

Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»
АО «Государственный научный центр Российской Федерации —
ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени А.И. Лейпунского»

ФЭИ-3287

П. Л. Кириллов, Г. П. Богословская

**Краткая история исследований кризиса теплообмена
в России и за рубежом**

(очерки о проблеме и четырех ученых)

Обнинск 2019

Кириллов П. Л., Богословская Г. П.

Краткая история исследований кризиса теплообмена в России и за рубежом (очерки о проблеме и четырех ученых) : препринт ФЭИ–3287. — Обнинск: АО «ГНЦ РФ ФЭИ», 2019. — 38 с.

Кризис теплообмена — одна из острейших проблем в энергетике тепловых и атомных станций. Начало серьезных исследований относится к 30–40 годам XX века. Большое количество ученых разных стран на протяжении 70–80 лет проводили сложные эксперименты на различных стендах, накопили десятки тысяч результатов, которые превращены в расчетные методики в виде формул и скелетных таблиц.

Текст содержит краткие сведения о четырех ученых России, США, Канады, внесших, по мнению авторов, наибольший вклад в понимание физики процесса и методов расчета (Самсон Семенович Кутателадзе, Новак Зубер, Василий Ефимович Дорощук, Дионисий Гроенвельд). Выбор этих ученых определялся тем, что именно они обнаружили и объяснили основные явления, сопровождающие кризис теплообмена при кипении, и создали практические расчетные методики своего времени. Важным обстоятельством было личное знакомство с ними.

Ключевые слова: хронология, кризис теплообмена, двухфазный поток, режим течения, расчетная методика, Кутателадзе, Зубер, Дорощук, Гроенвельд.

История науки не может ограничиться развитием идей — в равной мере она должна касаться живых людей, с их особенностями, талантами, зависимостью от социальных условий, страны и эпохи. В развитии культуры отдельные люди имели и продолжают сохранять несравненно большее значение, чем в общей социально-экономической и политической истории человечества... Ясно поэтому, что жизнь и деятельность передовых людей — очень важный фактор в развитии науки, а жизнеописание их является необходимой частью истории науки.

Мы должны знать не только как рождались труды, но и что это были за люди, сколько сил, энергии, здоровья, нервов отдали они, чтобы мы сегодня узнали эти законы и прочли формулы в учебниках.

Они были очень разными людьми: счастливыми и несчастными, богатыми и бедными, одинокими и многодетными, веселыми и грустными.

С. И. Вавилов

ВВЕДЕНИЕ

Процессы кипения в технике с давних пор привлекали внимание исследователей в связи с возможностью их наблюдать и в обычной жизни. В истории исследований процессов теплообмена найдется немного подобных научных проблем, как кризис кипения. Эта проблема обострилась в связи с созданием в 30–40-е годы прошлого века высоконапряженных паровых котлов, а в 50–60-е годы при сооружении ядерных реакторов, охлаждаемых водой.

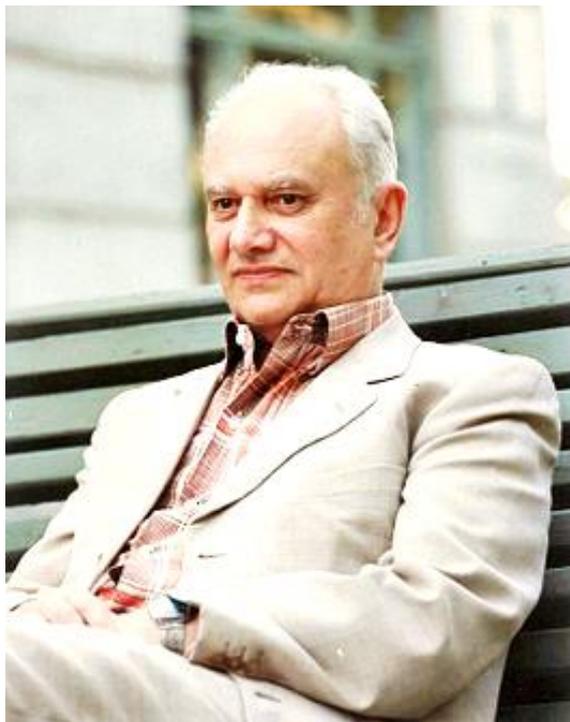
Под термином «кризис теплообмена» в потоке воды или пароводяной смеси обычно понимается резкое повышение температуры поверхности при изменении массового паросодержания и при прочих постоянных параметрах (геометрия, давление, массовая скорость). Сложность заключается в многофакторности явления. Есть несколько режимов течения двухфазного потока, которые могут реализоваться на практике (пузырьковый, пробковый, дисперсно-кольцевой). Последний — поток жидкости в виде капель и жидкой пленки, текущей по стенке. Капли могут выпадать из потока на стенку, а с гребней жидкой пленки срывать в поток. Интенсивность этих механизмов зависит от давления, массовой скорости, паросодержания и геометрии канала. В деталях она и сейчас остается неизвестной. Под кризисом в теплофизике обычно понимают явление резкого снижения интенсивности теплообмена при кипении воды вследствие перехода одного режима в другой (например, пузырькового кипения в пленочный) при постоянной плотности теплового потока.

Многие ученые в десятках организаций зарубежных стран¹ и России² занимались этой проблемой. Многолетняя работа МАГАТЭ и Европейского сообщества обеспечили взаимный обмен данными, согласование позиций, выработку совместных рекомендаций для инженерных расчетов. Это был один из многих замечательных примеров тесного сотрудничества ученых разных стран.

¹ АЕ (Швеция); АЕГ, МАН (Германия); СЕА (Франция); СІСЕ (Италия); УКАЕА (Великобритания); КАЕ, США, университеты разных стран.

² СССР: Россия — ВТИ, ИВТ РАН, НИКИЭТ, ЛИПАН (КИАЭ), ОКБ ГП, ФЭИ, ЦКТИ, Энергия, ЭНИН, ЭНИС; Украина — КПИ, ОПИ, ИТТФ (подробнее см. в приложении).

САМСОН СЕМЕНОВИЧ КУТАТЕЛАДЗЕ



(18/31.07.1914 — 20.03.1986)

Занявшись проблемой кризиса кипения, он примерно в 1934 г. обнаружил, что достаточно ввести число подобия $K = \frac{r}{\Delta h}$, чтобы обобщить многие данные по конденсации и кипению в терминах теории подобия. Здесь r — скрытая теплота фазового перехода; Δh — энтальпия недогрева или перегрева данной фазы относительно энтальпии насыщения. *«Академик Кирпичев активно поддержал направление исследований проблем фазовых переходов и динамики газожидкостных систем. Однако на первых порах оно встретило в ЦКТИ полное непонимание. Особенно ожесточенно возражали Н. А. Ложкин и А. А. Канаев».*

Полностью условия термогидродинамического подобия при фазовых переходах были сформулированы Кутателадзе в 1936 году. Числу подобия « K » таких процессов позже было присвоено его имя. В 1938 году на заседании научного совета в Физико-техническом отделе ЦКТИ руководитель комсомольской бригады Самсон Кутателадзе (ему было всего 24 года) сделал доклад о работе по теплообмену при изменении агрегатного состояния. Отзыв бывшего руководителя этого отдела академика Кирпичева М. В. (ЭНИН) был положительным. Работа была рекомендована к опубликованию в виде книги, которая вышла в 1939 года в издательстве «Машгиз» под названием «Основы теории теплопередачи при изменении агрегатного состояния вещества» [2]. Это была первая в мире монография на такую тему. В 1938—40 гг. по предложению С. С. Кутателадзе на Кировском заводе в Ленинграде были созданы крупные стенды для нужд отечественного тур-

бостроения. В довоенный период (1934—1941) Самсон написал вместе с сотрудниками около 40 научных отчетов.

В январе 1941 г. он был призван в армию. Во время войны участвовал в боях на Карельском фронте. После ранения лежал в госпитале, затем работал начальником квартирной части госпиталя, был повышен в должности, аттестован на офицерское звание. После проведения демобилизации вернулся на работу в ЦКТИ.

В первые годы после войны научно-исследовательские работы в ЦКТИ велись трудно. Многие в Ленинграде было разрушено, не хватало оборудования, материалов. Даже в таких условиях люди работали с энтузиазмом, чувствуя востребованность.

Самсон Семенович поступает в заочный индустриальный институт для получения высшего образования, хотя у него уже опубликована монография [2] и более 20 статей. Эту монографию высоко оценили известные ученые — В. С. Жуковский и И. И. Палеев. Оба предлагали присвоить С. С. Кутателадзе степень доктора технических наук (минуя степень кандидата). В 1949 вышла его книга «Теплопередача при конденсации и кипении» [3], а в 1952 — ее второе расширенное издание [5]. Атомная комиссия США организовала перевод последнего издания.

Осенью 1950 в ЦКТИ приехал академик АН УССР Александр Ильич Лейпунский — будущий руководитель программы создания реакторов на быстрых нейтронах — для обсуждения развития работ в ЦКТИ по теплообмену в жидких металлах для ядерной энергетики. Обсуждался и порядок защиты диссертации Самсона Семеновича. Лейпунский искренне удивился, узнав, что Самсон Семенович даже еще не имеет диплома о высшем образовании. Он советовал после получения диплома защитить сначала кандидатскую диссертацию, а затем и докторскую (как он сказал, «чтобы не дразнить гусей!», т. е. не отступать от стандартных правил). Если сразу представить докторскую, то начнутся разбирательства — почему сразу докторская, в чем дело? На это уйдет непредсказуемое количество времени, и, может быть, впустую. Самсон Семенович прислушался к этому совету академика.

В декабре 1950 года он защищает на Ученом совете ЦКТИ кандидатскую диссертацию на тему «Изменение режима кипения жидкости при свободной конвекции». В этом же году публикуется в «Журнале технической физики» основополагающая работа «Гидродинамическая модель кризиса теплообмена в кипящей жидкости при свободной конвекции».

В 1952 на ученом совете в Московском энергетическом институте С. С. Кутателадзе защитил докторскую диссертацию на тему «Конвективный теплообмен при изменении агрегатного состояния вещества». В 1949—53 гг. им публикуется ежегодно 4–5 работ, некоторые из которых тотчас же переводятся за рубежом.

В 1953 он был приглашен для чтения лекций по термодинамике и теории теплообмена на факультет Военно-морской академии им. А. Н. Крылова. Он сразу стал писать курс теории теплообмена, а в следующем 1954 опубликовал этот курс небольшим тиражом в издательстве Академии. «...эта книга оказала серьезное

влияние на последующее развитие курсов теплообмена как в нашей стране, так и за рубежом. Позже она переиздавалась в СССР с большими дополнениями и изменениями в 1957, 1962, 1970, 1979 гг. [6] Была издана в 1963 г. параллельным изданием в Англии и США и стала одним из официальных основных источников при подготовке аспирантов-теплофизиков».

В 1954 году С. С. был утвержден в звании профессора и назначен начальником физико-технического отдела ЦКТИ. Коллектив отдела ЦКТИ, возглавляемый С. С. Кутателадзе, в конце 1958 года насчитывал несколько лабораторий и состоял из 120 сотрудников. К этому периоду его деятельности относятся исследования механизмов кризиса кипения, процесса, определяющего безопасность работы парогенераторов и создаваемых в то время атомных электрических станций.

Проблемы двухфазных течений и кризиса в парожидкостных системах и результаты исследований нашли отражение в книге С. С. Кутателадзе и М. А. Стыриковича «Гидравлика газожидкостных систем» (1958).

С. С. Кутателадзе был кумиром и безусловным авторитетом, по крайней мере, для молодежи и среднего поколения в ЦКТИ. Он председательствовал на многих НТС, часто выступал с докладами в прениях, эмоциональные его выступления всегда были яркими, запоминающимися, четко излагал факты, был принципиален, сдержан и корректен. Нет ни одного случая, чтобы Самсон Семенович был резок, терял над собой контроль, проявлял агрессивность.

В конце 40-х годов острая потребность в технике вызвала необходимость проведения исследований кризиса теплообмена (условий смены пузырькового режима кипения на пленочный). При этом при повышении плотности теплового потока резко повышается температура поверхности настолько, что поверхность может сгореть или разрушиться. В России и за рубежом этим уже занимались многие исследователи. Вероятно, Г.Н. Кружилин одним из первых заявил, что при кризисе *«поток пузырей пара сильнее отжимает жидкость от поверхности... и вследствие этого омывание поверхности жидкостью ухудшается»*. Однако он не смог создать какой-либо четкой модели процесса, и ограничился выводом сложного расчетного соотношения на основе методов теории подобия (1948–49). В эти же годы (1949–50) С. С. Кутателадзе создал прозрачную *«гидродинамическую модель кризиса теплообмена в кипящей жидкости»*. Это была формулировка достаточно ясной физической теории, выявившей основной механизм процесса, примерами которых являются концепция пограничного слоя Прандтля, теория турбулентности Кармана и др.

В США позже на эту тему независимо была выполнена работа Новаком Зубром на основе теории устойчивости паровой пленки [9]. В те годы, несмотря на железный занавес, идеи носились в воздухе, но только С. С. удалось предложить модель расчета кризиса кипения в большом объеме, которая позже была признана во всем мире. В это же время в СССР членом-корреспондентом АН Г. Н. Кружилиным была предложена другая методика расчета, отличная от уже получившей широкое признание методикой Кутателадзе. На этой почве возник спор между

Кружилиным и Кутателадзе, о котором знали все теплофизики страны. Как пишет в своих воспоминаниях Ю. Л. Сорокин: «...взаимоотношения Моцарта и Сальери довольно часто повторяются и в научном мире». В 1954–58 гг. Кутателадзе — заведующий отделом ЦКТИ.

По приглашению академика М. А. Лаврентьева, в 1958 г. Кутателадзе с группой своих сотрудников переезжает в растущий Новосибирский академгородок. Становится заместителем директора, а потом директором института теплофизики Сибирского отделения РАН. С 1962 года он — уже профессор, затем заведующий кафедрой теплофизики Новосибирского государственного университета. Более 30 его учеников стали докторами наук, а более 60 — кандидатами наук. Кроме фундаментальных исследований, С. С. большое внимание уделял развитию прикладных работ.

В 1984 году отмечалось 70-летие С. С. Кутателадзе. В этот день ему, первому в истории страны ученому-теплофизику, было присвоено звание Героя Социалистического труда. После того как отзвучали торжественные речи в адрес юбиляра, Самсон Семенович и его супруга Лидия Степановна пригласили всех в Дом ученых «на ужин». Гостей было человек 400 — весь «цвет теплофизики СССР», элита Академгородка, приезжие участники семинара.

В 80-е годы у С. С. обнаружилась ишемическая болезнь сердца, гипертония, атеросклероз. Болезнь прогрессировала, произошла закупорка сонных артерий. Операцию было делать поздно. Он умер в Москве 20 марта 1986 года, похоронен на Южном кладбище Академгородка Новосибирска. На памятнике надпись — фраза из поэмы Шота Руставели, которую любил повторять Самсон Семенович: «**Что отдашь — твоим пребудет, что оставил — потерял**». Эта мысль весьма близка или совпадает с христианской заповедью: «не дай Бог взять, а дай Бог дать».



Обсуждение в ФЭИ (июнь 1985 г.)

Слева направо: Ю. С. Юрьев, П. Л. Кириллов, С. С. Кутателадзе, П. А. Ушаков

Работать с Кутателадзе было непросто. Требовательный к себе, отдававший все свое время любимому делу, он ждал того же и от других. Симуляция деятельности, поверхностное отношение к научным задачам и фактам влекли за собой неизбежный и сокрушительный разнос. Обладая огромной эрудицией и способностью быстро связывать разрозненные факты в их совокупность, он раздраженно воспринимал всякую «недальновидность» или даже «тупость».

Характерной особенностью научной деятельности С. С. Кутателадзе было периодическое переключение с одной крупной темы на другую. Возможно, он даже не знал полусерьезную сентенцию П. Л. Капицы (1894—1984): «Темы работы надо полностью менять каждые восемь лет, так как за это время полностью изменяются клетки тела и крови — ты уже другой человек!». Действительно, около 20 лет с 1930 по 1950 г. главной темой Самсона Семеновича была «Гидродинамическая модель кризиса кипения». Затем в 1950—1960 годы — «Жидкие металлы». Итогом цикла последних работ был выпуск монографии совместно с Новиковым И. И., Федынским О. С. и Боришанским В. М., выдержавшей три переработанных и дополненных издания (1958, 1967, 1976).

После его переезда в Новосибирск (Институт теплофизики) следующая крупная тема — «Асимптотическая теория пристенной турбулентности» (Теория пограничного слоя с исчезающей вязкостью) (1960—1986).

НОВАК ЗУБЕР

Другой замечательный ученый — доктор Новак Зубер. Это был также истинный первопроходец в области исследований двухфазных потоков и теплообмена. Он родился в Белграде, черногорец по происхождению. Во время второй мировой войны до иммиграции в Соединенные Штаты служил в Балканских Военно-воздушных силах.



Новак Зубер (04.12.1922— 03.10.2013)

После войны с 1945 по 1947 год учился в Римском университете, а затем два года служил уборщиком в машинном отделении на торговом судне. Неодолимая тяга к науке подтолкнули 25-летнего Новака покинуть судно во время остановки в порту Сан-Педро в Калифорнии. Он добрался до Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе и смог записаться в образовательную программу университета по инженерному делу. Чтобы завершить обучение, ему приходилось браться за любую работу: мыл посуду, работал на автомойке, чистил курятники, подрабатывал садовником — другими словами, принимался за все, для чего не требовался вид на жительство в США.

Но иммиграционный контроль все-таки настиг его, когда он учился в магистратуре. Однако к этому моменту его работа по кипению при высоком давлении в обоснование тепловых и гидравлических характеристик ядерного реактора подводной лодки, тогда срочно разрабатываемой под руководством адмирала Риковера, произвела в университете такое сильное впечатление, что ему пошли навстречу. Новак смог окончить обучение, получил последовательно степени бакалавра, магистра и доктора наук. Тема его докторской диссертации [9] (1959) — классическая теория гидродинамических процессов теплоотдачи при кипении.

Профессиональная карьера Зубера началась в компании Томсон Рамвулдридж. Затем он устроился на работу в научный центр корпорации Дженерал Электрик базирующийся в Скенектеди (штат Нью-Йорк). Здесь в одной из лабораторий развил большой комплекс исследовательских работ по двухфазным потокам. Именно в Дженерал Электрик он приступил к широким исследованиям в жидких средах и разработке ныне широко известной и повсеместно используемой модели «дрейфа фаз» для описания объемных концентраций в двухфазных потоках. Модель позволила обосновать возможность прогнозирования теплогидравлических характеристик и свойств двухфазных потоков для ядерных энергетических установок. Это стало главным научным вкладом доктора Зубера в области теплофизики. Зубер хорошо знал работы русских ученых того времени, особенно работы С. С. Кутателадзе, на некоторые он ссылается в своей докторской диссертации.

В частности, в своей диссертации он пишет: *«Кутателадзе указывает (с. 50), что при критических тепловых потоках на поверхности образуется такое большое количество пара, что нет возможности рассматривать отдельные центры парообразования... Кризис при кипении представляет собой чисто гидродинамическое явление: нарушение устойчивости двухфазного потока вблизи поверхности нагрева..., когда скорость паровой фазы достигает критического значения. С помощью анализа размерностей для большого объема получил формулу*

$$\frac{q}{r\sqrt{\rho''}[\sigma(\rho' - \rho)]^{1/4}} = K,$$

где на основании экспериментов по С. С. Кутателадзе значение $K \cong 0,16$ ».

Из текста диссертации Зубера видно, что он был знаком не только с работами Кутателадзе, но и с работами других советских ученых (Миропольский З. Л., Стырикович М. А., Смолин В. Н., Осмачкин В. С. и многих др.).

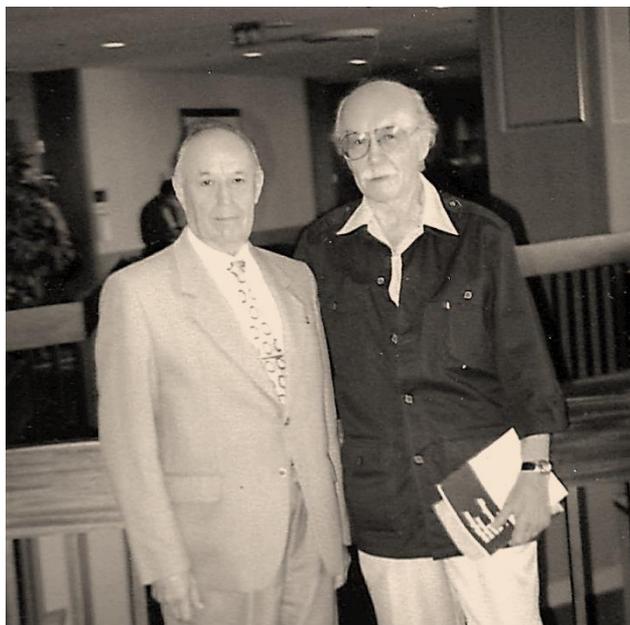
В 1967—1974 гг. Н.Зубер работал в Нью-Йоркском университете и Технологическом институте Джорджии, в которых под его научным руководством были написаны семь работ на соискание степени магистра и шесть докторских диссертаций, многие из которых легли в основу научных публикаций в сфере исследований двухфазных потоков и теплообмена. Модель дрейфа фаз стала широко использоваться для прогнозирования процессов в других областях двухфазных потоков, даже не имеющих прямого отношения к ядерной энергетике.

Позже он работал в Управлении по проведению исследований в КАЭ (Комиссии по Атомной Энергетике США). Эта деятельность ознаменовала новый этап в его карьере. До момента своей отставки в 1991 году, он отвечал за развитие и проверку компьютерных кодов по оценке безопасности ядерных реакторных установок. В обязанности Зубера входило руководство экспертной группой по анализу кодов, а затем — развитие и обоснование возможности масштабирования кодов, их применимости и, что более важно, оценка погрешностей. Этот подход важен при расчетах возможных аварий ядерных реакторов при потере теплоносителя (например, при разрыве трубопроводов большого диаметра), и положил начало развитию детерминистского подхода при анализе аварий. Доктор Зубер являлся представителем США в международной программе 2D/3D по анализу многомерных эффектов в случае аварии ядерного реактора с потерей теплоносителя или при разрывах трубопроводов. Он отвечал за формулировку методологии масштабирования аварий ядерного реактора, уже тогда считавшихся серьезной угрозой для общества, внося существенный вклад в решение проблемы безопасности.

В отставке доктор Зубер продолжал заниматься профессиональной деятельностью — в должности эксперта Консультативного комитета КАЭ по безопасности и системам защиты ядерных реакторов Комиссии по ядерному регулированию США и в должности консультанта в Институте Йозефа Стефана в Словении.

Вклад доктора Зубера в исследования двухфазного потока и теплообмена был отмечен почетными наградами. Он стал первым обладателем Мемориальной Премии — награды Отделения теплообмена Американского общества инженеров-механиков в 1961, награды за технические достижения от Отделения теплогидравлики Американского ядерного общества в 1990, премии и грамоты за выдающийся вклад и особые достижения от Комиссии по ядерному регулированию. В 2005 г. на 11-й международной конференции по теплогидравлике ядерных реакторов в Гренобле (NURETH-11) был награжден Почетным орденом за выдающиеся достижения в ядерной энергетике. Доктор Зубер был членом Американского общества инженеров-механиков, опубликовал более 50 статей и был редактором нескольких книг.

В жизни он был прекрасным человеком, обладающим острым умом и чувством ответственности перед наукой и техническим сообществом, предельно честным и открытым по отношению к ученым и инженерам. Он всегда помнил про важность практической применимости научных открытий. Большинство его



П. Л. Кириллов и Н. Зубер на конференции в Сан-Франциско (08.10.1999)

выступлений имели назидательный характер. Терпеть не мог тех инженеров, которые не высказывали открыто и прямо свое мнение. Его усилиями при Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе была учреждена исследовательская стипендиальная программа.

Проблемы кризиса теплообмена в каналах по-прежнему остро стояли в 70—80-е годы в энергетике того времени. Создание АЭС в России (ВВЭР, РБМК) и за рубежом (PWR, BWR) потребовало значительного расширения исследований кризиса в разных каналах (трубах и пучках стержней). В России на предприятиях Минэнерго (ВТИ, ЦКТИ), Академии наук (ИВТАН, ЭНИН), Минсредмаша (ИАЭ, НИКИЭТ, ОКБ ГП, ФЭИ), а также в институтах Украинской АН (КПИ, ОПИ) были созданы экспериментальные стенды разных конструкций и мощностей, и на них проведены измерения критических тепловых потоков на одних и тех же круглых трубах при разных значениях давлений, скоростей. Большинство результатов экспериментов согласовались друг с другом с учетом возможных погрешностей. Но в опытах ВТИ была обнаружена область, где происходило **резкое снижение критических тепловых потоков в весьма узком диапазоне паросодержаний**, т. е. при определенных «граничных» паросодержаниях $(x_{гр}^0)$ [11].

Это, во-первых, вызвало определенную тревогу у конструкторов — разработчиков АЭС — в это время пускался блок АМБ Белоярской АЭС. Во-вторых, возникли возражения многих экспериментаторов, которые ранее почему-то не замечали (!) этого ухудшения в своих опытах. Далее мы переходим к трагической истории ученого, много сделавшего в теории и экспериментах по кризису теплообмена. Его биография типична для ученых того времени.

ВАСИЛИЙ ЕФИМОВИЧ ДОРОЩУК



(25.12.1915—10.07.1986)

Василий Ефимович Дорощук родился в Москве, отец работал кондуктором, затем багажным кассиром, мать — рабочая текстильной фабрики. Детство его было нелегким, семье жилось трудно. Как и всем в то тяжелое время. После окончания 8-летней средней школы поступил в Московский паровозный техникум, а по окончании его в 1936 году — в Московский электромеханический институт на факультет теплоэнергетики (1936—1941).

После окончания с отличием института был направлен на работу начальником энергоучастка железнодорожного узла в г. Валуйки Белгородской области. Во время немецкой оккупации этого города работал в Кашире Московской области. После изгнания немцев вернулся на старое место работы. Осенью 1945 года перешел на работу в ТЭЦ-9 Мосэнерго на должность начальника смены котельного цеха. В 1946 г. поступил в аспирантуру Всесоюзного теплотехнического института, в 1949 — защитил кандидатскую диссертацию по теме «Исследование концевых потерь в реактивном лопаточном канале» и перешел на работу во ВТИ на должность старшего научного сотрудника. Позже был заместителем начальника физико-технического отделения ВТИ, затем — руководителем лаборатории физики теплообмена, начальником физико-технического отделения, главным инженером, заместителем директора института по научной работе, а с 1971 года до своей смерти — директором Всесоюзного теплотехнического института.

Работу директором ВТИ он успешно сочетал с научной деятельностью (что бывает очень редко!) по исследованию критических тепловых потоков при кипении воды под давлением. Эти работы раскрыли механизм сложных явлений теплообмена в прямоточных паровых котлах и водоохлаждаемых реакторах и в 1967 году позволили ему защитить докторскую диссертацию по теме «Критические тепловые нагрузки при течении пароводяной смеси в трубах» [11].

Под руководством В. Е. Дорощука в ВТИ были развернуты работы по атомной энергетике. 15 лет он преподавал в заочном энергетическом институте, читал курс «Теоретические основы теплотехники». Несколько его аспирантов защитили кандидатские диссертации (Л. Я. Боровский, Л. Л. Левитан, Б. И. Нигматулин).

Василий Ефимович является автором 75 научных трудов, в том числе 6 монографий. Он был членом нескольких научных Советов по тепловой и атомной энергетике, редакционных советов издательств «Энергия», «Атомиздат».

В 1982 году ему было присвоено звание «Заслуженный деятель науки и техники РСФСР». Награжден орденом «Знак Почета», медалями.

В своей деятельности Василий Ефимович обратил внимание на то, что результаты части экспериментов на стенде ВТИ и данные, полученные непосредственно на реакторе АМБ Белоярской станции, не согласуются с имевшимся тогда массивом опытных данных и не могут быть объяснены на основе общепринятых в то время механизмах кризиса кипения.

Режимы течения двухфазной смеси чрезвычайно разнообразны. В дисперсно-кольцевом режиме по стенкам канала течет волнистая пленка жидкости, с поверхности которой срываются капли (унос жидкости), часть которых снова выпадает на пленку (осаждение). При определенных параметрах пленка становится гладкой, а баланс уноса и осаждения влаги нулевым. Оставшаяся на необогреваемой стенке пленка жидкости испарится, канал перегреется и может сгореть. Такой кризис теплоотдачи, связанный с полным испарением пленки жидкости он назвал кризисом теплоотдачи 2-го рода (в англоязычной литературе — dryout — высыхание стенки).

В конце 60-х и начале 70-х годов в СССР началось массовое строительство АЭС с водо-графитовыми реакторами (РБМК). Должны были быть построены по 4 реактора на Курской, Смоленской, Чернобыльской и Костромской АЭС. В. Е. Дорошук обратился в Правительство (1972) с письмом, в котором утверждал, что проект РБМК — сырой, слишком сложный, небезопасный, имеет положительный паровой коэффициент реактивности, и на нем может произойти крупномасштабная авария.

Прошло 14 лет. 26 апреля 1986 г. произошла именно такая авария на четвертом блоке Чернобыльской АЭС. По воспоминаниям сотрудников, В. Е. зашел в Пролетарский РК КПСС и сказал: «Я же предупреждал вас о возможной аварии». Ему ответили, что настоящий коммунист должен добиваться решения тех вопросов, которые он ставит³. Через 2 месяца В.Е. умер. Победы тогда позиция В. Е., может и не было бы Чернобыльской аварии. Уже после его кончины Постановлением Совета Министров СССР был создан специальный институт АЭП — Атом-энергопроект для работ в том числе по безопасности АЭС.

³ Нигматулин Б. И. О моем учителе. В книге «Дорошук В.Е. Воспоминания, документы, факты. М.: ВТИ. 2015. С. 29.

ДИОНИСИЙ ГРОЕНЕВЕЛЬД

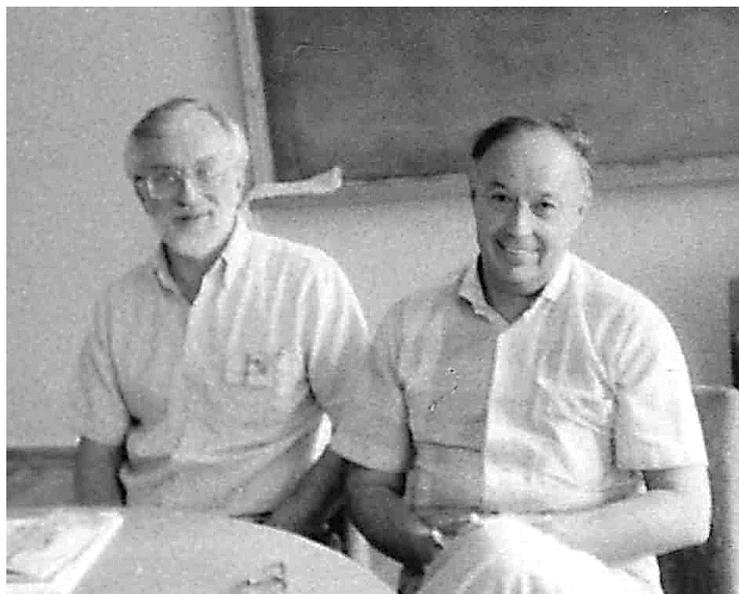


Дионисий Гроеневельд — один из крупнейших современных специалистов Канады и мира в области теплообмена, посвятил значительную часть своей жизни созданию наиболее совершенных таблиц по расчету кризиса теплообмена в каналах.

Жизнь позволила ему овладеть широкими познаниями в самых различных областях ядерной энергетики. В 1974—1980 годах он работал в Вашингтоне, в Комиссии по ядерному регулированию (КАЭ) в США. Затем в 1981—82 гг. в ядерном центре Гренобле Комиссариата ядерной энергии во Франции, потом длительное время (1981–99) был руководителем отдела теплогидравлики в ядерном центре лаборатории Чок-Ривер в Канаде, затем четыре года (1983—1987) — профессор университета в Торонто. Некоторое время в 1989 году работал в Западной Германии, в ядерном исследовательском центре Карлсруэ (FZK), в институте, занимающимся исследованиями тепловыделяющих элементов ядерных реакторов. В последующие годы — Президент и руководитель группы консультантов Канадской комиссии по ядерной энергетике, заслуженный профессор лаборатории Чок-Ривер в Канаде (CRNL). Последние годы работает в университете г. Оттавы (Канада).

За свою научную деятельность награжден рядом премий, медалями и другими наградами. В 1985 г. награжден медалью имени Сташевича от Канадского общества инженеров-механиков, в 1990 г. избран в Совет Международного центра по тепло- и массообмену, в 1993 ему присуждена премия Канадского ядерного общества за научные достижения и разработку метода расчета в области исследований кризиса теплообмена.

В 1994—1999 годах он — руководитель большой международной группы МАГАТЭ в Вене по координационной программе «Теплогидравлика усовершенствованных водоохлаждаемых реакторов» [44, 46, 54]. Эта группа состояла из 15



Д. Гроеневельд и П. Л. Кириллов (Обнинск, 1995 г.)

специалистов разных стран. В 1996 году он получил в Канаде премию за патент по разработке усовершенствованного метода расчета кризиса теплообмена для пучков тепловыделяющих элементов ядерных реакторов CANDU.

Доктор Д. Гроеневельд является членом редакций многих научных журналов — по термодинамике, теплообмену, гидромеханике. Во время своей предшествующей научной деятельности он опубликовал около 145 публикаций в открытой печати и около 80 технических отчетов, 59 статей в реферируемых журналах, 70 докладов на разных конференциях, три главы в разных книгах. Одна из последних его работ 2018 года [56] посвящена обзору методов измерений, компиляции данных на основании 30 000 экспериментальных точек, предсказанию методов расчета критических тепловых потоков в трубах для ядерных реакторов, охлаждаемых водой.

ПРОБЛЕМЫ КРИЗИСА ТЕПЛООБМЕНА

Обратимся к проблемам теории и экспериментальным данным кризиса теплообмена. Отсутствие достаточно представительной теории кризиса теплообмена в двухфазных потоках и расхождение как данных, так и формул для расчетов заставили создать «скелетные таблицы». Идея составления таких таблиц на основании результатов экспериментов, по-видимому, принадлежит В. Е. Дорощуку, публикации которого в 1966—79 гг. положили начало этой работе. Первый вариант таблиц опирался на сравнительно небольшой к тому времени объем экспериментальных данных ВТИ и ряд субъективных соображений о форме зависимости критического теплового потока (КТП) от паросодержания для постоянного диаметра трубы, массовой скорости, давления.

В нескольких институтах России также были получены экспериментальные результаты. Секция тепломассообмена АН СССР создала комиссию по выработке общих рекомендаций. Использовался метод экспертных оценок, представленных от четырех организаций. Результатом работы этой комиссии был выпуск «Рекомендаций по расчету кризиса...» и публикация в журнале. На основании таблиц [26] В. Н. Смолиным и др. была опубликована методика расчета кризиса в виде аппроксимационных формул [31]. В. Е. Дорощуком и сотрудниками ВТИ в 1975 были опубликованы другие таблицы [27]. Следующая версия таблиц, разработанная комиссией экспертов из разных институтов России (ВТИ, ИВТАН, НИКИЭТ, ФЭИ), была опубликована в препринте ИВТАН. Они распространялись как «Таблицы АН СССР» изд. ИВТАН (Рекомендации 1980).

Данные таблиц ИВТАН и ВТИ различались. Поэтому по инициативе ФЭИ в 1981—1983 годах была проведена серия контрольных экспериментов для выяснения причин имеющихся расхождений. Для участия в эксперименте были приглашены девять организаций (ВТИ, ИАЭ, ИТТФ, КПИ, НИКИЭТ, ОКБ ГП, ЦКТИ, ФЭИ, ЭНИС). В каждой организации опыты были проведены по своей методике, на своем стенде, на одной и той же трубе (12×2 мм) при согласованных параметрах ($P = 7, 10, 14, 18$ МПа; $G = 500, 1200, 4000$ кг/м²·с; $L = 1, 3, 6$ м). Результаты контрольного эксперимента показали, что в координатах $q_{кр} = f(x_{кр})$ данные НИКИЭТ, ОКБ ГП, ФЭИ и ЭНИС практически совпали. Ниже расположились данные ИТТФ, еще ниже — КПИ. Данные ВТИ в целом легли выше. В статье [41] имеется краткая публикация об этом контрольном эксперименте. Вероятной причиной некоторого расхождения данных следует полагать разную «гидравлическую жесткость» контуров. К сожалению, необходимых измерений этой характеристики ни на одной установке для исследований кризиса не проводилось и не проводится до сих пор!

В 1980 г. в ФЭИ был создан Центр теплофизических данных, перед которым, среди других задач, была поставлена задача выработки современных скелетных таблиц. Были выпущены несколько версий таблиц (1989, 1991, 1992), опубликованных в препринтах, журналах и докладах на российских и международных конференциях.

В эти же годы в лаборатории Чок-Ривер (Канада) проводилась аналогичная работа Гроеневельдом (1986) с сотрудниками, и была опубликована первая версия таблиц, которая использовалась во многих зарубежных кодах. Наличие в международных публикациях двух или более разных таблиц поставило в повестку дня их согласование и выработку единых справочных данных. Такая работа началась в 1993 году в рамках МАГАТЭ специалистами России, Канады и Германии под руководством Д. С. Гроеневельда. Итогом этой работы была версия скелетных таблиц, разработанная практически международным коллективом специалистов указанных стран. Она была представлена в журнале «Nuclear Engineering & Design» в 1995 году. В этих таблицах содержатся значения критического теплового потока для трубы одного диаметра и разных условий (P – давление, G – массовая скорость, x – массовое паросодержание).

РЕЖИМЫ ТЕЧЕНИЯ В КАНАЛАХ

Области различных видов режимов потока и режимов теплообмена в вертикальной обогреваемой трубе при ($q = \text{const}$) показаны на рис.2. Этот рисунок не требует пояснений, поскольку содержит все необходимые сведения.

Пока жидкость нагревается до температуры насыщения и температура стенки ниже значения, необходимого для парообразования, теплообмен осуществляется конвекцией однофазного потока. В некоторой точке перегрев жидкости у стенки становится таков, что в центрах парообразования могут возникать паровые пузыри, хотя основная масса жидкости еще недогрета до температуры насыщения. Это область пузырькового кипения недогретой жидкости (поверхностное кипение). Разность между температурой насыщения и среднemasсовой температурой жидкости называется недогревом $T_s - \bar{T}_f = \Delta T_{\text{нед}}$. На верхней границе области достигается балансное паросодержание $x=0$. При этом часть жидкости недогрета до температуры насыщения настолько, чтобы средняя энтальпия парожидкостного потока равнялась энтальпии насыщенной жидкости (h'). В области пузырькового кипения насыщенной жидкости, так же как и в области кипения недогретой жидкости, массовое (балансное) паросодержание определяется из условий баланса теплоты: $x = [h(z) - h']/r$. Согласно такому определению x может иметь отрицательные значения и значения больше единицы. Это означает, что в первом случае жидкость недогрета до T_s , а во втором — перегрета или в потоке находится пар.

По мере увеличения паросодержания наступает пробковый или снарядный режим течения. На верхней границе этой области при переходе к дисперсно-кольцевому режиму происходит изменение в механизме переноса теплоты. Процесс кипения в основном сменяется процессом испарения. Кипение может наблюдаться в толстой жидкой пленке, в тонкой пленке образование пузырей обычно подавлено, процесс переноса теплоты нельзя назвать кипением. Теплота передается от стенки конвекцией в пленке к границе раздела пленка — паровое ядро, где

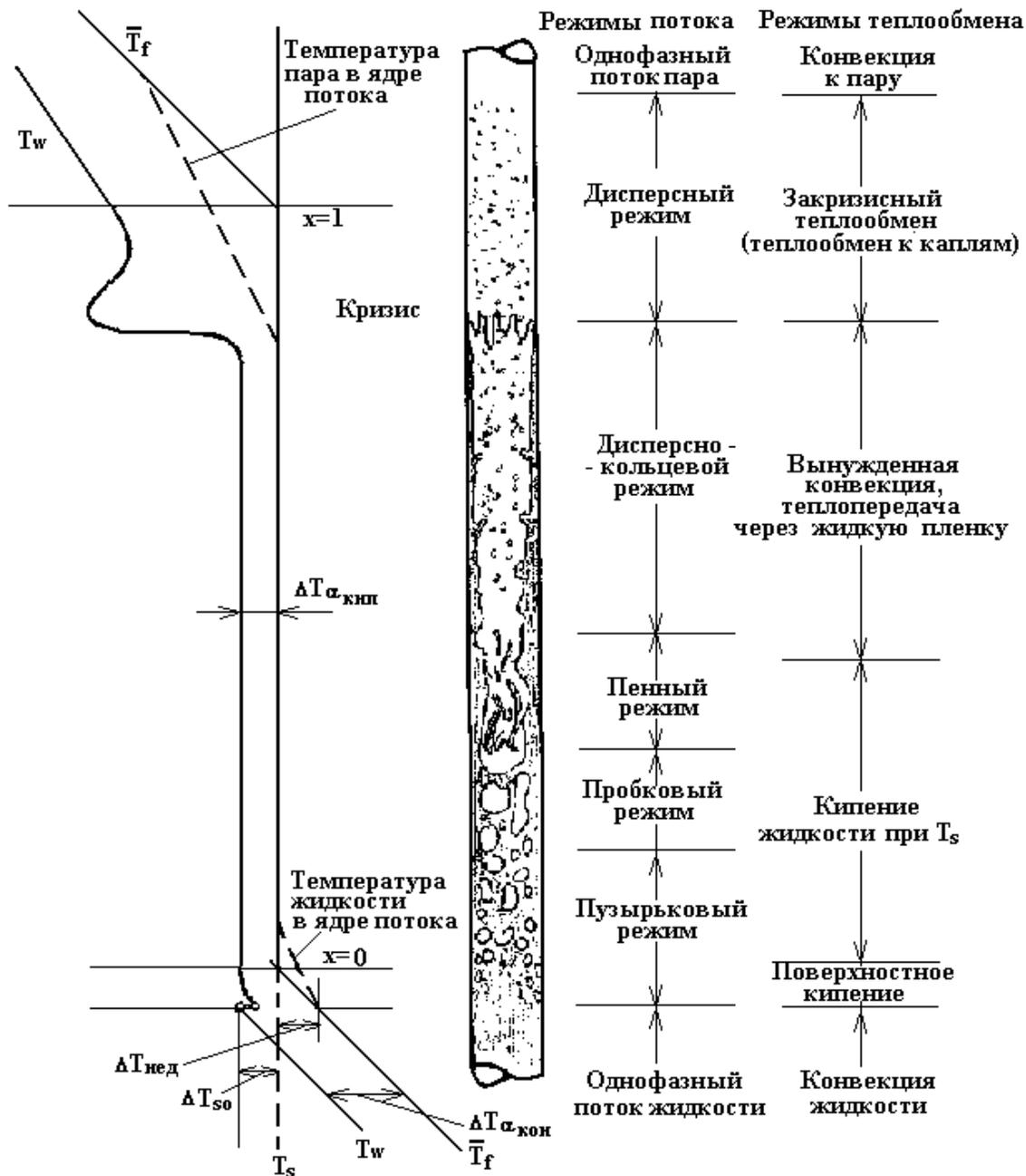


Рис. 2. Режимы течения и режимы теплообмена ($q = \text{const}$)

происходит испарение. На верхней границе этой области происходит полное испарение жидкой пленки и наступает дисперсный режим с постепенным испарением капель в перегретом паре, который переходит в режим конвекции однофазного потока пара. В точке высыхания пленки коэффициент теплообмена резко снижается и при высокой плотности теплового потока температура поверхности может достигнуть недопустимых значений (пережог, кризис). Эта плотность теплового потока называется критической ($q_{кр}$).

Механизм переноса теплоты в условиях $q > q_{кр}$ зависит от режима кипения. Это может быть либо образование конгломерата пузырей пара, экранирующих поверхность нагрева от жидкости, либо осушение поверхности при высыхании жидкой пленки (кризисы I и II рода). Пленочное кипение в условиях вынужденного движения в основном подобно тому, что наблюдается в большом объеме.

Поверхность нагрева покрывается пленкой малотеплопроводного пара, через которую должна передаваться теплота.

Неустойчивость кипения в каналах. В одиночном канале неустойчивость кипения в первую очередь связана с гидродинамической нестабильностью, особенно в контурах с естественной циркуляцией. Несмотря на постоянную мощность, подводимую к каналу, после закипания можно наблюдать колебания расхода. Объяснения причин этого явления следующие. Предположим, в результате какого-либо возмущения расход через канал несколько увеличится. Это приведет, при прочих равных условиях, к уменьшению образования пара, что снизит величину подъемных сил и сокращению расхода. Но уменьшение расхода вызовет увеличение паросодержания, увеличение подъемных сил и, следовательно, должно привести в дальнейшем к увеличению расхода. Последовательность каждого процесса будет происходить с некоторым запаздыванием и вызовет пульсации расхода.

Все эти процессы обладают в большой степени нелинейными связями. Так гидравлическое сопротивление является нелинейной функцией скорости воды и пара, а, кроме того, нелинейной функцией от паросодержания, которое, в свою очередь, зависит от подведенной мощности и расхода.

Гидродинамическая характеристика одиночной парогенерирующей трубы заданного диаметра и длины описывается функцией $\Delta p = f(\rho w)$. Здесь Δp – полное гидравлическое сопротивление канала, состоящее из двух составляющих: Δp_1 – сопротивление экономайзерной части; Δp_2 – сопротивление испарительной части.

КРИЗИС ПРИ ТЕЧЕНИИ В КРУГЛЫХ ТРУБАХ

Физические явления при кризисе и виды расчетных зависимостей

Практические рекомендации для расчетов кризиса кипения в каналах простой формы всегда основываются на экспериментальных данных. Большинство экспериментов проведено на вертикальных трубах с водой в качестве теплоносителя. Отдельные эксперименты проведены на «модельных» средах: фреон-12, CO₂. Обычно нагрев трубы осуществляется пропусканием электрического тока по стенке трубы, а распределение плотности теплового потока по длине достигается изменением толщины стенки трубы. При заданных характеристиках: давлении, расходе и температуре на входе, подводимая к участку мощность, постепенно увеличивается до появления скачка температуры, который обычно возникает у верхнего конца трубы, если энерговыделение равномерно по длине. При более точных измерениях записывается распределение температур по длине трубы, и кризис может возникнуть не у верхнего конца трубы (особенно при неравномерном энерговыделении). Данные могут быть обработаны разными методами и представлены в виде соотношений, связывающих различные параметры.

1. Соотношение, связывающее критическую мощность канала $N_{кр}$ и температуру на входе $T_{вх}$ (или недогрев на входе $\Delta h_{вх}$). Такое представление дает

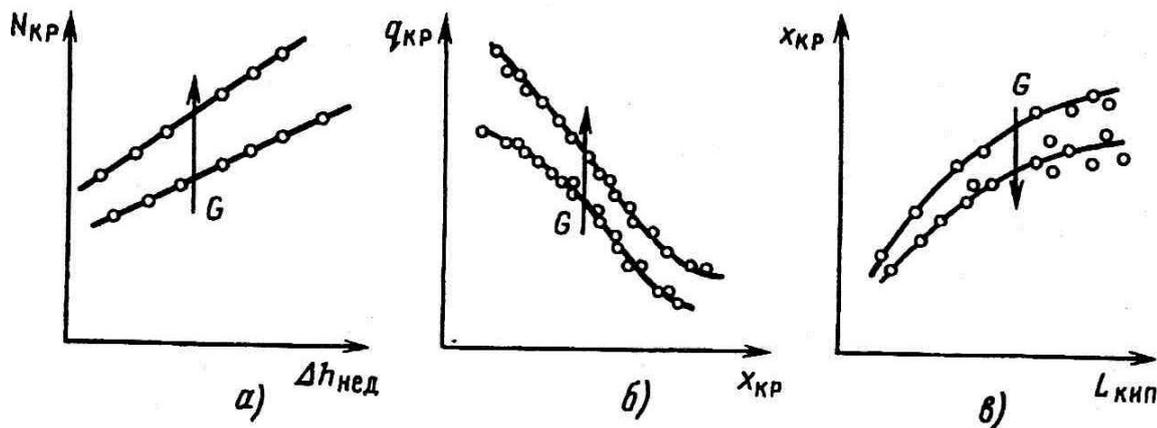


Рис. 3. Различные способы представления данных по кризису теплообмена в каналах наименьшие погрешности, поскольку содержит лишь экспериментально измеренные (первичные) величины. Ошибки в основном связаны с отнесением данных эксперимента к определенному давлению и массовой скорости (рис. 3а):

$$N_{кр} = f(t_{вх}) \text{ или } N_{кр} = f(\Delta h_{вх}) \quad (1)$$

Преимуществами такого вида формул являются их простота и удобство расчета запасов до кризиса теплообмена, поскольку критическая мощность чувствительна к распределению тепловыделения по длине канала (если оно изменяется не резко!) и разного рода локальных отклонений теплового потока. Модификация этого метода представляет данные в виде:

$$q_{кр} = f(\Delta h_{вх}), \text{ где } q_{кр} = N_{кр}/P \cdot L, \quad (2)$$

здесь P, L – периметр тепловыделяющей поверхности и длина канала.

2. Соотношение, связывающее значение критического теплового потока — КТП ($q_{кр}$) и относительную энтальпию потока в месте кризиса $x_{кр}$ (рис. 3б):

$$q_{кр} = f(x_{кр}), \quad (3)$$

здесь $x_{кр}$ находится из уравнения теплового баланса (НВМ — heat balance method)

Для круглой трубы диаметра d

$$x_{кр} = x_{вх} + (4N_{кр} / \pi d^2 G \cdot r); N_{кр} = \pi d / q_{кр}.$$

Отсюда $x_{кр} = x_{вх} + (\pi d / q_{кр} / \pi d^2 G \cdot r) = x_{вх} + (4q_{кр} l / dG \cdot r).$

Функция (3) предполагает постоянную массовую скорость и постоянный диаметр трубы. Влияние длины канала, как показывают результаты экспериментов, обнаруживается лишь при коротких трубах — $l/d < 50$. При больших относительных длинах влияние длины затухает. Погрешности зависимости (3) возрастают по сравнению с погрешностями формул (1), (2) из-за пересчета $N_{кр} \rightarrow q_{кр}$; $x_{вх} \rightarrow x_{кр}$ и неточных значений массовой скорости (ρw) и теплоты испарения r (за счет погрешностей измерений в величине давления).

3. Соотношение, связывающее относительную энтальпию потока в месте кризиса $x_{кр}$ и длину участка кипения l (рис. 3в)

$$x_{кр} = f(l), \quad (4)$$

где $l/L = rx / (rx + \Delta h_{вх}).$

При таком представлении погрешности еще более увеличиваются из-за расчетов $x_{кр}$ и l . Все вышеуказанные соотношения носят эмпирический характер, получаются обработкой первичных данных и лишь косвенно отражают механизм процесса кризиса.

По установившимся представлениям, кризис теплоотдачи при кипении воды в каналах и трубах вызывается уменьшением контакта жидкости с поверхностью нагрева.

Кризис теплоотдачи возникает в результате:

– гидродинамического и теплового разрушения пристенного парожидкостного слоя и образования паровой пленки. Это характерно для недогретой до температуры насыщения жидкости или малого паросодержания;

– сокращения расхода жидкости в пленке, текущей вдоль поверхности (дисперсно-кольцевой режим течения), что связано с процессами испарения, механического уноса жидкости и недостаточного выпадения капель из парожидкостного ядра потока на стенку.

Эти два вида кризиса теплоотдачи получили название кризисов теплоотдачи 1 и 2 рода.

В парожидкостной смеси при постоянном диаметре канала наблюдаются три вида зависимостей $q_{кр} = f(x_{кр})$ (рис. 4). Зависимости, отражающие резкий спад $q_{кр}$ при $x_{кр}$, подобные показанной на рис. 4а для каналов с $d_T \sim 10 \div 15$ мм, наблюдаются в области параметров пароводяного потока $G \approx 500 \div 2000$ кг/(м²с) и $P \approx 5 \div 15$ МПа. Паросодержание, соответствующее изменению наклона в зависимости $q_{кр} - x_{кр}$ или резкому спаду этой зависимости, носит название *граничного* и связывается с высыханием жидкой пленки, текущей по обогреваемой стенке, в условиях, когда выпадение капель жидкости из потока на стенку не компенсирует убыль уносимой и испаряющейся жидкости на стенке. Наступление кризиса в этом случае связывается с недостаточным орошением стенки каплями (рис. 4а).

Выпадение капель (орошение) увеличивается с ростом массовой скорости и давления. Интенсивность орошения является основным фактором, определяющим отвод тепла от стенки и ее температурный режим при $p > 16$ МПа и $G > 2500$ кг/(м²с). Рис. 4б отражает некоторый промежуточный вид зависимости. Значения граничного паросодержания, т.е. паросодержания, при котором наблюдается спад зависимостей $q_{кр}(x_{кр})$, определяются из таблиц, где они представлены в виде $x_{кр} = f(p, G)$ для $d(\text{const}) = 8$ мм.

Полное описание процесса кризиса при вынужденном течении, основанное на фундаментальных уравнениях, пока практически невозможно. Современные знания допускают лишь приближенную формулировку отдельных явлений и граничных условий. Поэтому расчетные рекомендации основываются на полуэмпирических методиках или на чисто эмпирических соотношениях. Их основой являются банки экспериментальных данных. Попытка найти объективный подход к созданию расчетных рекомендаций вместо частных эмпирических формул заставила обратиться к скелетным таблицам для одного диаметра трубы, которые строятся на

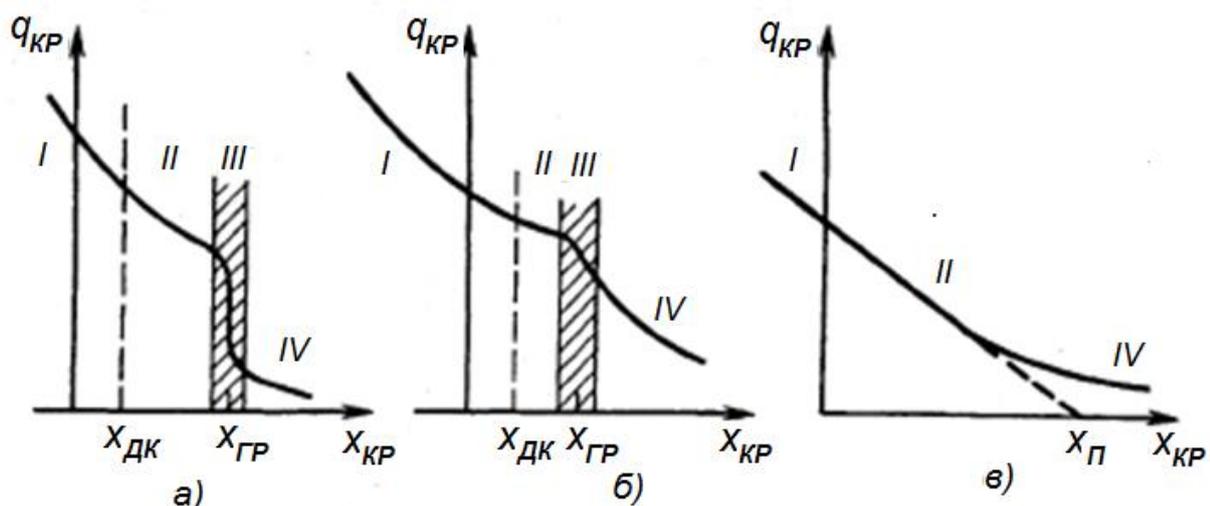


Рис. 4. Виды зависимостей $q_{кр}(x_{кр})$ для пароводяного потока в круглых трубах:
 а) $p=3-16$ МПа, $G=500-2500$ кг/(м²с); б) промежуточный характер зависимости;
 в) $p>16,0$ МПа, $G>2500$ кг/(м²с);

$x_{дк}$ — начало дисперсно-кольцевого режима; $x_{п}$ — предельное паросодержание;
 $x_{гр}$ — граничное паросодержание;

I — кризис, связанный с переходом пузырькового кипения в пленочное; II — то же, но в дисперсно-кольцевом режиме; III — кризис, связанный с высыханием жидкой пленки;
 IV — кризис орошения; //// — область паросодержаний при $x_{гр}$

основании банков данных. Инициатором создания скелетных таблиц был В. Е. Дорожук, работы которого в 1966—1970 гг. положили начало такому подходу [11].

Таблицы составляются путем осреднения экспериментальных данных для определенного выделенного режима (давления, массовой скорости, паросодержания). Этот метод дает возможность охватить более широкий диапазон параметров при соблюдении плавности и непрерывности зависимостей.

Наиболее крупные банки данных по кризису теплообмена в трубах

Организация	Год	Количество экспериментальных точек до и после отбраковки
Физико-энергетический институт (СССР)	1969	8072/8067
ГИИМ, ИАЭ, НИКИЭТ (ЧССР, СССР)	1984	15846*
Лаборатория Чок-Ривер и университет Оттавы (AECL-UO, Канада)	1986	15422/13026
Физико-энергетический институт (СССР)	1991	25775
Лаборатория Чок-Ривер и ФЭИ (Канада, Россия)	1995	29005/21897
Лаборатория университета Пардью (США) (PU-BTPFL)	1999–2001	32544/30398
Лаборатория Чок-Ривер, университет Оттавы и др. (Китай, Турция) (AECL et al)	2007	33175**/25217

* Этот банк включает данные для труб, кольцевых каналов, пучков стержней. Примерно только одна треть относится к трубам.

** Здесь дополнительно включены 7545 точек из 33 источников (после 1991 г.)

Последний вариант таблиц (2006 г.) содержится в [53]. В них даются значения КТП при определенных p , G , $x_{кр}$ для $l/d > 80$ и $T_{вх} < T_s$. Пользоваться скелетными таблицами проще, чем расчетными формулами, так как не требуется знаний физических свойств жидкости и пара. Таблицы поддаются коррекции при появлении дополнительных экспериментальных данных. Кроме того, они могут быть опорными для пересчета КТП на каналы другой формы (кольцевые каналы, пучки стержней и т. д.). Для труб других диаметров пересчет выполняется по формуле

$$Q_{кр, d} \approx q_{кр, 8}(8/d)^{0,33} \quad (5)$$

При разработке формул и таблиц для оценки погрешностей используются два подхода, отличающиеся задаваемыми параметрами: 1) в первом случае задаются параметры на входе в канал (НВМ)⁴ 2) во втором случае используются параметры в месте кризиса (DSM)⁵. Последние рассчитываются из уравнения теплового баланса. Погрешности, оцененные по этим двум методам, могут различаться в 1,1—3,5 раза в зависимости от области параметров. Погрешность описаний по параметрам в месте кризиса много больше, поскольку результаты первичных измерений (расход, мощность, энтальпия на входе) приходится пересчитывать для определения паросодержания и локальной плотности теплового потока в месте кризиса.

Эпюры энерговыделения в ядерном реакторе могут быть разнообразными и изменяться в процессе выгорания топлива. Важно правильно учитывать влияние продольной неравномерности энерговыделения на критический тепловой поток (K_z). Одним из распространенных способов является использование некоторой поправки F_f к значению КТП при равномерном энерговыделении (и при прочих равных параметрах: геометрических и режимных), которую называют форм-фактором:

$$\widetilde{q}_{кр} = q_{кр} F_f \quad (6)$$

Экспериментальное определение места кризиса обычно связано со значительной ошибкой. Однако это почти не сказывается на точности экспериментального определения значения критической мощности канала.

Механизмы возникновения кризиса кипения в горизонтальных и вертикальных каналах качественно одинаковы. При малых скоростях при горизонтальном движении потока вследствие гравитационного эффекта происходит расслоение фаз, в результате значения критической плотности теплового потока оказываются меньше, чем в вертикальных.

Влияние различных параметров на значения критических тепловых потоков впервые подробно обсуждалось в книге Тонга [51], а потом в работах Л. Н. Полянина и др. [39], А. Олехновича [50], В. В. Сергеева [57]

Не вдаваясь в подробности, следует отметить, что общая тема обсуждения заключалась в выборе между двумя различными методами расчета значений КТП и запаса до кризиса с использованием формул на основе локальных параметров:

⁴ Метод теплового баланса, НВМ — heat balance method;

⁵ Метод прямой подстановки, DSM — direct substitute method.

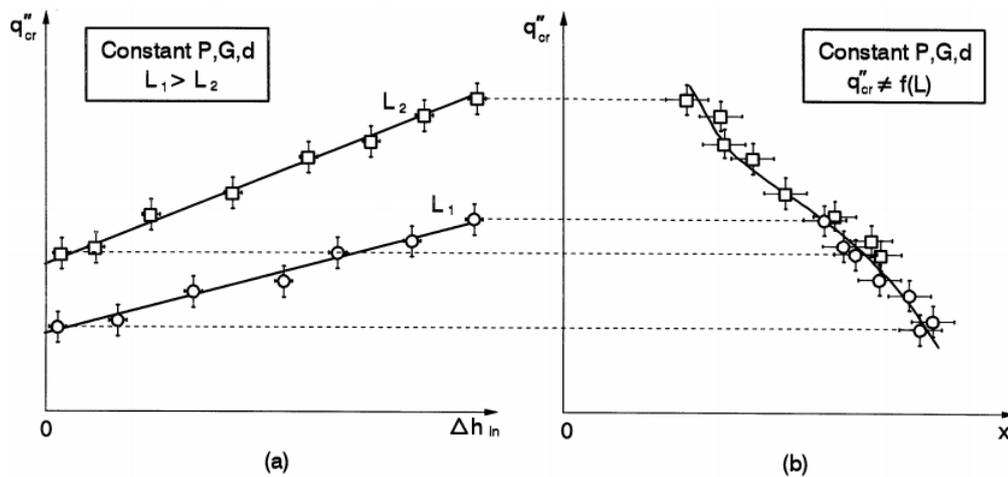


Рис. 6. Графики КТП в виде $q_{кр} = f(\Delta h_{in})$ (a) и $q_{кр} = f(x)$ (b)

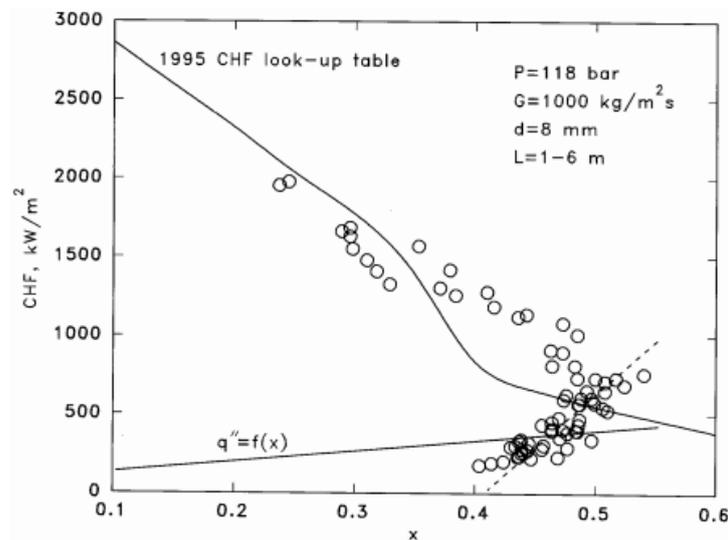


Рис. 7. КТП в зависимости от паросодержания на выходе (данные Зенкевича и др., [16])

Отдельную дискуссию вызывает вопрос о наклоне графика функции $q_{кр} = f(x)$ при сравнении двух методов. Как видно на рис. 7, где представлены данные Зенкевича и др. [16], начиная с $x \approx 0,45$ наклон графика $q_{кр} = f(x)$ меняет знак и становится положительным. Аналогичные тенденции можно наблюдать в работах Катто (1981), Смолина и Семеновкера [38], Олехновича и др. [50]. Тем не менее расположение линий $q = f(x)$ и $q_{кр} = f(x)$ таково, что НВМ должен все же давать более низкую дисперсию, чем DSM. Во-вторых, вообще говоря, можно создать формулу для КТП и с положительным наклоном при увеличении паросодержания (рис. 8). Можно установить эмпирическое правило, которое гласило бы, что если использование НВМ не приводит к уменьшению дисперсии точек относительно графика $q_{кр} = f(x)$, то такое соотношение оставляет желать лучшего. В области высоких паросодержаний и малых массовых скоростей скелетная таблица КТП (1995) имеет серьезные проблемы.

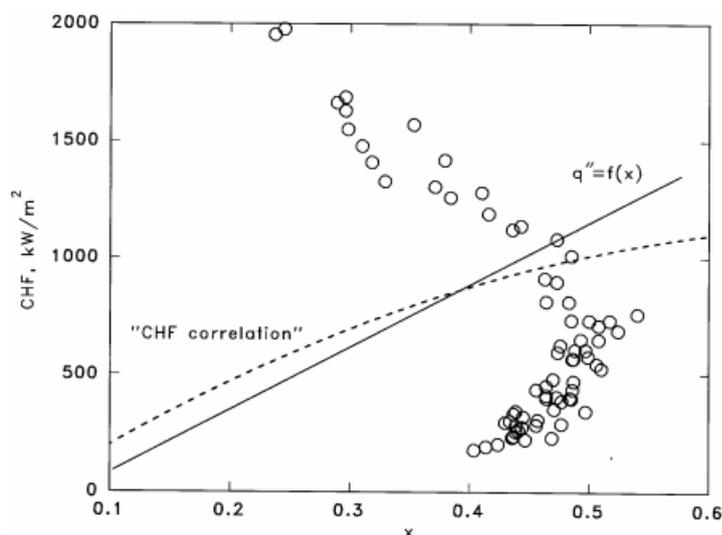


Рис. 8. Дисперсии НВМ и DSM для кривой КТП с положительным наклоном (данные Зенкевича и др., [16]).

Представляя КТП как функцию паросодержания или любого другого производного параметра, мы совершаем, в соответствии с правилами регрессионного анализа, две относительно серьезные ошибки. Мы представляем независимую переменную как функцию зависимой переменной (в математическом смысле) и мы представляем переменную, которая имеет меньшую неопределенность в терминах переменной, которая имеет более высокую неопределенность. С этой точки зрения было бы более логичным представить критическое паросодержание как функцию теплового потока. Вид функции $q_{кр} = f(x)$ является скорее вопросом исторической традиции, чем необходимости (Смолин и Семеновкер [38]). Использование термодинамического паросодержания вместо недогрева на входе и длины обогрева может быть оправдано только в том случае, если это приводит к уменьшению числа переменных, которые определяют КТП. Здесь не только уменьшается число чисто технических проблем, возникающих при разработке корреляции для КТП. Если использование определенного параметра исключает влияние некоторых других глобальных параметров, существует определенная надежда, что формулы или таблица может быть использована для систем более сложных, чем простой случай — равномерно нагретые круглые трубки.

Корректная оценка запаса до кризиса может быть сделана только в том случае, если известна неопределенность расчета КТП по конкретной формуле. Поэтому важно какую дисперсию (среднеквадратическую ошибку), возникающую при использовании НВМ или DSM, следует брать для определения запаса мощности реактора. Ответ на этот вопрос не является однозначным. По мнению Олехновича, дисперсию НВМ можно использовать тогда и только тогда, когда запас реактора до кризиса рассчитывается на базе условий на входе, тогда как дисперсия DSM должна применяться, если для анализа используются локальные параметры. К сожалению, это нельзя проиллюстрировать графически, поскольку переменные q , P , G , L и $\Delta h_{вх}$ независимы.

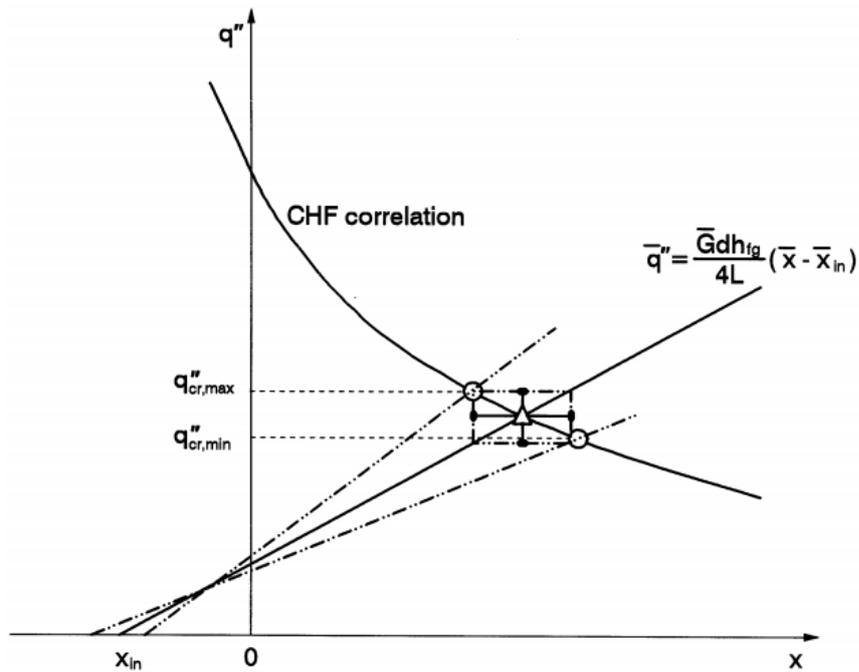


Рис. 9. Неопределенность «идеальной» формулы для КТП

Прежде чем определить КТП как функцию паросодержания, сначала необходимо определить само его значение. В этот момент появляется дополнительная неопределенность, а именно: из-за того, что мы не знаем точные теплогидравлические параметры в канале реактора, мы не можем узнать точное паросодержание (рис. 9).

В представлениях дисперсиях НВМ и DSM существует логическое противоречие. Фактически, исходя из условий на входе, определяется термодинамическое паросодержание, затем вырабатывается формула и определяется соответствующая дисперсия. Затем, возвращаясь к условиям на входе, переопределяется новое значение дисперсии. Дисперсия, полученная косвенным образом, не может использоваться для анализа качества корреляции, особенно для оценки запаса до кризиса, поскольку она является характеристикой выборки экспериментальных результатов и конкретной четко определенной зависимости в данной системе координат. Таким образом, достоверность соотношения для КТП может быть охарактеризована только дисперсией DSM или, более правильно, доверительными пределами, определенными с использованием метода прямой замены.

Ранее это обстоятельство обсуждалось в работе Полянина Л. Н. и др. [39], где сообщалось, что при использовании скелетных таблиц и расчетных формул следует иметь в виду явление параметрического искажения. По мнению авторов этой работы, сущность заключается в следующем: критический тепловой поток можно определять на основе локальных условий, принимая в качестве независимой переменной массовое расходное паросодержание в месте возникновения кризиса. Если считать влияние длины канала несущественным, то выражение $q_{кр}$ для круглой трубы будет иметь вид:

$$q_{кр} = f_1(p, G, x, d),$$

где p – давление, G – массовая скорость, d – диаметр.

Если же использовать параметры на входе в трубу $h_{\text{вх}}$, длину l , то зависимость будет иметь вид:

$$q_{\text{кр}} = f_2(p, G, h_{\text{вх}}, d, l).$$

Обе зависимости f_1 и f_2 могут обеспечить достаточную точность для инженерных расчетов. Однако они не пригодны для определения местных условий кризиса теплообмена (КТП). При анализе совместного влияния диаметра трубы и местного паросодержания на КТП или диаметра и энтальпии на входе $h_{\text{вх}}$ можно прийти к противоречивым выводам относительно влияния диаметра трубы на значение $q_{\text{кр}}$.

Аналогичная ситуация наблюдается при анализе влияния массовой скорости G . Пересечение кривых $q_{\text{кр}}(x)$ для различных массовых скоростей, когда изменение x при фиксированном расходе достигается изменением $h_{\text{вх}}$, характеризует появление обратного влияния G на $q_{\text{кр}}$. Если же данные представить в виде $q_{\text{кр}}(h_{\text{вх}})$, то кривые пересекаются и обратного влияния G не обнаруживается.

Отмеченные взаимосвязи между параметрами характерны и для пучков стержней, и для кольцевых каналов. Наличие в этом случае необогреваемой поверхности (эффект холодной стенки) приводит к тому, что при высоких паросодержаниях по ней течет более толстая водяная пленка, чем по стержням, и, таким образом, часть жидкости не участвует в процессе отвода тепла от нагретой стенки.

Механизмы кризиса теплообмена на основе сопоставления диаграмм кризиса и уноса

Рассматривая двухфазный поток в вертикальной обогреваемой трубе, выделяют три зоны — стенку, двухфазную пленку и двухфазное ядро потока. Математическая модель дисперсно-кольцевого и дисперсного потоков представляет собой систему уравнений в частных производных. Модель включает задачу теплообмена (три уравнения — для стенки, жидкой пленки и парового ядра потока); задачу массообмена (четыре уравнения — для каждой фазы пленки и ядра); гидродинамическую задачу (восемь уравнений — по два уравнения для фаз ядра и пленки) и два уравнения состояния — всего семнадцать уравнений. Искомыми величинами являются: поля температуры во всех зонах (три величины), поля концентраций для каждой среды (четыре величины), восемь компонент скоростей — по две для каждой среды (ядро и пленка), поля давлений в зонах (две величины) — всего семнадцать двумерных параметров потока. Сложность задачи, неясность временных и граничных условий, неизбежность упрощений на каждом этапе делают результат решения этой математической задачи малонадежным даже для простейшего случая — кипения в большом объеме, не говоря уже о кипении в каналах.

При кипении в большом объеме увеличение плотности теплового потока сверх определенного значения ($q_{\text{кр}}$) вызывает резкое повышение температуры поверхности. Критический тепловой поток (КТП) в этом случае зависит в основном от свойств жидкости и пара, которые определяются давлением. Только по традиции эта величина ($q_{\text{кр}}$) используется для случая течения в каналах.

На характер кризиса теплообмена при вынужденном течении влияет гораздо большее число параметров, чем в случае большого объема. Тепло от поверхности отводится двумя процессами — конвекцией и испарением. С увеличением плотности теплового потока доля тепла, снимаемая испарением, увеличивается и перед наступлением кризиса составляет тем большую долю, чем выше давление.

Поэтому плотность потока тепла приближенно можно связать с массовым потоком испаряемой жидкости: $q \sim r \cdot m$. Для воды при давлении 14 МПа и массовой скорости ~ 1000 кг/(м²·с) $q_{кр}$ имеет порядок (1–3) МВт/м². Поскольку теплота испарения воды $r \sim 1000$ кДж/кг, то поток массы на испарение составляет по порядку величины $m \cong (1–3)$ кг/(м²·с), т. е. поперечный поток массы, идущей на испарение, составляет всего 0,1–0,3 % от продольного массового потока. Несмотря на казалось бы незначительное изменение в его значении, это указывает на сильнейшее влияние процессов массообмена. Поэтому важно рассматривать процессы массообмена и кризиса совместно. Это можно сделать на примере дисперсно-кольцевого режима двухфазного потока, который занимает наиболее значительный интервал паросодержаний.

Поток в этом режиме состоит из двух областей: пленки жидкости, движущейся по стенке с расходом m'_f и ядра потока, состоящего из пара (m'') и капель жидкости (m'). В общем случае жидкие капли могут выпадать на поверхность пленки (с интенсивностью D), а с поверхности волн пленки происходит унос капель вследствие механического взаимодействия с паром (E_M) и кипения внутри пленки (E_B).

Наступление кризиса в дисперсно-кольцевом потоке обычно связывают с прекращением расхода жидкости в пленке. Уравнение баланса массы для пленки связывает выпадение капель на поверхность пленки (D) за вычетом суммарного уноса ($E_M + E_B$) и вычетом q/r (интенсивность испарения пленки). Сечение кризиса $z_{кр}$ можно найти, задав нулевой поток в пленке $m'_f = 0$ и затем связать его со значением теплового потока q .

Однако такой подход будет весьма приближенным по двум причинам. Не всегда наступление кризиса связано с прекращением расхода жидкости в пленке. Есть режимы, когда при кризисе расход в пленке не равен нулю. Во-вторых, предположение об аддивности процессов испарения, уноса и выпадения жидкости очень приближенно и результаты интегрирования уравнения баланса массы будут ближе к истине лишь в том случае, когда интенсивность одного из этих процессов будет преобладающей.

Распределение жидкости между ядром потока и пленкой является одной из важных характеристик. Диаграмма $E = m'_d / m' = f(x)$ называется «диаграммой уноса» и позволяет выяснить некоторые закономерности кризиса теплообмена. Если кривая относится к адиабатическим условиям, то называется кривой «гидродинамического равновесия», чему соответствует равенство потоков отложения

и уноса капель. Эта диаграмма исследовалась Хьюиттом [23]. Данные, полученные сотрудниками ФЭИ — Болтенко Э. А., Пометько Р. С., о содержаниях воды и пара в потоках парожидкостных смесей в трубах содержатся в препринтах ФЭИ: № 807, 847 (1978); № 983,1066 (1980); № 1377 (1982) и № 2133 (1990).

Зависимость $q_{кр}(x_{кр})$ имеет сложный характер. Это обсуждалось в работах [14—21]. С современной точки зрения на кривой можно выделить пять зон: (1) кипения при недогреве; (2) пузырькового кипения; дисперсно-кольцевого потока (3, 4, 5).

В областях (1), (2) кризис связывается с переходом пузырькового кипения в пленочное, хотя механизм в деталях еще до конца не исследован. Это могут быть гидродинамические (например, барботажные) процессы в пограничном слое или образование сухих пятен при осушении поверхности между гребнями волн. Область дисперсно-кольцевого потока начинается при паросодержании, которое, по видимому, не зависит от величины теплового потока и определяется лишь гидродинамическими условиями.

Результат анализа совместных зависимостей $E(x)$ и $q_{кр}(x_{кр})$ показал, что разным комбинациям параметров (давление, массовая скорость, паросодержание) соответствуют разные процессы, определяющие кризис.

При низких давлениях и невысоких паросодержаниях $x_{ндк} < x < x_{гр}$ доля жидкости в пленке относительно велика. Это определяется устойчивостью пленки из-за больших значений поверхностного натяжения и малых плотностей пара. Испарение пленки вызывается в основном пузырьковым уносом ($E_v \sim q$) и кризис наступает при конечном расходе жидкости в пленке. При паросодержаниях $x > x_{гр}$ кризис связан с недостаточным орошением поверхности каплями ($D \sim 0$).

С повышением давления доля жидкости в пленке становится меньше вследствие меньшей устойчивости пленки (меньше величина поверхностного натяжения и большие плотности пара). В этих условиях преобладает унос жидкости из пленки (E_m). Кризис в этом случае наступает при полном истощении пленки ($m'_f = 0$).

Во всех случаях, чем выше плотность теплового потока, тем выше скорость пара, оттекающего от стенки, — $w'' \sim q/rp''$. Этот поток препятствует выпадению капель, а при малых q обеспечивается более интенсивное орошение стенки каплями («кризис орошения»). Промежуточная зона охватывает область с примерной компенсацией процессов уноса и осаждения капель. Спад $q_{кр}$ здесь связывается с уменьшением выпадения капель на пленку и проявляется в ограниченной области параметров (500—2000 кг/(м²·с), $p \leq 15$ МПа).

ВЫВОДЫ

1. Исследования распределения жидкости в потоке парожидкостной среды показали, что увеличение массовой скорости, диаметра трубы и понижение давления приводят к уменьшению доли жидкости, текущей по стенке в виде пленки. Предложенный метод расчета распределения жидкости и граничных паросодержаний в обогреваемых каналах на основании данных при гидродинамическом равновесии приводит к достаточно удовлетворительным результатам.

2. В исследованной области режимных параметров подтвержден сложный характер зависимости критического теплового потока от паросодержания. Установлено, что:

а) При паросодержаниях $x_{кр} < x_{гр}$ в дисперсно-кольцевом режиме течения кризис происходит при наличии расхода жидкости в пленке. Полученные данные свидетельствуют в пользу механизма, связанного с испарением пленки между гребнями волн.

б) Кризис теплоотдачи, происходящий при $x_{кр} = x_{гр}$ обусловлен полным испарением пленки жидкости на стенке при суммарном потоке массообмена равно нулю и, по-видимому, при отсутствии выпадения капель из ядра на пленку. В области срыва жидкости из пленки поток массообмена пропорционален тепловому потоку.

в) Увеличение критических паросодержаний выше $x_{гр}$ обусловлено выпадением капель из ядра на пленку при тепловых потоках $q_{кр} < q_{кр}^{\min}(x_{гр})$.

3. В каналах с тепловой нагрузкой, убывающей к выходу, возможен кризис орошения, происходящий вверх по потоку. Он характеризуется паросодержаниями $x_{кр} \geq x_{гр}$ и тепловыми потоками на выходе из канала $q_{кр} < q_{кр}^{\min}(x_{гр})$.

4. Увеличение критической мощности для каналов с турбулизаторами, расположенными в потоке, связано с более высокими значениями расхода в пленке при высоких паросодержаниях и переносом капель из ядра потока на пленку. Для усиления выпадения жидкости из ядра потока на пленку необходимо выбрать правильную геометрию завихрителей-турбулизаторов для нужных давлений и скоростей.

5. В результате исследования критических тепловых потоков в пучках твэлов, в частности, установлено, что:

– некоторые закономерности, разработанные для труб, справедливы и для сложных каналов: совпадение критических мощностей при равномерном и косинусоидальном тепловыделении, более высокие значения критических тепловых потоков при равномерном тепловыделении, чем при косинусоидальном;

– увеличение эквивалентного гидравлического диаметра и повышение давления в целом приводят к повышению критических тепловых потоков.

Список литературы (в хронологическом порядке)

1. Nukiyama S. The Maximum and Minimum Values of the Heat Q Transmitted from Metal to Boiling Water under Atmospheric Pressure // Journal Japan Soc. Mech. Eng. 1934. V. 37. no. 206. Pp. 367–374; English translation was twice in: Int. Jour. of Heat and Mass Transfer. 1966. V. 9. Pp. 1419—1433; 1984. V. 27. Pp. 959–970.
2. Кутателадзе С. С. Основы теории теплопередачи при изменении агрегатного состояния вещества. Л.: Машгиз. 1939. 136 с.
3. Кутателадзе С. С. Теплопередача при конденсации и кипении. М., Л.: Машгиз, 1949. 164 с.
4. Кутателадзе С. С. Гидродинамическая теория изменения процесса кипения при свободной конвекции // Изв. АН СССР ОТН. 1951. № 4. С. 529–536.
5. Кутателадзе С. С. Теплопередача при конденсации и кипении. 2-е изд. доп. и перераб. М: Машгиз. 1952. 231 с.
6. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. М., Л.: Машгиз. 1957. с. 383; (Последнее 5-е пер. и доп. издание. М.: Атомиздат, 1979.)
7. Субботин В.И., Зенкевич Б.А., Судницин О.А., Кротов В.И., Песков О.Л. Исследование теплоотдачи к пару и воде, кипящей в трубах при высоком давлении / Под ред. Долллежаля Н.А. М.: Атомиздат. 1958.
8. Kutateladze S. S. Heat Transfer to Condensation and Boiling. Translate Rimshow. Washington. 1959. 207 p.
9. Zuber N. Hydrodynamic aspects of boiling heat transfer // Jour. Physics and mathematics. 1959. US AEC.(AECU-4439).(См. пер. с англ. ОНТИ ЦКТИ. 1963. 188 с.).
10. Zuber N., Tribus M., Westwater J. W. The hydrodynamic crisis in pool boiling of saturated and subcooled liquids. Int. Dev. Heat Transfer. V. 2. 1961. 230 p.
11. Дорошук В. Е. Кризисы теплообмена в трубах: Дисс. ... докт. техн. наук. М.: ВТИ. 1966.
12. Bennett A.W., Hewitt G.F., Kearsley H.A., Keeys R.K.F., Pulling D.J. Studies of burnout in boiling heat transfer to water in round tubes with non-uniform heating. UKEA. Rep. AERE-R5076.1966.
13. Смолин В. Н., Поляков Л. Н. Критический тепловой поток при продольном обтекании пучка стержней // Теплоэнергетика. 1967. № 4. С. 54–58.
14. Bergles A.E., Roos J.P., Bourne J.G. Investigation of boiling flow regimes and critical heat flux. U. S. Atomic Energy Commission Rep. US AEC-NYO-3304-13. 1968.
15. Тонг Л. Теплоотдача при кипении и двухфазное течение / Пер. с англ. М.: Мир. 1969. 344 с.
16. Зенкевич Б.А., Песков О.Л., Петрищева Г.А., Сергеев Н., Субботин В.И. Анализ и обобщение опытных данных по кризису теплоотдачи при вынужденном течении кипящей воды в трубах. М.: Атомиздат. 1969.
17. Осмачкин В. С. Кризис теплоотдачи при движении кипящей воды вдоль пучков тепловыделяющих стержней: Препринт ИАЭ-2014. Москва. 1970.
18. Дорошук В. Е. Кризисы теплообмена при кипении в трубах. М.: Энергия. 1970. 344 с.
19. Осмачкин В. С, Лыцова Н. Н. О расчете критических тепловых нагрузок в пучках стержней: Препринт ИАЭ-2204. Москва. 1972.
20. Collier J. C. Convective boiling and condensation // McGraw-Hill. N.Y. 1972. Pp. 248–313.

21. Groeneveld D. G. The occurrence of upstream dry out uniformly heated channels // Heat Transfer Conf. Tokyo. 1974. V. 4. Pp. 265–269.
22. Смолин В. Н. Модель механизма кризиса теплоотдачи при движении пароводяной смеси и методика расчета кризисных условий в трубчатых твэлах. Исследование критических тепловых потоков в пучках стержней // Семинар СЭВ ТФ-74. 1974. С. 209–124.
23. Хьюитт Дж., Холл-Тейлор. Кольцевые двухфазные течения. / Пер. с англ. М.: Энергия. 1974. 408 с.
24. Кириллов П. Л. Расчет критических тепловых нагрузок при кипении воды // В кн. «Кризис теплообмена при течении в каналах». ФЭИ, Обнинск, 1974. С. 100–157.
25. Осмачкин И. С., Лыцова Н. Н. Сравнение опытных данных по условиям кризиса теплообмена в моделях топливных сборок реакторов ВВЭР с результатами расчёта по методике ИАЭ: Препринт ИАЭ-2558. М. 1975.
26. Рекомендация по расчету кризиса теплоотдачи при кипении воды в равномерно обогреваемых круглых трубах. Науч. совет по комплексной пробл. // ВАНТ. Теплофизика. Секция «Тепломассобмена». М., 1975. С. 24.
27. Дорошук В. Е., Левитан Л. Л., Ланцман Ф. П. Рекомендации по расчету кризисов теплообмена в круглой трубе при равномерном тепловыделении // Теплоэнергетика. 1975. № 12. С. 66–70.
28. Табличные данные для расчета кризиса теплоотдачи при кипении воды в равномерно обогреваемых круглых трубах // Теплоэнергетика. 1976. № 9. С. 90–92.
29. Тонг Л. Кризис кипения и критический тепловой поток. М: Атомиздат. 1976. 100 с.
30. Полянин Л. Н. Расчёт критической мощности тепловыделяющих каналов сложной формы // Атомная энергия. 1977. Т. 42. Вып. 6. С. 457–460.
31. Смолин В. Н., Шпанский С. В., Есиков В. И. и др. Методика расчета кризиса теплоотдачи в трубчатых твэлах при охлаждении их водой и пароводяной смесью // Теплоэнергетика. 1977. № 12. С. 30–35.
32. Marinelli V. Critical heat flux: a review of recent publication // Nuclear Technology. 1977. V. 34, № 2. Pp. 135–171.
33. Астахов В. И., Безруков Ю. А., Логвинов С. А., Брантов В. Г. Исследование влияния профиля тепловыделения по длине на кризис теплообмена в пучках стержней // Семинар ТФ-78, «Теплофизические исследования для обеспечения надежности и безопасности ядерных реакторов водо-водяного типа». Будапешт, 1978. Т. 2. С. 589–600.
34. Смолин В. Н., Шпанский С. В., Есиков В. И., Седова Т. К. Экспериментальные данные и методика расчета кризиса теплоотдачи при кипении воды, циркулирующей в трубах с равномерным и неравномерным тепловыделением // ВАНТ. Сер. Физика и техника ядерных реакторов. 1979. Вып. 5(9). С. 3–160.
35. Астахов В. И., Безруков Ю. А., Логвинов С. А. Учет аксиальной неравномерности тепловыделения при определении запасов по кризису теплообмена в реакторе типа ВВЭР // ВАНТ, сер. Физика и техника ядерных реакторов. 1979. Вып. 5(9), С. 161–168.
36. Рекомендация по расчету кризиса теплоотдачи при кипении воды в круглых трубах: Препринт 1-57. Ин-т высоких температур АН СССР. 1980.
37. Bergles A. E., Collier J. G., Delhaye J. M., Hewitt G. F., Mayinger F. Two-phase flow and heat transfer in the power and process industries // Hemisphere Publ. Corp. Washington, 1981. P. 256–280.
38. Смолин В. Н., Семеновкер И. Е. Области существования двух видов зависимости критического паросодержания от плотности теплового потока // Теплоэнергетика. 1981. № 4. С. 6–8.

39. Полянин Л. Н., Ибрагимов М. Х., Сабелев Г. И. Теплообмен в ядерных реакторах. М.: Энергоиздат, 1982.
40. Дорошук В. Е. Кризисы теплообмена при кипении воды в трубах. М.: Энерггоатомиздат, 1983.
41. Кириллов П. Л., Песков О. Л., Сердунь Н. П. Контрольный эксперимент по кризису теплоотдачи при течении воды в трубах // Атомная энергия. 1985. Т. 57. № 6.
42. Groeneveld D. C., Cheng S. C., Doan T. AECL-UO Critical Heat Flux Lookup Table // Heat Transfer Engineering. 1986. V. 7. № 1-2. P. 46–62.
43. Кириллов П. Л., Бобков В. П. Скелетные таблицы по кризису теплообмена в трубах // Атомная энергия. 1991. Т. 71. № 1. С. 18–28.
44. Groeneveld D. C., Leung L. K. H., Kirillov P. L., Bobkov V. P., Erbacher F. J., Zeggel W. An Improved Table Look-Up Method for Prediction the CHF // Proc. NURETH-6, 1993. V. 1. P. 223–230.
45. Бобков В. П., Виноградов В. Н., Зятнина О. А., Козина Н. В. Метод оценки кризиса в каналах сложного профиля сечения // Теплоэнергетика. 1995. № 3. С. 37–46.
46. Groeneveld D. C., Leung L. K. H., Kirillov P. L., Bobkov V. P., Smogalev I. P., Vinogradov V. N., Huang X.C., Royer E. The 1995 Look-up Table for Critical Heat Flux in Tubes // Nuc. Eng. Des. 1996. V. 163. P. 1–23.
47. Кириллов П. Л., Смогалев И. П., Ивашкевич В. А. и др. Скелетная таблица для коэффициента теплообмена в закризисной области при течении воды в трубах: Препринт ФЭИ-2525. 1996.
48. Бобков В. П., Судницын О. А., Судницына М. О. Численное и аналитическое описание критического теплового потока // Атомная энергия. 1998. Т. 84. № 2. С. 114–132.
49. Бобков В. П., Виноградов В. Н., Кириллов П. Л., Смогалев И. П. Критические тепловые потоки в треугольных пучках стержней (Скелетная таблица, версия 1997 г.) // Теплоэнергетика. 1999. № 11. С. 54–63.
50. Olekhnovitch A., Teysseidou A., Tye P. On the round table discussion on reactor power margins published in Nucl. Eng. Des. v. 163. 1-2 // Nuclear Eng. 2000. V. 201. № 2-3. P. 335–340.
51. Tong L. S., Tang Y. S. Boiling heat transfer and two-phase flow. Washington. Taylor & Francis. 1997. 542 p.
52. Бобков В. П., Ефанов А. Д., Пометько Р. С., Смогалев И. П. Критические тепловые потоки в условиях неравномерного энерговыделения в сборках твэлов в треугольной упаковке / В сб. «Труды 4 международной конференции по безопасности ВВЭР». Подольск. 2005.
53. Groeneveld D. C., Shan J. Q., Vasic A. Z., Leung L. K. H., Durmayaz A., Yang J., Cheng S.C., Tanase A. The 2006 CHF look-up table // Nucl. Eng. 2007. V. 237. № 15-17. Pp. 1909–1922.
54. Groeneveld D. C. CHF Data Used to Generate 2006 Groeneveld CHF look-up Tables. US Nuclear Regulatory Commission. Washington. DC. Report NUREG/KM-0011.
55. Zahlan H., Tavoularis S., Groeneveld D.C. A look-up table for trans-critical heat transfer in water-cooled tubes // Nucl. Eng. Design. 2015. V. 285. Pp. 109–125.
56. Groeneveld D. C., Ireland A., Kaizer J., Vasic A. An overview of measurements, data compilations and prediction methods for the critical heat flux in water-cooled tubes // Nucl. Eng. Design. 2018. V. 331. P. 211–221.
57. Сергеев В. В. Критические тепловые потоки при кипении в каналах и стержневых сборках: проблемы описания и обобщения данных // Атомная энергия. 2019. Т. 126. Вып. 1. С. 30–34.

Базы данных по КТП при течении воды в равномерно обогреваемых трубах

Год	Организация	Аббревиатура	Авторы	Кол-во точек
1958	Westinghouse Electric Corp., Pittsburg, USA	WAPD	DeBortoli R.A. et al.	1013
1958	Knolls Atomic Power Laboratory, Schenectady, USA	KAPL	Ryan et al.	1153
1960	Nuclear Development Corp. of America, White Plains, USA	NDA	Fistenberg et al.	1034
1964	Winfrith Atomic Energy Establishment, United Kingdom Atomic Energy Authority, United Kingdom	UKEA-AEEW	Thompson and Macbeth	4372
1964	Westinghouse Electric Corp., Pittsburg, USA	WCAP	Tong et al.	4730
1969	Физико-энергетический институт, Обнинск, СССР	ФЭИ	Зенкевич и др.	8072
1970	Centro Informazioni Studi ed Esperienza, Rome, Italy	CISE	ученые 5 стран Европы	594
1970	Stockholm Aktiebolaget Atomenergy (Sweden)	AE	Nilson L.	594
1974	Физико-энергетический институт, Обнинск, СССР	ФЭИ	Зенкевич и др.	7000
1975	Всесоюзный теплотехнический институт, Москва, СССР	ВТИ	Дорошук В.Е.	5000
1984	National Research Institute for Machine Design, Rez, ЧССР – Институт атомной энергии, Москва, СССР – Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники, Москва, СССР	SVUSS-IAE-RDPI	Koshtyalek Ja. et al.	15846
1986	Chalk River Nuclear Laboratories, Chalk River, Canada	AECL-UO	Groeneveld et al.	15422

1992	Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, USA	UKAEA-AERE	Vandertort	800
1992	Atomic Energy Research Establishment (Harwell Laboratory), Harwell, United Kingdom	AERE	Govan, Hewitt	4579
1992	Физико-энергетический институт, Центр теплофизических данных, Обнинск, Россия	ФЭИ-ЦТД	Кириллов, Бобков, Смогалеv и др.	14622
1993	Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development, Rome, Italy	ENEA	Celata et al.	1865
1995	Chalk River Nuclear Laboratories, Chalk River, Canada Физико-энергетический институт, Обнинск, Россия	AECL-IPPE	Groeneveld et al.	29005
1996	Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejon, South Korea	KAIST	Chang et al.; Moon et al.	10211
1996	Chalk River Laboratories, Chalk River, Canada	AECL-UO	Groeneveld et al.	30000
1998	Purdue University, Boiling and Two-Phase Flow Laboratory, West Lafayette, USA	PU-BTPFL	Hall, Mudawar	32544
2006	University of Ottawa, Ottawa, Canada Chalk River Laboratories, Chalk River, Canada	UO-CRL,	Groeneveld et al.	31000
2017	Nuclear Regulatory Commission, USA	NUREG	Groeneveld et al.	31000

Подписано к печати 05.06.2019. Формат 60×84 ¹/₁₆. Усл. п. л. 1,3. Уч.-изд. л. 2,1.
Тираж 40 экз. Заказ № 121.

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