно-кольцевого потока жидкость течет в виде пленки по стенке канала и в виде капель в центре потока. Кризис в этой области связан с высыханием жидкой пленки в условиях, когда выпадение капель жидкости из потока на стенку не компенсирует убыль уносимой и испаряющей жидкости на стенке [76].

Характеристики экспериментальных исследований КТП при кипении жидких металлов в трубах приводятся в таблице 7 [77–88]. В ФЭИ опыты по исследованию кризиса при кипении металлов проводились в парогенерирующих трубах, обогреваемых как жидким металлом, так и непосредственным пропусканием электрического тока [21].

Основные закономерности, установленные при исследовании этого явления заключаются в следующем:

- величина q_{cr} уменьшается с увеличением паросодержания; пульсации расходов приводят к уменьшению величины q_{cr} ;

Таблица 7. Характеристики экспериментальных исследований критических тепловых потоков при кипении жидких металлов в трубах

Автор, год	Металл	Тип обогрева	P, МПа	d, мм	L, мм	L/d	G, кг/м²с	χ	q _{кр} МВт/м²
Гофман [60, 77] (1962), (1964)	КАЛИЙ	тепл. клин. электр.	0,1	8,25; 22,	0,305; 1,83	45÷83	20÷50	0,5	0,31÷1,14
Бернштейн и Рендалл [65] (1964)		пар	0,296÷0,44	4,7	0,325	69,0	120÷180	0÷1,0	0,06÷0,16
Фишер [78, 79] (1964, 1965)		тепл. клин	0,19÷0,27	7,1	0,3	42,0	44,4÷166,7	0,9	0,11÷1,1
Аладьев и др. [23] (1966)		электр.	0,0113÷0,42	4,0	0,12÷0,4	30÷100	65÷270	0,5÷0,79	0,15÷1,56
Петерсон [80] (1966)		натрием	0,2÷0,45	17,0	1,76	104,0	140÷500	0,4÷0,72	0,6÷1,42
Кириллов [55] (1968)		электр.	0,101÷0,152	6,0	0,5	83,0	190÷806	0,12÷0,55	0,7÷1,85
Смит [81, 82] (1969)		–	0,103÷0,185	12,7	0,2985	23,5	36÷50	0,51÷0,53	0,293÷0,391
Хантли [81, 83] (1969)		–	0,103÷0,185	12,7	0,2985	23,5	20÷35	0,66÷0,927	0,182÷0,27
Аладьев и др. [85] (1970)		электр. неравномер-ный по длине обогрев	0,1	4 и 6		33÷50	20÷250	0,5÷1,0	2,0÷6,2
Котловски и Саватгери [86] (1984)		–	0,2	6,6	1,0	151,5	60÷280	–	0,173÷0,608
Чанг, Ли [87] (1994)		–	0,001÷0,3	4,0	0,4	100,0	154÷347	0,721÷0,776	0,82÷1,73

Автор, год	Металл	Тип обогрева	P, МПа	d, мм	L, мм	L/d	G, кг/м ² -с	χ	q _{cr} МВт/м ²
Нойс, Лурье [69] (1966)	НАТРИЙ	натрием	0,0151÷0,055	6,3	0,685	108,0	1570÷2500	0,3	2,3÷5 (кольцевой зазор)
Пепплер [88] (1973)		индукц.	0,054÷0,25	4			1200÷2800	0,15÷0,35	1,5÷2,5
Кайзер и Пепплер [89] (1974)		индукц.	0,05÷0,17	9,0	0,2	22,2	> 2800	0,3÷0,86	2,0÷7,5
Коттовски и Саваттери [86] (1984)		–	0,2	6,6	1,0	151,5	6÷280	–	0,2÷0,75
Ямагути [90] (1987)		–	0,12÷0,13	6,5	0,45	69,2	1,7÷70	0,07÷0,74	0,03÷0,5
Чанг, Ли [87] (1994)		–	0,001÷0,3	6,0	1,0	166,7	246÷402	0,712÷0,747	1,4÷2,0
Фишер [78, 79] (1964, 1965)	Рубидий Цезий	электр. тепл. клин	0,14÷0,71 0,15÷1	7,1 7,1	0,3 0,3	42,0 42,0	160÷1200 167÷1667	0,01÷0,74 0,9	0,16÷0,77 0,0÷1,1
Кириллов [55] (1968)	Цезий	электр. электр.	0,21÷1,2 0,035÷0,42	7,0 7,0	0,5 0,98	71,5 140,0	430÷1530 275÷664	0,265÷0,94 0,28÷1,0	0,7÷2,01 0,07÷0,43

- величина q_{cr} возрастает с увеличением массовой скорости пропорционально $G^{0,8}$ и уменьшается с увеличением длины трубы $q_{cr} \sim l^{-(0,8 \div 1)}$;
- влияние давления не отмечается в большинстве опытов, в связи с узким диапазоном давлений, охватываемым опытами;
- для разных условий наблюдаются ряд зависимостей $x_{lim} = f(G)$.

Кризис теплообмена при кипении натрия и калия в трубах

Экспериментальные данные по КТП при кипении натрия и калия в трубах, полученные Коттовски и Саваттери [86], Кайзером и Пепплером [89], описываются зависимостью:

$$q_{cr} = ArG^n(1 - 2x_{in}) (l/d)^{-0,8} \text{ Вт/м}^2 \text{ при } G = 50 \div 800 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}, 0,4 < x_{in} < 0; l/d = 30 \div 166, \quad (34)$$

где x_{in} – паросодержание на входе $x_{in} = -c_p(T_s - T_{in}) \cdot r$ и r – теплота испарения, кДж/кг. Значения коэффициентов A и n в уравнении (34) в зависимости от геометрии экспериментальной секции приведены в таблице 8.

Таблица 8. Значения коэффициентов A и n в уравнении (34)

Геометрия экспериментальной секции	A	n
Труба	0,216	0,807
Пучки с дистанционирующими решетками	0,209	0,746
Пучки с дистанционированием витой проволокой	0,224	0,766

Чангом и Ли [87] для аппроксимации данных по КТП при кипении Na и K применяется следующая зависимость:

$$q_{cr} = 2,13 \frac{G \cdot r}{l/d} \left[1 - 0,352t - \left(0,82 - 1,698t + 0,592t^2 + 2,45t^3 \right)^{1/3} \right], \quad (35)$$

в которой имеется член, характеризующий недогрев теплоносителя до температуры насыщения $t = \Delta h/r$, ($\Delta h = h_s - h_{in}$ – разность энтальпий насыщения и входа).

Экспериментальные данные трех рассмотренных работ [86, 87, 89] приводятся на рис. 15. На этом рисунке приведены для сравнения данные Ямагути [90] по теплообмену при кипении натрия в 37-стержневой сборке при следующих характерных параметрах: $l = 450$ мм; $d = 6,5$ мм; $d_h = 4,08$ мм; $s/d = 1,215$; $p = 1,2\text{--}1,3$ атм; $q_{cr} = 32,8\text{--}504,7$ кВт/м². Аппроксимирующая зависимость для данных Ямагути имеет вид [48]:

$$q_{cr} = r \cdot (x_{cr} - x_{in}) [G(l/d)]; \quad x_{cr} = 0,5. \quad (36)$$

Из рис. 15 видно, что определяющее влияние на КТП оказывает параметр l/d и величина массовой скорости G . Чем меньше длина нагрева, тем выше значение КТП. При одной и той же массовой скорости величина КТП может различаться на порядок. С ростом G наблюдается почти линейная зависимость роста КТП, хотя следует отметить, что влияние массовой скорости не так сильно, как влияние длины обогрева.

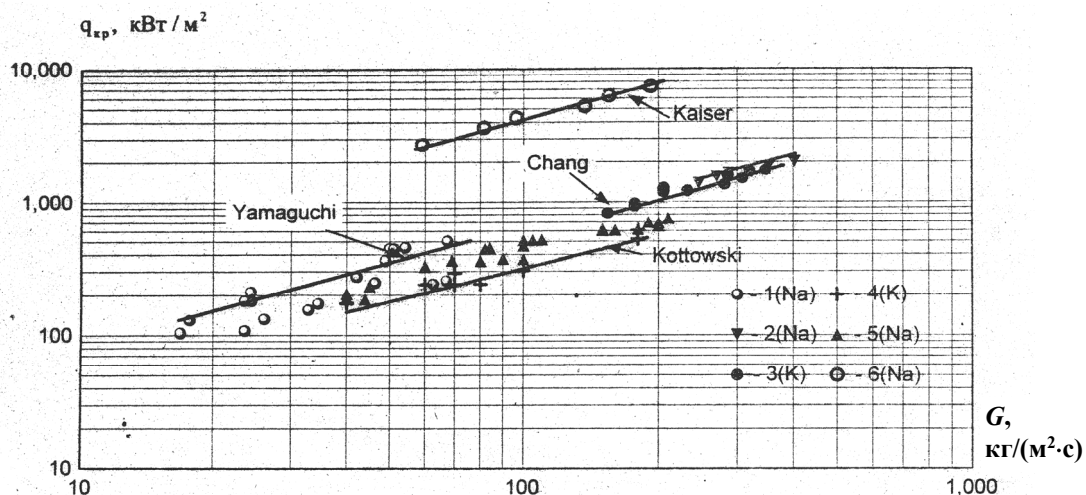


Рис. 15. Экспериментальные данные по КТП при кипении натрия и калия в трубах:
 1 – Ямагути [90]; 2, 3 – Чанг и Ли [87]; 4, 5 – Коттовски и Саваттери [86];
 6 – Кайзер и Пепплер [89]

В работе [48] дается обобщающая корреляция по КТП в каналах для жидких металлов в виде соотношения, которое пригодно лишь для ограниченного диапазона данных, поскольку не включает давление и паросодержание:

$$q_{cr} = 0,312 \frac{G}{L/D_h} r. \quad (37)$$

G – массовая скорость, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; L – длина обогрева, м; D_h – гидравлический диаметр канала, м.

На рис. 16 приводится сравнение экспериментальных данных по КТП для Na и K [86, 87, 89, 90] с расчетными значениями КТП по формуле (37). Из рис. 15 видно, что формула (37) достаточно хорошо описывает все опытные данные независимо от условий проведения эксперимента.

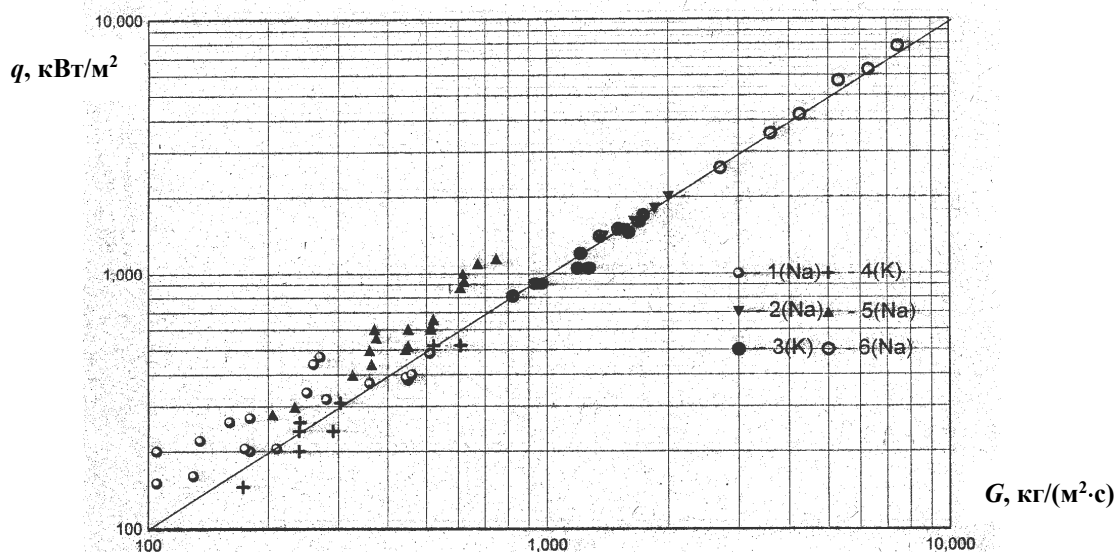


Рис. 16. Сравнение экспериментальных данных по КТП для Na и K с расчетными значениями КТП по формуле (37):
 1 – Ямагути [90]; 2, 3 – Чанг и Ли [87]; 4, 5 – Коттовски и Саваттери [86];
 6 – Кайзер и Пепплер [89]

Обобщенная зависимость КТП от приведенного давления

Обобщение опытных данных разных исследователей для кризиса теплообмена в трубах, кольцевых каналах для натрия, калия, цезия позволяет рекомендовать обобщенную зависимость КТП от приведенного давления (см. рис. 17):

$$q_{cr} = 6 \cdot 21 \cdot 10^{-6} r p'' G^{0,8} \frac{d}{l} \frac{F_h}{F_{total}} \frac{p_c}{p}, \tag{38}$$

где F_h – поверхность теплообмена; F_{total} – полная смоченная поверхность; q_{cr} – МВт/м²; G – кг/(м²·с); r – кДж/кг. Диапазон применения формулы (38): $l/d = 25 \div 150$; $G = 20 \div 1530$ кг/(м²·с); $p/p_c = (0,1 \div 8,3) \cdot 10^{-2}$.

Уравнение (38) в совокупности с уравнениями теплового баланса

$$q_{cr} \pi d \cdot l = G \frac{\pi d^2}{4} r (x_{cr} - x_{in}) \tag{39}$$

позволяет определить критическое паросодержание (паросодержание в сечении кризиса):

$$x_{cr} = x_{in} + \frac{4 q_{cr} \cdot l}{G \cdot d \cdot r}. \tag{40}$$

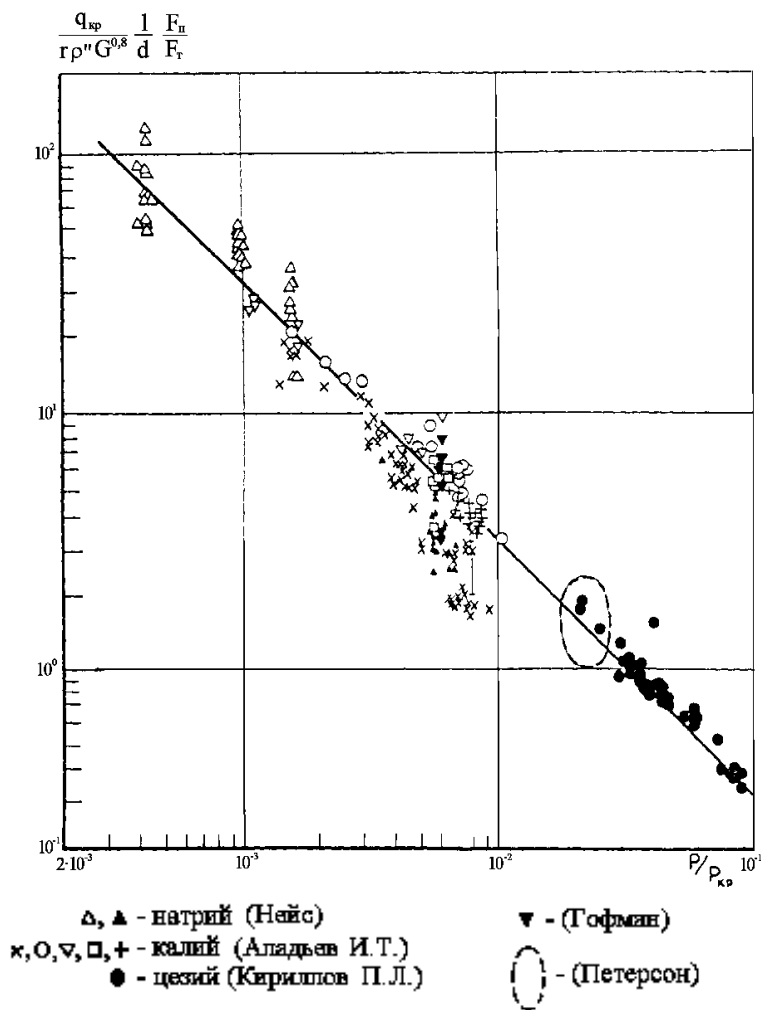


Рис. 17. Обобщённая зависимость критического теплового потока от приведённого давления для щелочных металлов по уравнению (38) на основании экспериментальных данных (см. таблицу 7): Na – [69]; K – [23, 60, 77, 80], Cs – [55]

Расчет давления по температуре насыщения

Расчет давления при известной температуре насыщения T_s можно производить на основании обобщенного уравнения давления паров щелочных металлов [45]:

$$\ln p = A + B/T_s + C \ln(T_s). \tag{41}$$

Здесь $[p]$ – МПа; $[T_s]$ – К. Значение констант A , B и C в уравнении указаны в таблице 9.

Таблица 9. Значения констант в уравнении (41)

Металл	Диапазон температур, К	Коэффициенты		
		A	B	C
Литий	1057÷2156	13.0719	-18880.659	-0.4942
Натрий	864÷2361	11.2916	-12532.694	-0.3869
Калий	718÷2254	13.1559	-10684.466	-0.7321
Рубидий	707÷2073	9.6922	-9266.648	-0.3388
Цезий	728÷2045	11.0122	-9011.334	-0.5448

Зависимость давления, рассчитанного по уравнению (41), от температуры насыщения для диапазона опытов по КТП при кипении калия в трубах с равномерным теплоподводом, проведенных И.Т. Аладьевым и другими [23] дается на рис. 18.

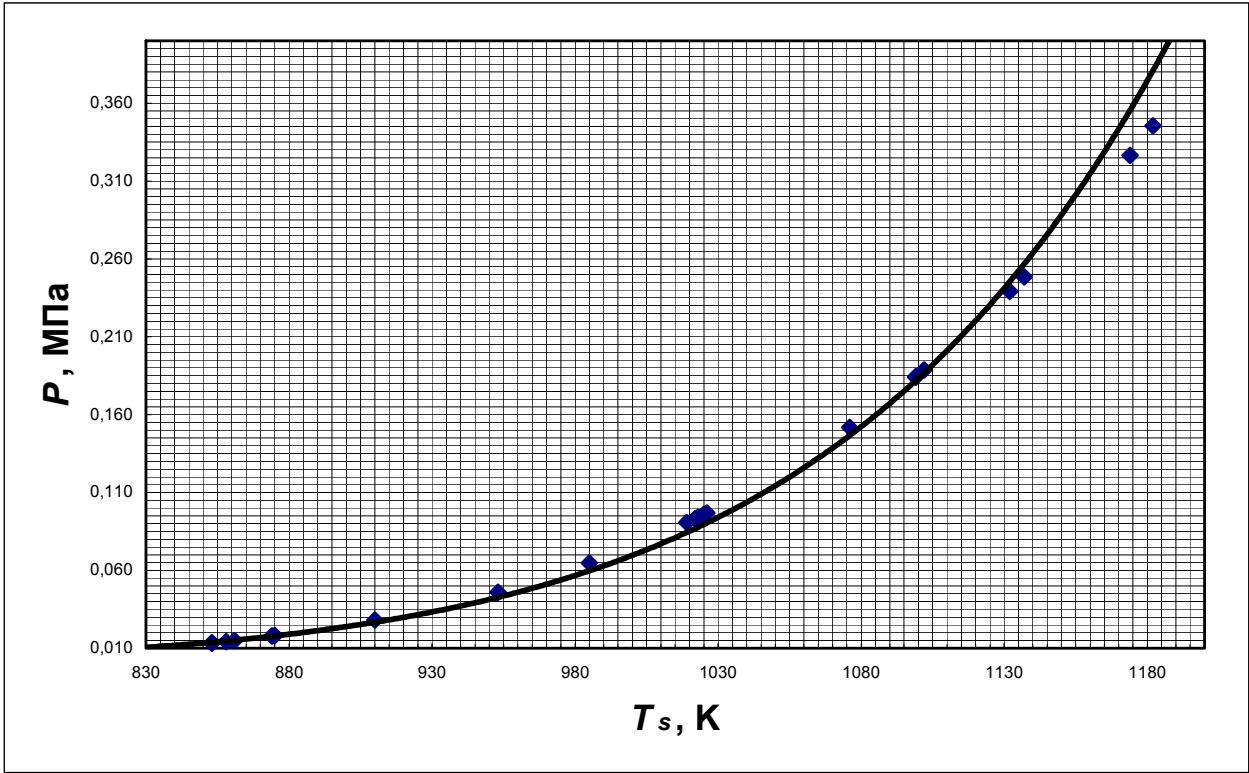


Рис. 18. Зависимость давления, рассчитанного по уравнению (41), от температуры насыщения для диапазона опытов И.Т. Аладьева [23] по КТП для калия в трубах

Теплообмен в закризисной области

При полном осушении поверхности нагрева наблюдается резкое ухудшение теплообмена в парогенерирующей трубе. Ухудшение теплообмена связано с почти полным отсутствием непосредственного контакта жидкости с греющей стенкой трубы. Тепло от поверхности нагрева вначале поступает к паровой фазе, откуда оно передается к диспергированным в паровом ядре каплям жидкости. Коэффициенты теплоотдачи при этом близки к значению α'' для сухого пара:

$$\alpha'' = \frac{\lambda}{d} \cdot 0,023 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,4}, \quad (42)$$

где все физические свойства относятся к сухому пару. При достаточно больших значениях влажности отмечается некоторое повышение коэффициента теплоотдачи [39]. Однако это увеличение незначительно и не выходит за пределы разброса опытных точек. Поэтому для расчета теплоотдачи к влажному пару с некоторым запасом можно рекомендовать формулу (35).

Влияние интенсификаторов теплообмена на работу парогенерирующего канала

Работу парогенерирующего канала можно существенно улучшить, приняв ряд мер, направленных на интенсификацию теплообмена в различных областях парогенерации. Экспериментальные исследования показали целесообразность установки на входе в канал винтового завихрителя-вытеснителя, способствующего интенсификации теплообмена при невысоких значениях паросодержания ($x < 0,2$). Роль такого завихрителя-вытеснителя сводится к искусственному созданию инерционных сил, способствующих формированию кольцевого режима течения. Интенсификация теплообмена в переходной области может быть осуществлена посредством установки в канале закручивающего устройства, например, относительно короткого шнека в виде скрученной ленты.

Список литературы к части 2

1. Кутателадзе С.С., Зысина Л.В. Экспериментальное исследование теплоотдачи при кипении ртути // Советское котлотурбостроение. – 1939. – № 8. – С. 279–283.
2. Стырикович М.А., Семеновкер И.Е., Сорин А.Р. // Советское котлотурбостроение. – 1940. – № 9. – С. 316.
3. Ложкин А.Н., Канаев Л.М. // Советское котлотурбостроение. – 1938. – № 4.
4. Теплообмен при кипении металлов в условиях естественной конвекции / Под ред. В.И. Субботина, Д.Н. Сорокина, Д.М. Овечкина, А.П. Кудрявцева. – М.: Наука, 1969.
5. Жидкометаллические теплоносители. 2-е изд. / Под ред. В.М. Боришанского, С.С. Кутателадзе, И.И. Новикова, О.С. Федынского. – М.: Атомиздат, 1967.
6. Зейгарник Ю.А., Литвинов В.Д. Кипение щелочных металлов в каналах. – М.: Наука, 1983.
7. Двайер О. Теплообмен при кипении жидких металлов. – М.: Наука, 1980.
8. Зейгарник Ю.А., Кириллов П.Л., Ушаков П.А., Ивановский М.Н. Теплообмен жидких металлов при кипении и конденсации // Теплоэнергетика. – 2001. – № 3. – С. 2–8.
9. Субботин В.И., Ивановский М.Н., Арнольдов М.Н. Физико-химические основы применения жидкометаллического теплоносителя. – М.: Атомиздат, 1970.
10. Гидродинамика и теплообмен в атомных энергетических установках (основы расчета) / Под ред. В.И. Субботина, М.Х. Ибрагимова, П.А. Ушакова, В.П. Бобкова, А.В. Жукова, Ю.С. Юрьева. – М.: Атомиздат 1975.
11. Кириллов П.Л. Учет контактных термических сопротивлений теплообмену жидких металлов в круглой трубе: Препринт ФЭИ-284. – Обнинск, 1971.
12. Кириллов П.Л., Грачев Н.С. Изучение упругости паров натрия при температурах 880–1300°C // Инженерно-физический журнал. – 1959. – Т. 2. – № 5. – С. 3–8.
13. Кириллов П.Л., Грачев Н.С. Экспериментальное определение упругости паров калия температурах 550–1280°C // Инженерно-физический журнал. – 1960. – Т. 3. – № 6. – С. 62–65.
14. Кириллов П.Л., Ушаков П.А. Теплообмен жидких металлов: особенности, методы исследований и основные зависимости // Теплоэнергетика. – 2001. – № 1. – С. 49–56.
15. Минашин В.Е., Субботин В.И., Ушаков П.А., Шолохов А.А. Применение микротермопар в исследовании теплоотдачи / В кн.: Вопросы теплообмена. – М.: Изд-во АН СССР, 1959.
16. Минашин В.Е., Ушаков П.А., Шолохов А.А. Об ошибке измерения температуры за счет искажения в районе заделки термопар. В кн.: Конвективный и лучистый теплообмен. – М.: АН СССР, 1960.
17. Кириллов П.Л., Субботин В.И., Суворов М.Я., Троянов М.Ф. Теплоотдача к сплаву натрия с калием и к ртути // Атомная энергия. – 1959. – Т. 6. – № 4. – С. 382–390.
18. Логинов Н.И. Электромагнитные преобразователи расхода жидких металлов. – М.: Энергоиздат, 1981.
19. Субботин В.И., Кириллов П.Л., Турчин М.Н. Магнитные расходомеры для жидких металлов // Атомная энергия. – 1960. – Т. 9. – № 3.
20. Бережной В.Д., Грачев Н.С., Кириллов П.Л., Субботин В.И., Турчин М.Н. Установка для изучения кипения калия в трубах // Теплофизика высоких температур. – 1968. – Т. 6. – № 2. – С. 186.
21. Грачев Н.С., Зеленский В.Н., Кириллов П.Л., Субботин В.И., Турчин М.Н. Теплообмен и гидродинамика при кипении калия в трубах // Теплофизика высоких температур. – 1968. – Т. 6. – № 4. – С. 682–690.

22. Боришанский В.М., Жохов В.А., Андреевский А.А. Теплоотдача при кипении жидких щелочных металлов // Атомная энергия. – 1965. – Т. 19. – № 2. – С. 191–193.
23. Аладьев И.Т., Горлов И.Г., Додонов Л.Д. и др. Теплообмен при кипении калия в трубах с равномерным теплоподводом // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1966. – № 2. – С. 136.
24. Зейгарник Ю.А., Литвинов Ю.Д. Экспериментальное исследование теплообмена и потерь давления при кипении натрия в вертикальной трубе / В кн.: Тепломассообмен-V. – Минск, 1975. – Т. 3. – Ч. 1. – С. 147–156.
25. Farmer W.S. /Ph. D. Thesis, University of Tennessee, 1952. Quoted by Dwyer O. E. Boiling Liquid Metal Heat Transfer.-Hinsdale. American Nuclear Society. 1976.
26. Lyon R., Foust A., Katz D., 1955, Boiling Heat Transfer with Liquid Metals // Chemical Engineering Prog. Symposium Series, 1955, Vol. 51, No. 7, PP. 41-47.
27. Корнеев М.И. Теплоотдача ртути и амальгам магния при кипении в условиях свободной конвекции // Теплоэнергетика. – 1955. – № 4. – С. 44–48.
28. Корнеев М.И. Исследование теплообмена ртути и амальгам магния в условиях естественной конвекции // Теплоэнергетика. – 1955. – № 7. – С. 25–30.
29. Bonilla C.F., Busch J S., et al. Pool Boiling Heat Transfer with Mercury // Chemical Engineering. Progress. Symposium Series, 1957, Vol. 53, No. 20, PP. 51-57.
30. Lunardini V.Jr. An experimental Study of the Effect of a Horizontal Magnetic Field on the Nucleate Pool Boiling of Water and Mercury with 0.02 Percent Mg and 0.0001 Percent Ti / Ph. D. Thesis, Mechanical Engineering Dept., Ohio State University. 1963.
31. Bonilla C.F., Grady J.J., Avery G.W. Pool Boiling Heat Transfer from Scored Surfaces // Chemical Engineering. Progress. Symposium Series, 1965, Vol. 61, No. 57, PP. 280-288.
32. Michiyoshi I., Takahashi O., Serizawa A. Effects of Magnetic Field Pool on Pool Boiling Heat Transfer for Mercury // Department of Nuclear Engineering Report, Kyoto University, Kyoto, Japan, 1975, PP. 1-3 (Quoted by Wagner L.R. and Lykoudis PS in [33]).
33. Wagner L.R. and Lykoudis P.S. Mercury Pool Boiling under the Influence of a Horizontal Magnetic Field // Int. Journal of Heat & Mass Transfer, 1981, No. 24, PP. 635-643/
34. Noyes R.C. An experimental Study of Sodium Pool Boiling Heat Transfer // Transactions of ASME, Ser. C, 1963, Vol. 85, No. 2.
35. Marto P.I., Rohsenow W.M. Effect of Surface Conditions on Nucleate Pool Boiling Heat Transfer to Sodium // Transactions of ASME, Ser. C, 1966, Vol. 88, No. 2, PP. 51-59.
36. Деев В.И., Дубровский Г.П., Кокарев Л.С. и др. Исследование теплоотдачи при кипении натрия в условиях свободной конвекции // Атомная энергия. – 1967. – Т. 22. – № 1.
37. Petukhov B.S., Kovalev S.A., Zhukov V.M. Study of Sodium Boiling Heat Transfer // In 3rd Int. Heat Transfer Conf., AIChE, 1967, No. 4, PP. 80-91.
38. Fujishiro T., et al. The 8th Japan Heat Transfer Symp. 1971, PP. 153-156, Quoted in Aoki. S., Current Liquid Metal Heat Transfer Research in Japan // Prog. Heat Mass Transfer, 1973, No. 7, PP. 569-587.
39. Kovalev S.A., Zhukov V.M. Experimental Study of Heat Transfers during Sodium Boiling under Conditions of Low pressure and Natural Convection // Prog. Heat Mass Transfer, 1973, No.7, PP. 347-354.
40. Sakurai A., et al. Sodium Pool Boiling Heat Transfer // Proc. 6th Int. Heat Transfer Conf. 1978. Vol. 1, PP. 193-198.
41. Bonilla C.F., Wiener M., Bilfinger H. Pool Boiling of Potassium // Proceedings of High Temperature Liquid Metal Heat Transfer Technology Meeting, September. ORNL-3605, 1963, Vol. 1. PP. 286-310.

42. Colver C., Balzhizer R.E. A study of Saturated Pool Boiling Potassium up to Burnout Heat Fluxes // Chemical Engineering. Progress. Symposium Series, 1964, Vol. 61, No. 59, PP. 253-263.
43. Takenaka N. Natural Convection and Boiling Heat Transfer in Potassium.-Doctoral Thesis, Dept. of Nuclear Engineering, Kyoto University, Kyoto. 1984.
44. Michiyoshi I., Takenaka N., Murata T., et al. Effects of Liquid Level on Boiling Heat Transfer in Potassium Layers on a Horizontal Plane Heater // Journal of Heat Transfer, 1985, No. 107, PP. 468-472.
45. Michiyoshi I., Takenaka N., Takahashi O. Dry Patch Formed Boiling and Burnout in Potassium Pool Boiling // Int. Journal of Heat & Mass Transfer, 1986, No. 29, PP. 689-702.
46. Madsen N., Bonilla C. // Chemical Engineering. Progress. Symposium Series, 1960, Vol. 56, No. 30, P. 251.
47. Mohammed Shah M. A Survey of Experimental Heat Transfers Data for Nucleate Pool Boiling of Liquid Metals and a New Correlation // Int. Journal of Heat & Fluid Flow, 1992, Vol. 13, No. 4. PP. 370-379.
48. Корхов О.А., Богословская Г.П., Сорокин А.П. О сопоставлении данных по кипению жидких металлов: Препринт ФЭИ-2964. – Обнинск, 1997.
49. Морозов Ю.Д., Привалов А.Н., Присняков В.Ф., Белогуров С.А. О механизме перехода к двухфазному течению и режимах потока при кипении жидких металлов в прямоточном парогенераторе // Теплофизика высоких температур. – 1988. – Т. 26. – № 6.
50. Chen J.C. Report ORNL-3605, 1964, Vol. 2, P. 86.
51. Chen J.C. Non Equilibrium Inverse Temperature Profile in Boiling Liquid Metal Two Phase Flow // AJChE Journal, 1965, Vol. 11, No. 6, PP. 1145.
52. Стырикович А.М., Семеновкер И.Е. // Журнал технической физики. – 1940. – № 10. – С. 1331.
53. Ложкин А.Н., Канаев Л.М. Бинарные установки. – М.: Машгиз, 1946.
54. Romie F.E., et al. Heat Transfer to Boiling Mercury // Transactions of ASME. Ser. C, 1960, Vol. 82, No. 4, PP. 387-388.
55. Кириллов П.Л. Теплообмен жидких металлов в круглых трубах (однофазный и двухфазный потоки). Докторская диссертация. – М.: ИВТАН, 1968.
56. Гельман Л.И., Копп И.З. Отчет ЦКТИ № 15001, 1965 (цит. по [55]).
57. Корнеев М.И. Теплоотдача ртути и амальгам магния при кипении в условиях свободной конвекции // Теплоэнергетика. – 1955. – № 4. – С. 44-48.
58. Корнеев М.И. Исследование теплообмена ртути и амальгам магния в условиях естественной конвекции // Теплоэнергетика. – 1955. – № 7. – С. 25-30.
59. Tang J.S., Smith C.R., Ross P.T., et al. Potassium-Mercury Amalgam Boiling Heat Transfer, Two-Phase Flow, and Properties Investigation, ORNL-3605, 1964, Vol. 2, PP. 110-132.
60. Hoffman H.W., Krakowiak A.I. Forced-Convection Saturation Boiling of Potassium at Near-Atmospheric Pressure // Proceedings of 1962 High -Temperature Liquid-Metal Heat Transfer Technology Meeting. - USAEC Report BNL- 756, Brookhaven National Laboratory, 1962, PP. 182-203.
61. Longo D., Brooks R., Alkali Metals Boiling and Condensing Investigations. Report ORNL-3605, 1963, Vol. 2, PP. 86-109.
62. Bersin F., Horan J. Report PWAC-430, 1964 (Cit. by [55]).
63. Berenson F., Killakey J. An Experimental Investigation of Forced-Convection Vaporization of Potassium. Report ORNL-3605, 1964, Vol. 2, PP. 1-23.
64. Bernstein E., Petrik J. Report PWAC- 429, 1964 (Cit. by [55]).

65. Bernstein E., Randall D. Forced-Convection Boiling Potassium Heat Transfer Data. Report TID 21256, PWAC, 1964 (Cit. by [55]).
66. Боришанский В.М., Андриевский А.А., Жохов Л.А. и др. Теплоотдача при кипении калия в трубе в области умеренного паросодержания // Атомная энергия. – 1966. – Т. 21. – № 1. – С. 58.
67. Аладьев И.Т., Петров В.И., Рзаев А.И. и др. Теплообмен в натрий-калиевом парогенераторе из змеевиковых труб / В кн.: Вопросы тепломассопереноса в энергетических установках. – М.: ЭНИН, 1974. – С. 236–244.
68. Горлов И.Г., Рзаев А.И., Худяков В.Ф. Кипение калия в трубах при повышенных давлениях / В кн.: Исследования по механике и теплообмену двухфазных сред. – М.: ЭНИН, 1974. – С. 84–105.
69. Noyes R.C., Lurie H. Boiling Sodium Heat Transfer // Proc. 3rd Int. Heat Transfer Conf. Chicago, Aug., 1966, Vol. 5, PP. 92.
70. Петухов Б.С., Зейгарник Ю.А., Литвинов В.Д. Исследование теплоотдачи при кипении жидкого натрия в вертикальной трубе // Известия вузов. Сер. Энергетика. – 1970. – № 3. – С. 102–109.
71. Fisher C.R. Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics for Boiling Rubidium in Forced Convection Flow. – Report ORNL-3605, 1964, Vol. 2, PP. 64-85.
72. Кириллов П.Л. Обобщенная зависимость критического теплового потока от давления при кипении металлов в большом объеме // Атомная энергия. – 1968. – Т. 24. – № 2. – С. 143–146.
73. Субботин В.И., Сорокин Д.Н., Кудрявцев А.П. и др. Критические тепловые потоки при кипении эвтектического сплава натрий-калий в условиях свободной конвекции // Атомная энергия. – 1972. – Т. 32. – № 1. – С. 62–63.
74. Subbotin V.I., Ushakov, Kirillov P.L., et al. Heat Removal from Reactor Fuel Elements Cooled by Liquid Metals // Proc. 3rd Int. Conf. Peaceful Uses at Energy, Geneva, Aug. 31-Sept.9, 1964, Vol. 8, P. 192.
75. Carbon M.W. Boiling Liquid Metal Heat Transfer.-Repot TID-20942, University of Wisconsin, Madison, May, 1964.
76. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). – М.: Энергоатомиздат, 1990.
77. Hoffman H.W. Recent Experimental Results in ORNL Studies with Boiling Potassium.- Report ORNL-3605, 1964, Vol. 1, PP. 334-350.
78. Fisher C.R., et al. Aerojet-General Nucleonics, San Ramon, California, 1964, No. 8099 (Cit. by [55]).
79. Fisher C.R., et al. Aerojet-General Nucleonics, San Ramon, California, 1965, No. 8 (Cit. by [55]).
80. Peterson I.R. // Power Reactor Technology, 1966, Vol. 9, No. 4, PP. 194.
81. Jones J.K., Hoffman H.W. Critical Heat Flax for Boiling Water in a Rod Bundle as a Prelude to Boiling Potassium // ASME Ser. C, 1970, PP. 1-8.
82. Smith A.M. / Oak Ridge National Laboratory (Personal communication to J.K. Jones. Cit. by [15]), November, 1969.
83. Huntley W.R. / Oak Ridge National Laboratory (Personal communication to J.K. Jones. Cit. by [15]), November, 1969.
84. Kottowski H. M., Savatteri C., Hufchmidt W. A New critical heat flax correlation for boiling liquid metal, Nuclear Science and Engineering, 1991, Vol. 108, No. 4, PP. 396-413.
85. Aladjev I.T., Gorlov I.G., Fedynsky O.S. The Effect of Nonuniform Axial Heat Flux Distribution on Critical Heat Fluxes with Potassium in Tubes // Proc. of 4th Int. Heat Tansfer Conf.-Versalies, 1970, B.8.1 (Cit. by [84]).

86. Kottowski H.M., Savatteri C. Fundamentals of Liquid Metal Boiling Thermohydraulics // Nuclear Engineering and Design, 1984, Vol. 82, No. 3, PP. 281-304.
87. Chang S.H., Lee Y.B. A New Critical Heat Flux Model for Liquid Metals under Low Heat Flux - Low Flow Conditions // Nuclear Engineering and Design, 1994, Vol. 118, No. 3, PP. 487-498.
88. Peppler W. Experimental Investigations of Dryout for Sodium Boiling in Narrow Channels // Progress in Heat and Mass Transfer, 1973, No. 7, PP. 41-428.
89. Kaiser A., Peppler W., et al. Type of Flow, Pressure Drop and Critical Heat Flux of a Two-Phase Sodium Flow // Nuclear Engineering and Design, 1974, Vol. 30, No. 3, PP. 305-315.
90. Yamaguchi K. Flow Pattern and Dryout under Sodium Boiling Conditions at Decay Power Levels // Nuclear Engineering and Design, 1987, Vol. 99, No. 3, PP. 247-263.
91. Browning P., Potter P.E. An Assessment of the Experimentally Determined Vapour Pressures of Liquid Metals. In book: Handbook of Thermodynamics and Transport Properties of Alkali Metals / Ed. by Ohse R.I., 1st edition.-London: Blacwill Scientific Publications, 1985, PP. 355.
92. Корнеев М.И. Теплообмен при кипении ртути и амальгам магния / В кн.: Жидкие металлы. Под ред. В.М. Боришанского и др. – М.: Госатомиздат, 1963. – С. 220–244.
93. Сорокин А.П., Иванов Е.Ф. и др. Экспериментальные исследования теплообмена и устойчивости кипения жидкометаллического теплоносителя в контуре естественной циркуляции: Препринт ФЭИ-2631, Обнинск, 1997.
94. Sorokin A.P., Ivanov E.Ph., Bogoslovskaya G.P., et al. Boiling of Liquid Metal in Natural Circulation Loop // Proc. of 11th Int. Heat Transfer Conference. August 23-28, Kyongju, Korea, 1998, Vol. 2, PP. 357-361.

Подписано к печати 24.12.2017 г.

Формат 60×84 ¹/₁₆. Усл. п. л. 1,2. Уч.-изд. л. 1,8.

Тираж 50 экз. Заказ № 319

Отпечатано в ОНТИ методом прямого репродуцирования с оригинала авторов.

249033, Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1.

ГНЦ РФ – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского.