

Ордена Ленина

ИАЭ-2204

Институт атомной энергии

им. И. В. Курчатова

В. С. Осмачкин, Н. Н. Лыцова

О расчете критических тепловых
нагрузок в пучках стержней

Москва 1972

ОРДЕНА ЛЕНИНА
ИНСТИТУТ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ им. И.В.КУРЧАТОВА

В.С.Осмачкин
Н.П.Лыцова

О РАСЧЕТЕ КРИТИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК В ПУЧКАХ СТЕРЖНЕЙ

М о с к в а
1972

Ключевые слова: реакторы, расчет, тепловые нагрузки, стержни, кризис кипения, вода, высокие давления, паросодержание, движение, кипящий поток, надежность, активная зона, теплоотвод, теплообмен.

0401

А Н Н О Т А Ц И Я

В работе сделан краткий обзор известных методов расчета критических тепловых нагрузок при продольном движении воды в пучках стержней. Дана коррекция формулы, предложенной в [1], позволившая обобщить экспериментальные данные в области высоких давлений и малых весовых паросодержаний.

Техн. редактор Е.Д.Маркова
Корректор В.П.Горячева

Т-12904.26.06.72г.Формат 60х90 1/8.
Уч.-изд.л.0,76.Тир.150 экз.Зак.10329.
ОНТИ.ИАЭ.

І. В В Е Д Е Н И Е

В последние годы проблема надежности тепловода от активных зон ядерных реакторов, в мощных котлоагрегатах и других современных установках приобрела особую актуальность. Желания конструкторов сделать установки мощнее, легче, компактнее натолкнулись на своеобразный тепловой барьер, препятствующий дальнейшему форсированию поверхностей нагрева, связанный с кризисом теплообмена при определенных тепловых и гидродинамических условиях.

Как известно, кризис теплообмена — явление, обусловленное неустойчивостью структуры кипящего потока у поверхности нагрева при достижении некоторых предельных параметров, проявляется в резком изменении тепловой и гидродинамической обстановки у теплоотдающей стенки, в существенном ухудшении теплоотвода, значительном увеличении температуры стенки. Как и все кризисные ситуации, кризис теплообмена является нежелательным или даже опасным явлением.

В ядерных энергетических реакторах, охлаждаемых водой под давлением, кризис теплообмена может возникать, как правило, при авариях. Так, при быстром росте мощности, выше номинальной, при внезапном существенном уменьшении расхода теплоносителя, при значительном падении давления в контуре циркуляции в активной зоне реактора могут возникнуть условия кризисного ухудшения теплоотвода и как следствие перегрев поверхности топливных элементов. Иногда, в случаях значительных перекосов тепловыделения в активной зоне реактора, кризис теплообмена может возникать даже при номинальной мощности реактора. Гарантии безопасности и целостности топливных элементов реакторов достигаются за счет целой системы запретов и предохранительных мер, существенно усложняющих эксплуатацию реактора и атомной электростанции в целом.

С другой стороны, ясно, что экономичность атомных электростанций растет при увеличении теплонапряженности активных зон, при уменьшении запасов до кризиса теплообмена по мощности, расходу и температуре теплоносителя.

Очевидно, что в условиях экономической целесообразности и теплофизической опасности форсирования мощности реактора обеспечение надежной и безопасной работы реактора возможно лишь при точном знании условий возникновения кризиса теплообмена, умения достаточно точно предсказать комплекс параметров, вызывающих кризисную ситуацию. Это определяет необходимость тщательного изучения кризиса теплообмена как в теоретическом, так и экспериментальном плане.

Изучение кризиса теплообмена продолжается уже многие годы. Во многих лабораториях мира ведутся широкие исследования условий возникновения кризиса теплообмена, проводятся поиски рациональных методов интенсификации теплообмена. К сожалению, несмотря на обилие экспериментальных материалов, проблема кризиса теплообмена далека от своего решения.

Основные трудности в решении этой проблемы связаны с отсутствием теории кризиса теплообмена. Даже в простейшем случае течения воды в трубе в настоящее время не существует общепризнанной трактовки явления кризиса теплообмена, отсутствуют расчетные рекомендации, обеспечивающие необходимую точность в широком диапазоне параметров.

Расчет критических условий в пучках стержней, составляющих основную геометрическую конфигурацию топливных сборок реакторов, выполнить с нужной точностью еще сложнее. Большое разнообразие внутреннего устройства пучков, различия в способах дистанционирования стержней в пучке, многообразии условий входа теплоносителя в пучок и другие механические и геометрические особенности и детали конструкции пучков, влияющие на условия теплосъема, делают задачу разработки методов расчета критических характеристик в пучке, критических тепловых нагрузок очень трудной.

Методику расчета условий возникновения кризиса теплообмена в пучках стержней можно строить двояко.

1-й путь - это метод рассмотрения пучка как системы параллельных взаимодействующих каналов, ячеек. Для реализации такого подхода требуются надежные данные по поперечному перемешиванию потоков теплоносителя в пучке, данные по критическим тепловым потокам в ячейках пучка. Такой метод, хотя и является радикальным решением задачи, в настоящее время еще не развит достаточно полно и не может быть еще надежным инструментом при расчетных проектных работах.

2-й путь - это традиционный метод полуэмпирического или даже эмпирического поиска зависимостей, обобщающих экспериментальный материал по критическим нагрузкам в пучках, рассматриваемых как целое. Успех этого подхода, очевидно, зависит от объема надежных экспериментальных данных по критическим тепловым нагрузкам в различных вариантах пучков, от принятого метода обработки опытных данных.

Настоящая работа является иллюстрацией возможностей 2-го метода. Здесь дается обзор наиболее распространенных методов расчета условий кризиса теплообмена в пучках стержней, характерных для энергетических корпусных и каналных реакторов, охлаждаемых водой под давлением. Дана новая модификация формулы для расчета критических тепловых нагрузок в пучках стержней, предложенной в работе /1/.

О Б О З Н А Ч Е Н И Я

a	- коэффициент температуропроводности воды	(м ² /сек)
d_T	- тепловой диаметр	(м)
L	- обогреваемая длина пучка	(м)
P_q	- обогреваемый периметр пучка	(м)
p	- давление	(атм)
q	- тепловой поток	(кВт/м ²)
z	- удельная теплота парообразования	(кДж/кг)
S	- проходное сечение пучка	(м ²)
$x = \frac{L-z}{z}$	- относительная энтальпия	
z	- координата	(м)
ρ	- плотность	(кг/м ³)
ρw	- массовая скорость	(кг/м ² .сек)
ν	- кинематическая вязкость воды	(м ² /сек)
μ	- динамическая вязкость воды	(кг/м.сек)
σ	- поверхностное натяжение	(н/м)
g	- ускорение силы тяжести	(м/сек ²)
$Re = \frac{\rho w \cdot d_T}{\mu}$	- критерий Рейнольдса	
$We = \frac{(\rho w)^2 \cdot d_T}{\rho \cdot \sigma}$	- критерий Вебера	
$Pz = \frac{\mu'}{\rho \cdot a'}$	- критерий Прандтля	

k_c - критический, в кризисном сечении

i - на длине кризисного сечения

II. ИЗВЕСТНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА КРИТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ
В ПУЧКАХ СТЕРЖНЕЙ

Условия возникновения кризиса теплообмена в пучках стержней формируются особым сочетанием тепловой нагрузки, называемой критической тепловой нагрузкой, и таких параметров, как массовая скорость потока, массовое расходное паросодержание потока на выходе экспериментальной секции канала и давления. Эти условия зависят, конечно, от геометрических характеристик пучка. Определенное влияние на критические условия оказывает также предстория формирования структуры потока, распределение тепловыделения вверх по течению теплоносителя. Наиболее общая форма этого сочетания выражается утверждением, что

$$q_{кр}(z) = f[x_{кр}, \rho W, d, p, \int_{-\infty}^z \frac{q(z')}{q(z)} W(z, z') dz'] \quad (1)$$

Здесь W — функция влияния распределения тепловыделения на условия возникновения кризиса теплообмена такая, что

$$\int_0^{\infty} W(z, z') dz' = 1.$$

Иногда в опытах, ограниченных рамками близких геометрических характеристик пучков либо незначительной осевой неравномерностью теплоподвода, не обнаруживают влияния распределения тепловыделения по длине канала и полагают, что

$$q_{кр} = f[x_{кр}, \rho W, d, p]. \quad (2)$$

Такое сочетание параметров, характерное для работ [2, 4, 6], является выражением гипотезы локальности кризиса теплообмена. Однако эту гипотезу в настоящее время, по-видимому, следует признать некорректной.

Действительно, большинство экспериментальных данных, полученных как в опытах на трубах, так и на пучках стержней, показывает, что существует заметное влияние на условия возникновения кризиса теплообмена предстории формирования структуры потока, распределения тепловыделения по току теплоносителя. Другими словами, кризис теплообмена есть явление интегральное, зависящее от условий течения теплоносителя по участку, от формы поля тепловыделения.

Эта "интегральность" кризиса теплообмена отражена в формуле (1) введением интеграла от относительного распределения тепловыделения по длине канала, взвешенного с некоторой функцией влияния. Конкретным проявлением "интегральности" кризиса теплообмена в работах [1, 3, 5] является введение в эмпирические формулы фактора протяженности канала, его длины.

Важным фактом, следующим из большинства опытных данных, является возможность представления критической нагрузки линейной функцией выходного расходного паросодержания. Тогда можно записать равенство

$$\int_{-\infty}^z q(z') W(z, z') dz' = A - Bzx$$

или

$$q_{кр}(z) = \frac{A - Bzx}{\int_{-\infty}^z \frac{q(z')}{q(z)} W(z, z') dz'} \quad (3)$$

где коэффициенты A, B являются функциями массовой скорости, поперечной геометрической характеристики пучка и давления. В работе [1] было показано, что функцию W можно полагать равной

$$W(z) = c\delta(z) + b,$$

где $\delta(z)$ - дельта - функция Дирака.

Тогда

$$q_{кр}(z) = \frac{A - Bzx}{c + B \int_{-\infty}^z \frac{q(z')}{q(z)} dz'}$$

или при постоянном тепловыделении на участке канала длиной L

$$q_{кр} = \frac{A - Bzx}{c + BL} \quad (5)$$

В таблице представ- ты наиболее важные формулы для расчета критических тепловых нагрузок в пучках, ча- всего используемых при тепловых расчетах ядерных реакторов, приведенные к форме(5).

№ пп	Автор, год публикации	Формула для расчета критических нагрузок в пучках	Область применимо- сти
1.	Макбет /2/ 1964г.	$\frac{q_{кр} \cdot 10^{-6}}{1,43(\rho W \cdot 10^{-6})^{0,973} \cdot d_T^{1,228}} = 1 - 0,0037(\rho W \cdot 10^{-6})^{0,913} \times d_T^{0,17} \cdot z$	$\rho = 70 \text{ атм}$
2.	Макбет-Барнет /3/ 1966г.	$q_{кр} \cdot 10^{-6} = \frac{A - Bzx}{c + L(1 - 10^{\frac{cL}{d_T}})}$ $A = 64,04 d_T^{2,058} (\rho W \cdot 10^{-6})^{0,577}$ $B = 0,204 d_T^{1,277} (\rho W \cdot 10^{-6})^{0,372}$ $C = 60,41 d_T^{2,241} (\rho W \cdot 10^{-6})^{0,388}$	$\rho = 70 \text{ атм}$
3.	Смолин-Поляков /4/ 1967г.	$\frac{q_{кр} \cdot 10^{-6}}{0,65(\rho W)^{0,2}(1,3 - 0,000436\rho)} = (1-x)^{1,2}$	$-0,2 < x < 0,25$ $380 < \rho W < 4000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{сек}}$ $30 < \rho < 100 \text{ атм}$ $5 < d < 14 \text{ мм}$
4.	Тонг /5/ 1967г.	$q_{кр} \cdot 10^{-6} = [(2,022 - 0,0004302\rho) + (0,1722 - 0,0000584\rho) \exp(18,177 - 0,004129\rho)x] \times [(0,1484 - 1,596x + 0,1729x x)^{0,6} + 1,037] \times (1,157 - 0,869x) \cdot [0,2664 + 0,835 \exp(-3,15kd)] \times [0,8258 + 0,000794(L' - L_{6x})]$ $q_{кр} = \frac{q_{кр}^0}{F}; F = \frac{\int \frac{q(z')}{q(z)} \exp[-c(z-z')] dz'}{1 - \exp[-cL]}$ $C = 0,44(1 - x_{кр})^{2,2} / (6/10^6)^{1,72}$	$-0,15 < x < 0,15$ $1356 < \rho W < 6800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{сек}}$ $5,08 < \rho < 17,8 \text{ мм}$ $70,3 < \rho < 162 \text{ атм}$ $254 < L < 3660 \text{ мм}$
5.	Миропольский /6/ 1969г.	$\frac{q_{кр} \cdot 10^{-6}}{2,28[0,2 + (\frac{\rho W}{1000})^{0,3}(1,28 - 0,004\rho)]} = 1 - 1,35(\frac{\rho W}{1000})^{0,17} x$	$-0,1 < x < 0,3$ $400 < \rho W < 5000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{сек}}$ $30 < \rho < 100 \text{ атм}$
6.	Осмачкин /1/ 1970г.	$\frac{q_{кр}}{z\rho'(gV)^{0,2}(\frac{\rho W}{\text{м}^2})^{0,2}} = \frac{1 - 0,286x \left[\frac{(\rho W)^2 d_T^{0,2}}{6\rho'} \right]}{42(1 + 0,282L)}$	$x > 0$ $500 < \rho W < 4000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{сек}}$ $40 < \rho < 150 \text{ атм}$ $5 < d_T < 15 \text{ мм}$ $0,4 < L < 7,0 \text{ м}$

Формула Макбета получена на ограниченном опытном материале сравнительно давно. Однако именно в ней впервые четко выявлены основные особенности кризиса теплообмена в пучках стержней:

1) линейность зависимости критнагрузки от входного недогрева воды или выходного весового паросодержания x ,

2) возможность описать влияние геометрических факторов на кризис теплообмена с помощью одного параметра — теплового диаметра пучка

$$d_T = \frac{4S}{\pi q}$$

Макбет впервые отметил, что в пучках эффект холодной стенки мал, и им можно пренебрегать, что кризисная ситуация в пучках слабо зависит от деталей внутреннего устройства пучков.

В формуле Макбета отсутствует параметр, характеризующий протяженность пучков, т.е. коэффициент $B = 0$. Другими словами, формула соответствует локальной концепции кризиса теплообмена. Однако несколько позже Барнет /3/, обладая уже значительно большим количеством экспериментальных данных по кризису теплообмена в пучках, провел заново оптимизацию коэффициентов в формуле (4) и показал, что меньшая среднеквадратичная ошибка описания всех данных достигается, если отказаться от гипотезы локальности кризиса теплообмена, кстати, предложенной самим Барнетом /7/.

К сожалению, формулы 1 и 2 таблицы применимы только для случая течения кипящей воды при давлении 70 атм.

Формула Тонга или Wz -корреляция является чисто эмпирической. Она получена в основном за счет обработки данных по трубам и коротким малостержневым пучкам. Эта формула соответствует нелокальной концепции кризиса теплообмена, поскольку содержит кроме выходного паросодержания входной недогрев воды до состояния насыщения. Влияние формы тепловыделения на $Q_{кр}$ учитывается так называемым F -фактором. Эта громоздкая формула, несмотря на ее явный эмпиризм, широко применяется в практике расчетов ядерных реакторов.

Формулы 3, 5 таблицы имеют близкую структуру. Они не содержат каких-либо геометрических характеристик пучков и соответствуют локальной концепции кризиса теплообмена. Обе формулы рекомендованы в ограниченной области параметров теплоносителя и, по-видимому, применимы лишь для коротких пучков стержней.

Формула 6 таблицы была получена на основе опытных данных, охватывающих широкий диапазон геометрических параметров пучков, давлений, скоростей в области больших выходных паросодержаний воды. Ключом к разработке формулы оказались обобщенные координаты K и X :

$$K = \frac{Q_{кр}}{G \sqrt{W}} - \text{обобщенная критнагрузка,}$$

$$X = x \cdot We^{\frac{1}{2}} - \text{обобщенное расходное паросодержание,}$$

которые позволили положить на один график практически все известные в то время экспериментальные результаты по кризису теплообмена в пучках стержней в области давлений от 40 до 150 атм /1/. Взаимное расположение на плоскости различных опытных данных при больших значениях x удалось описать с помощью формулы 6 таблицы, содержащей в качестве геометрических параметров пучков тепловой диаметр и длину пучка. Как уже отмечалось ранее, зависимость критнагрузки от длины пучка является следствием "интегральности" кризиса теплообмена, влияния предистории формирования кризисных условий.

Взаимное соответствие формул и некоторых экспериментальных данных иллюстрируется рис. 1, на котором представлены результаты расчетов критических тепловых нагрузок

для пучков с тепловым диаметром $d_T = 10$ мм и различными обогреваемыми длинами. Там же даны некоторые результаты экспериментов по кризису теплообмена в пучках близкой геометрии.

Из рисунка видно, что результаты расчетов по формулам Смолина, Миропольского (формулы 3,5 таблицы) довольно близко соответствуют друг другу и располагаются вблизи экспериментальных точек Смолина /4/ для пучков длиной 0,5 м, но не обеспечивают описания данных по кризису теплообмена в пучках большой длины.

Заметно ниже этой группы точек находятся экспериментальные данные Эдвардса и Обертелли /8/ для пучков длиной $L = 3,66$ м и данные по результатам опытов на стенде КС ИАЭ /1/.

Расположение всех этих групп экспериментальных точек хорошо описывается формулой 6 таблицы.

Заметно хуже соответствуют экспериментальным данным результаты расчетов по формуле Макбета-Барнета (формула 2 таблицы).

Зависимость $Q_{кр}$ от $X_{вых}$ построена по формуле Макбета, хотя и пересекает все группы опытных точек, не соответствует тенденциям их взаимного расположения.

Ш. ОБОБЩЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО КРИЗИСУ ТЕПЛООБМЕНА В ПУЧКАХ СТЕРЖНЕЙ В ОБЛАСТИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ

Сравнение опытных данных и результатов расчетов по формуле 6 таблицы показывает, что экспериментально наблюдаемые тенденции кризиса теплообмена в пучках правильно отражаются этой формулой.

С другой стороны, количественное согласие опытных и расчетных данных в некоторых областях параметров неудовлетворительно. Так, в области малых паросодержаний, больших давлений, при больших относительных шагах стержней в пучках опытные значения критических тепловых нагрузок располагаются существенно выше расчетных.

На рис.2 показано сопоставление данных Геллерштедта /9/ с результатами расчета. Опыты проводились при давлении 70 и 155 атм в канале квадратного сечения с пучком из 9 стержней. Из рисунка ясно видна тенденция к размещению опытных точек под большим углом относительно оси X, чем расчетная линия. Такая тенденция, отмеченная и по другим данным, привела к необходимости введения поправок к формуле 6 таблицы.

После многочисленных проб оказалось, что коррекция формулы из /1/, помогающая существенно уменьшить расхождение опытных и расчетных данных в области высоких давлений и малых паросодержаний, сводится к умножению правой части формулы на множитель

$$0,131 \left[\frac{d_T}{(a^2/q)^{1/3}} \right]^{1/3}$$

и к отказу от линейной зависимости K от X. Аналитическая форма скорректированной формулы имеет вид

$$Q = \frac{K}{\left[\frac{d_T}{(a^2/q)^{1/3}} \right]^{1/3}} = \frac{0,131 \left[1 - X/3,5 \right]^{1,3}}{42 \left[1 + \frac{1}{3,54} \int_0^X \frac{q(z')}{q(z)} dz' \right]}, \quad (6)$$

где

$$Q = \frac{K}{\left[\frac{d_T}{(a^2/q)^{1/3}} \right]^{1/3}} = \frac{q_{кр}}{z\rho [q d_T (g a)^{1/3}]^{1/3} P_z^{1/3} Re^{1/5}}$$

При постоянном по длине тепловыделении формула имеет более простую форму:

$$Q = \frac{[1 - X/3,5]^{1,3}}{320(1 + L/3,54)}. \quad (7)$$

На рис. 3-4 в координатах $42Q(1 + \frac{L}{3,54})$, X показаны данные из работ /4,9,10,11/. Сравнение опытных данных с расчетной зависимостью (7) показывает их хорошее соответствие друг другу. Другие известные нам данные также достаточно хорошо описываются формулой (7).

Формулу (7) можно применять для расчетов критических тепловых нагрузок в равномерно обогреваемых пучках в области параметров

$$\begin{aligned} 40 < p < 180 \text{ атм} \\ 500 < \rho w < 5000 \text{ кг/м}^2\text{сек} \\ 4,0 < d_T < 20 \text{ мм} \\ -0,5 < xwe^3 < 3,0 \end{aligned}$$

и длин пучков от 400 мм до 7 м.

Точность формулы не хуже 120% во всей области параметров.

В многоотержневых пучках со значительной радиальной неравномерностью тепловыделения эта формула при использовании средних по сечению параметров потока может завышать значения критических тепловых нагрузок. На рис. 5 представлены данные Лё Турно/10/ по критическим нагрузкам в пучках с поперечной неравномерностью тепловыделения, достигающей 1,5.

В таких пучках необходим учет локальных теплогидравлических условий в напряженных ячейках пучка.

Влияние осевой неравномерности достаточно хорошо учитывается интегральным членом в формуле (6). Поэтому расчет условий возникновения кризиса теплообмена в кассетах реакторов следует проводить по формуле (6), используя локальные значения массовой скорости и весового паросодержания в наиболее напряженной ячейке пучка.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новая формула достаточно хорошо обобщает опытные данные по критическим тепловым нагрузкам в равномерно обогреваемых пучках в области высоких давлений и малых паросодержаний. Тем не менее остается еще заметный разброс данных разных авторов, связанный, видимо, с влиянием способов дистанционирования пучков. Эти вопросы требуют дополнительных экспериментальных исследований.

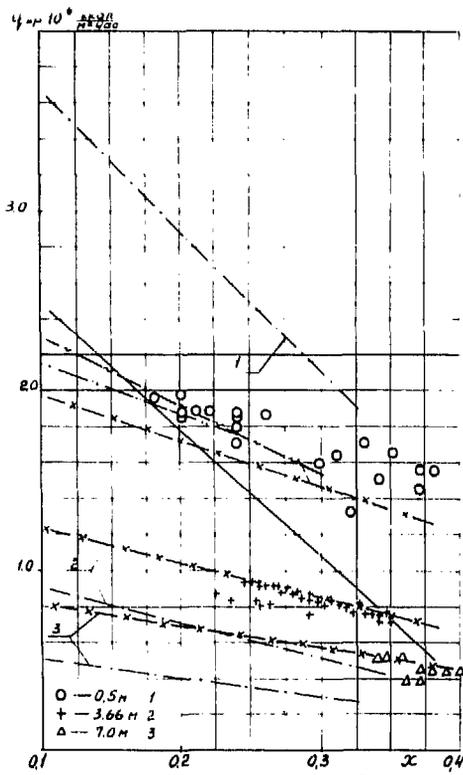


Рис. 1. Зависимость $q_{кр} = f(x)$ для пучков при $P=70$ атм и $\rho W = 1500 \text{ кг/сек}$. Расчет по формулам из таблицы N1; - - N2; — N3; — N4; —x— N6.

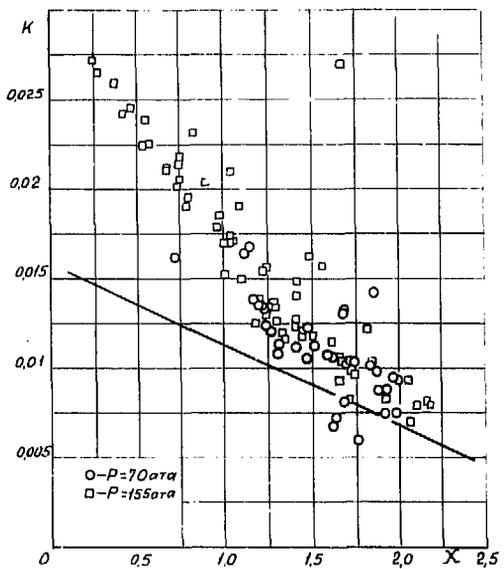
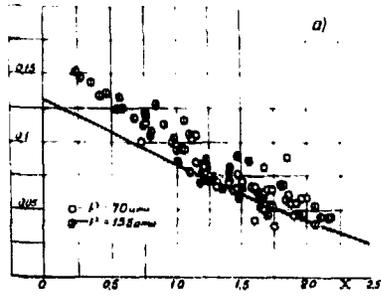


Рис. 2. Сравнение экспериментальных данных Галлертедга и др. [9] с результатами расчета по формуле 6 таблицы.
 Характеристики пучка: число стержней — 9; длина — 1,83 м; диаметр стержня — 10,65 мм; тепловой диаметр — 13,4 мм.

$$\left[\frac{K}{(\sigma^2 \rho^2)} \right] t \cdot 42 \left[1 + \frac{t}{2.5} \right]$$



$$\left[\frac{K}{(\sigma^2 \rho^2)} \right] t \cdot 42 \left[1 + \frac{t}{2.5} \right]$$

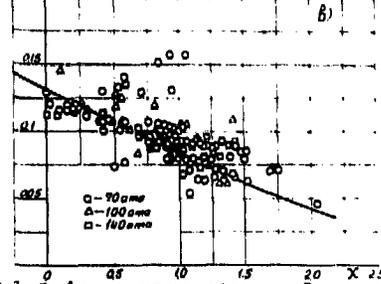
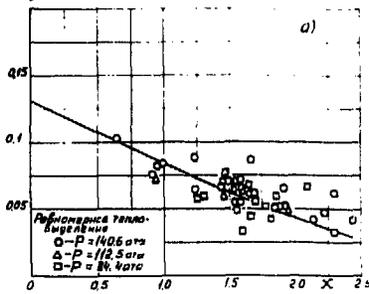


Рис. 3. Сравнение экспериментальных данных Пюльриуга (1970) и Столина (1971) с результатами расчета по формуле (7).

$$\left[\frac{K}{(\sigma^2 \rho^2)} \right] t \cdot 42 \left[1 + \frac{t}{2.5} \right]$$



$$\left[\frac{K}{(\sigma^2 \rho^2)} \right] t \cdot 42 \left[1 + \frac{t}{2.5} \right]$$

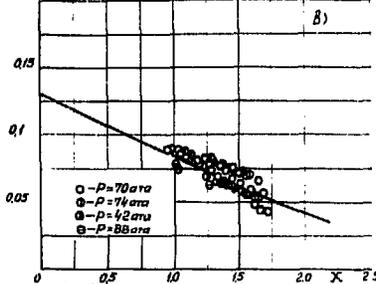


Рис. 4. Сравнение экспериментальных данных Ле Туина (1974) и Яншена, Шрауба (1971) с результатами расчета по формуле (7).

$$\left[\frac{K}{(\frac{d}{g})^3} \right]^{1/3} \cdot 42 \left[1 + \frac{L}{3,54} \right]$$

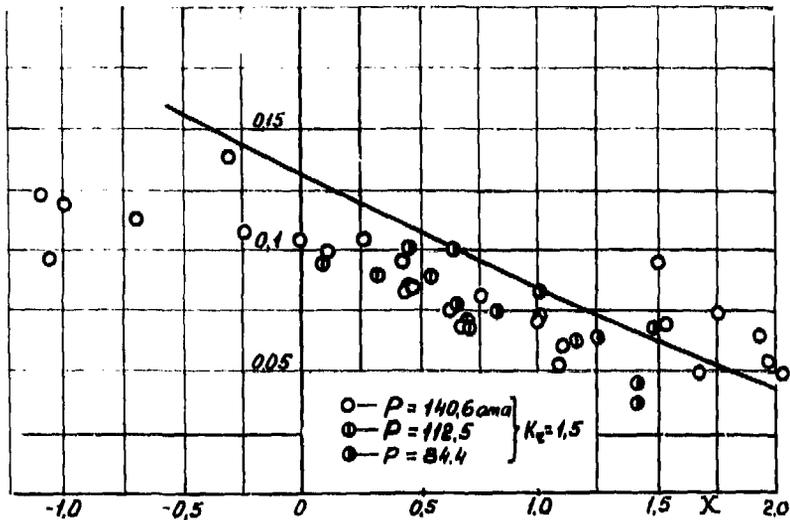


Рис. 5. Сравнение экспериментальных данных Лв Турно [10] с результатами расчета по формуле (7).

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. В.С.Осмачкин. Кризис теплообмена при движении кипящей воды вдоль пучков тепловыделяющих стержней. Препринт ИАЭ-2014, 1970.
2. R.Macbeth. Burnout analysis, Pt.5, AEEW-R 358, 1964.
3. P.Barnett. A comparison of the accuracy of some correlations for burnout in annuli and rod bundles, AEEW-R 55, 1968.
4. В.Н.Смолин, В.К.Поляков. Критический тепловой поток при продольном обтекании пучка стержней. Теплоэнергетика № 4, 1967.
5. L.Tong. Heat transfer in water-cooled nuclear reactors. Nuclear engineering and design. v.6, p.301-324, 1967.
6. З.Л.Миропольский, М.Н.Виноградова. Статистические закономерности при исследовании кризиса теплообмена. Теплоэнергетика, № 7, 1969.
7. P.Barnett. A correlation of burnout data for uniformly heated annuli and its use for predicting burnout uniformly heated rod bundles, AEEW-R 463, 1966.
8. K.Becker. A burnout correlation for flow of boiling water in vertical rod bundles. AE-276, 1967. Table XII a,b,c.
9. Gellerstadt I., Lee R. et al. "Correlation of critical heat flux in a bundle cooled by pressurized water", Symposium "Two-phase flow and heat transfer in rod bundles" held 12-21 November, 1969, Los Angeles, California, USA.
10. Le Tourneau, Green. Critical Heat Flux and Pressure Drop Tests with Parallel Upflow of High Pressure Water in Bundles of Twenty 1/2-in. Rods. Nuclear Science and Engineering, 1, v.43, 1971.
11. E.Janssen, F.Schraub. Sixteen-rod heat flux investigation, steam-water at 600-1250 psia. Two-phase flow and heat transfer in rod bundles. The winter annual meeting of the ASME, Los Angeles, California, November 18, 1969, p.81-89.