

6  
А-62

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

---

На правах рукописи

И. В. КРОНИН

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ ЦИРКУЛЯЦИИ  
НА КРИЗИС ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ КИПЕНИИ  
ЖИДКОСТЕЙ В ТРУБАХ С НЕДОГРЕВОМ,  
БЛИЗКИМ К НУЛЮ

(Специальность 053 — теплофизика)

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

МОСКВА — 1971

7

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

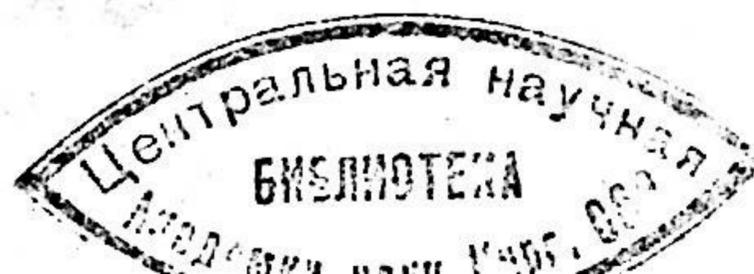
На правах рукописи

И. В. КРОНИН

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ ЦИРКУЛЯЦИИ НА  
КРИЗИС ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ КИПЕНИИ ЖИДКОСТЕЙ В  
ТРУБАХ С НЕДОГРЕВОМ, БЛИЗКИМ К НУЛЮ  
(специальность 053 - теплофизика)

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва - 1971



Работа выполнена в Московском ордена Трудового Красного Знамени инженерно-физическом институте.

Научный руководитель доктор технических наук, профессор  
ВОСКРЕСЕНСКИЙ К.Д.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук ПОВАРНИН П.И.  
кандидат технических наук СТОШИН Н.Г.

Ведущая организация: Институт Высоких Температур АН СССР.

Автореферат разослан 14 апреля 1971г.

Защита диссертации состоится 17 мая 1971г.  
на заседании Совета Физико-энергетического факультета  
МИФИ, М-409, Каширское шоссе, д.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ.

Ученый секретарь Совета

И.О.АТОВМЯН

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена исследованию критических тепловых потоков при поверхностном кипении бензола и воды, догретых до температуры насыщения. Опыты проведены на медной вертикальной трубке с внутренним диаметром 5 мм и длиной 80 мм, обогреваемой постоянным током. Течение жидкости происходило снизу вверх. Массовая скорость жидкости, с учетом опыта на обеих жидкостях, менялась от уровня естественной конвекции до  $20 \cdot 10^8$  кг/м<sup>2</sup>сек. Критический тепловой поток менялся от 0,1 до 10 Мвт/м<sup>2</sup>, давление при работе на бензоле - 1,5-38 бар, на воде - 1,5 и 30 бар. При проведении экспериментов осуществлялся систематический контроль за чистотой теплоотдающей поверхности. Обнаружены области различного влияния на  $q_{кр,0}$  скорости циркуляции жидкости.

В работе предпринята попытка на основе полученного экспериментального материала и расшифровки показаний малоинерционных приборов - зонда и датчика скорости - построить приближенную модель кривиса теплоотдачи при низких скоростях течения жидкости в трубе.

В итоге получена простая расчетная рекомендация, удовлетворительно описывающая результаты исследования кривиса теплоотдачи на бензоле и воде. Опытным путем определялись только две константы, степень 0,5 влияния скорости циркуляции на  $q_{кр,0}$  получена расчетным путем. Проведено сравнение полученных результатов с данными других исследований.

## I

При разработке современных энергетических аппаратов очень важно знать критические тепловые потоки, при которых интенсивность теплообмена резко падает из-за перехода пленочного кипения в пленочное, что может привести к разрушению теплоотдающей поверхности.

Изучению этого вопроса посвящено много работ, но в связи с большой сложностью проблема не разрешена полностью. До сих пор нет удовлетворительных теоретических решений при условиях вынужденного течения жидкости в трубе. Результаты исследований часто существенно расходятся не только количественно, но и качественно. Недостаточная изученность факторов, влияющих на процесс, различная экспериментальная методика исследователей частично объясняют количественную и качественную разноречивость многочисленных данных. Большинство опытов проведено с водой при давлениях выше 20 бар, данных по другим жидкостям мало, что затрудняет обобщение полученных данных.

В настоящее время установлено, что механизм возникновения кризиса теплоотдачи в канале может быть существенно различным в зависимости от теплосодержания потока. Исследования кризиса

теплоотдачи при кипении в большинстве случаев выполнены либо с недогретой до температуры насыщения жидкостью, либо при наличии значительного паросодержания в потоке. Кризис кипения без недогрева, как правило, специально не изучался. Кризис теплоотдачи при кипении в большом объеме в настоящее время изучен более подробно. Плодотворное развитие гидродинамической гипотезы, впервые выдвинутой С.С.Кутателадзе и развитой в работах В.М.Борисанского, Н.Зубера и других исследователей, позволяет сделать вывод, что она отражает, по-видимому, одну из основных черт кризиса теплоотдачи в большом объеме.

В трубах явление значительно усложняется из-за дополнительных режимных характеристик - скорости и недогрева жидкости до температуры насыщения. Попытки описать явление во всем интервале изменения режимных параметров универсальной зависимостью успеха не принесли.

Из сопоставления результатов различных исследователей видно, что разброс опытных и расчетных зависимостей часто превышает 100 и более процентов, что никак нельзя объяснить статистической природой кризиса теплоотдачи. При внешне сходных условиях проведения исследований в опытах могли отличаться режимы течения парожидкостной смеси, распределение фаз по сечению и длине, что, как правило, не изучалось, а критический тепловой поток рассчитывался по интегральным балансным характеристикам процесса.

Анализируя имеющиеся в литературе экспериментальные данные и расчетные рекомендации, можно заключить, что среди исследователей нет единого мнения о влиянии различных факторов на кризис теплоотдачи и, в первую очередь, такого важного параметра, как скорости циркуляции жидкости.

Для расчета критических тепловых нагрузок при кипении недогретой жидкости в каналах чаще всего рекомендуются формулы вида:

$$Q_{кр, \delta} = Q_{кр, 0} (1 + B \cdot \delta) \dots \dots \dots (1)$$

где  $Q_{кр, 0}$  соответствует критическому тепловому потоку при тех же условиях, но без недогрева.

Для расчета  $Q_{кр, 0}$  предложены формулы разных типов. Так, например, в работах С.С.Кутателадзе, Р.А.Рыбина, З.Л.Мирополюского, Л.С.Стермана и других зависимость  $Q_{кр, 0}$  от скорости циркуляции имеет вид:

$$Q_{кр, 0} \sim W^n \dots \dots \dots (2)$$

В работах Л.С.Штоколова, П.И.Поварнина, Л.Е.Михайлова, М.Е.Шидмана:

$$Q_{кр, 0} \sim [1 + f(P, \mu) \cdot W^n] \dots \dots \dots (3)$$

где  $\mu$  - условно обозначает род жидкости.

Некоторые исследователи предлагают более сложные соотношения, в которых зависимость  $Q_{кр, \delta}$  от скорости и недогрева не разделяется на две отдельные независимые функции (например, в работах А.А.Иванкевича, Б.А.Зенкевича, Л.Д.Додонова и других).

Из обзора структуры расчетных зависимостей видно, что они неодинаково отражают некоторые качественные стороны процесса. По результатам одних работ можно сделать вывод, что степень влияния недогрева на  $Q_{кр, \delta}$  не зависит от скорости циркуляции, а по расчетным зависимостям, предлагаемым в других работах, оба режимных фактора - скорость  $W$  и недогрев  $\delta$  влияют взаимосвязанно.

Не ясно, стремится ли  $Q_{кр, 0}$  к определенному пределу с уменьшением скорости циркуляции, как это следует из (3) или беспределенно уменьшается (формула (2)). Этот вопрос специально

не исследовался.

С влиянием скорости на величину  $Q_{кр, 0}$  связан вопрос о соотношении критических тепловых нагрузок в трубах и большом объеме и зависимости их в этих случаях от давления.

Качественное расхождение данных наблюдается не только при низких, но и при высоких скоростях течения жидкости. Вопреки выводам большинства авторов о положительном влиянии скорости на  $Q_{кр, 0}$  в работе В.И.Субботина были впервые получены данные об отрицательном влиянии скорости на критический тепловой поток даже при некотором недогреве, что впоследствии было подтверждено другими исследователями.

Таким образом, и в области высоких скоростей циркуляции жидкости нет единого мнения о степени влияния скорости на  $Q_{кр, 0}$ . При этом следует еще раз напомнить, что величина  $Q_{кр, 0}$  является важнейшей характеристикой, которая служит для расчета  $Q_{кр, \delta}$  в реальных аппаратах при значительном недогреве (формула (1)). На основании проведенного обзора работ можно сделать следующие выводы:

1. Отсутствует сколько-нибудь строгая теория кривиза теплоотдачи при кипении в трубах, поэтому основой исследования остается эксперимент.
2. Исследователями широко используется в расчетных формулах, учитывающих недогрев-жидкости до температуры насыщения, константа  $Q_{кр, 0}$  - по смыслу - критический тепловой поток при отсутствии недогрева; в то же время данных по исследованию этой величины в литературе совершенно недостаточно для построения надежных обобщающих зависимостей.
3. Различными авторами предложены для расчетов критических тепловых потоков зависимости вида (2), (3) и более слож-

ные, однако данных, полученных при низких скоростях циркуляции недостаточно, чтобы выяснить, какой зависимостью связана скорость циркуляции  $Q_{\text{КР,0}}$  при малых значениях скорости.

4. Противоречивость литературных данных наблюдается и в области высоких скоростей циркуляции. Большинство авторов сходится во мнении, что скорость оказывает положительное влияние на  $Q_{\text{КР,0}}$ . Однако в ряде других работ обнаружено отрицательное влияние скорости на  $Q_{\text{КР,0}}$ , таким образом, данные различных исследователей расходятся не только количественно, но и качественно.

5. Большинство исследований выполнено на воде при давлениях от 20 бар и выше. Из других жидкостей наиболее подробно исследован этиловый спирт. Данных по остальным жидкостям крайне мало, а там, где они есть - исследования охватывают узкие диапазоны изменения режимных параметров.

6. Данных по исследованию механизма кризиса теплоотдачи в трубах в области недогрева или низких значений паросодержания недостаточно для построения удовлетворительной модели процесса.

С учетом этих вопросов были поставлены задачи настоящего исследования. Необходимо было выяснить:

1. Как изменяется  $Q_{\text{КР,0}}$  при уменьшении скорости вплоть до уровня естественной циркуляции, монотонна ли эта зависимость и есть ли предел снижения  $Q_{\text{КР,0}}$  при снижении скорости, а если предел есть, то как он соотносится с  $Q_{\text{КР,0}}$  в большом объеме?

2. Есть ли области, в которых скорость либо не влияет, либо оказывает отрицательное влияние на  $Q_{\text{КР,0}}$ ?

3. Как меняется характер зависимости  $Q_{\text{КР,0}}$  от скорости циркуляции при изменении давления и есть ли подобие этой за-

висимости аналогичной таковой в большом объеме?

4. Каков механизм кризиса теплообмена при кипении в случае нулевого или малого балансного недогрева жидкости до температуры насыщения?

Чтобы ответить на эти вопросы, необходимо было на одной установке провести эксперименты в широком диапазоне изменения скорости, а чтобы выяснить зависимость  $Q_{\text{КР,0}}$  от скорости, не осложненную недогревом, был выбран режим с недогревом на выходе из рабочей трубки, близким к нулю.

В качестве рабочих жидкостей были выбраны бензол и вода, проведение опытов на которых открывает дополнительные возможности для обобщений, так как систематических данных по  $Q_{\text{КР,0}}$  для бензола при вынужденном движении и недогреве, близком к нулю, в большом диапазоне давлений нет.

## II

Экспериментальное исследование было выполнено на установке, представляющей собой замкнутый циркуляционный контур из нержавеющей стали. В качестве рабочей использовалась медная вертикальная обогреваемая постоянным током трубка с внутренним диаметром 5 мм и длиной 80 мм. Циркуляция жидкости осуществлялась снизу вверх с помощью двухступенчатого бессальникового эжекторного насоса. Давление в контуре создавалось парами кипящей в электрододе рабочей жидкости.

Сначала были проведены опыты с бензолом. Снимались зависимости  $Q_{\text{КР,0}} = f_1(W_p)$  при  $P = \text{const}$ , затем, с целью перекрестной проверки и для получения большего числа точек по давлению, снимались серии  $Q_{\text{КР,0}} = f_2(P)$  при  $W_p = \text{const}$ . Большое внимание обращалось на чистоту теплоотдающей поверхности. Трубку

чистили перед каждой серией опытов нулевой шкуркой, тщательно промывали бензолом, затем измеряли 2-3 значения  $Q_{\text{КР},0}$  при различных намеченных значениях  $W_p$  при одном и том же давлении и возвращались снова к контрольной точке в начале опыта. Как правило, результаты совпадали. Эксперименты показали, что бензол практически не разлагается и не загрязняет теплоотдающую поверхность. Аналогичную методику использовали, когда переменной величиной было давление.

Измерения  $Q_{\text{КР},0}$  предшествовало несколько измерений  $Q_{\text{КР},\theta}$  начиная от недогрева на выходе из рабочей трубки  $20 \pm 30$  град. Кризис достигался небольшим увеличением тепловой нагрузки (не более 3-5%) с выдержкой режима до полной стабилизации его после очередного увеличения мощности на трубке. Если при увеличении тепловой нагрузки возникал кризис, для расчетов использовалось предыдущее значение.

Кризис возникал всегда в верхней части канала. Условие  $\theta \sim 0$  фиксировалось по показанию термопары, измеряющей среднюю температуру жидкости и давление на выходе из канала. Одновременно производились наблюдения за показаниями шести термопар, измеряющих температуру стенки. В момент кризиса всегда отмечался резкий скачок температуры стенки в верхней части канала. Отключение нагрузки с трубки осуществлялось автоматом, работающим от сигнала разбаланса моста, двумя плечами которого являлась рабочая трубка с потенциальным отводом от середины её.

В процессе опытов не было обнаружено зависимости  $Q_{\text{КР},\theta}$  от недогрева в области  $0 \pm 10$  град, поэтому для обработки использовались данные, полученные с недогревом  $0 \pm 10$  град.

В опытах с водой методика проведения экспериментов оста-

валась прежней, но с целью получения данных, позволяющих судить о механизме процесса, были дополнительно использованы специальные малоинерционные датчики. Датчик паросодержания (зонд) представляет собой тонкий электрод, зафиксированный в месте предполагаемого кризиса в центре трубки. По электрическому сопротивлению между стенкой трубки и электродом можно было судить о структуре потока. Следует заметить, что с помощью подобного зонда можно получить весьма обширную информацию о двухфазном потоке, например, Берглес А.И., исследуя режимы течения пароводяной смеси в трубах, пришел к выводу, что с помощью зонда характеристики двухфазного течения определяются значительно лучше, чем методом фотографирования.

Малоинерционное измерение скорости циркуляции производилось с помощью расходомерной диафрагмы и сифонного перепадамера. Сигналы от зонда и сифонного датчика, а также напряжение и ток на рабочей трубке записывались с помощью шлейфового осциллографа на киноплёнку. Давление на выходе из рабочей трубки измерялось образцовыми манометрами класса 0,5 и 0,35.

### III

Опыты проводились на бензоле марки ЧДА одной партии. Дистиллированная вода использовалась с контролируемыми параметрами по щёлочности и жёсткости.

Все проведенные опыты на бензоле и воде относятся к так называемым беспульсационным режимам. Поток дросселировался на входе до  $5 \pm 7$  ат при низких скоростях циркуляции и обычно используется при исследовании критических тепловых нагрузок приборы не фиксировали никаких колебаний в потоке.

На рис. 1+6 показана зависимость  $Q_{\text{КР},0}$  от массовой скорости для бензола при давлениях 1,5; 3; 9; 16; 30 и 38 бар.

На рис. 7-9 представлена зависимость  $Q_{кр,0}$  от давления при фиксированных значениях массовой скорости:  $160; 510; 10^3; 3 \cdot 10^3$  и  $5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>2</sup>сек.

Специальных мер по дегазации бензола (например, кипячение в установке) после заполнения не предпринимали, т.к. не было обнаружено зависимости критических тепловых нагрузок от дегазации кипячением во всем исследованном диапазоне давлений.

Почти все кривые  $Q_{кр,0} = f_1(W\rho)$  оказались немонотонными. Влияние скорости носит неоднозначный характер, есть области, в которых наблюдается и отрицательный эффект скорости. Результаты опытов свидетельствуют также об отсутствии в исследованной области определенного предела уменьшения  $Q_{кр,0}$  при убывании скорости вплоть до уровня естественной циркуляции.

Характер зависимости  $Q_{кр,0} = f_2(P)$  при малых скоростях циркуляции оказался весьма сходным с таковым в большом объеме (рис. 7), на что недавно обращено внимание в работе А.П.Орнатского, но с возрастанием скорости циркуляции кривая сильно деформируется (рис. 8-9).

В количественном отношении результаты настоящей работы условно сопоставлены (рис. 1-9) с полученными на бензоле при недогреве 20 град. в кольцевом канале расчетными соотношениями Л.С.Михайлова и К.В.Набойченко, установленными по данным опытов на многих жидкостях в области, в которой размеры кольцевого канала практически не влияют на критический тепловой поток.

При давлениях 16 бар и выше удовлетворительное согласие данных, полученных на бензоле, наблюдается с формулой П.И.Поварнина, если учесть рекомендованный автором диапазон её применимости по скорости.

## бензол $P = 1,5$ бар

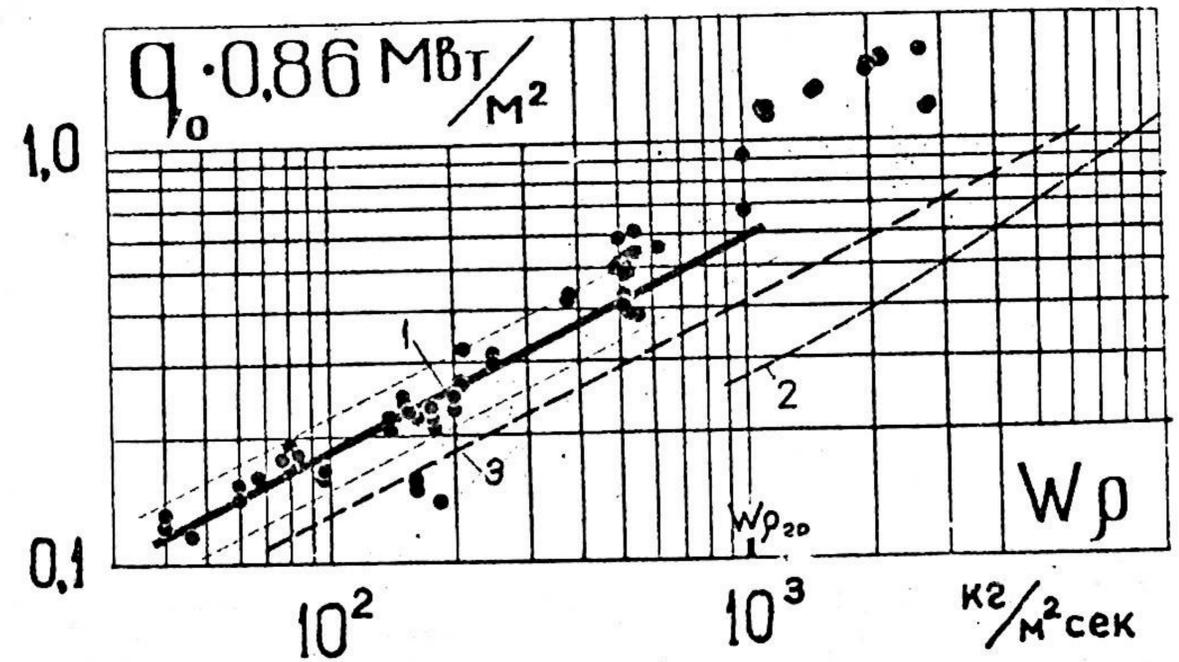


Рис. 1. Зависимость  $Q_{кр,0}$  от массовой скорости. ● - данные настоящего исследования, 1 - расчёт по формуле (8), 2 - расчёт по формуле Поварнина П.И. /1/, 3 - расчёт по формуле Стермана Л.С. /2/ (экстраполяция).

## бензол $P = 3,0$ бар

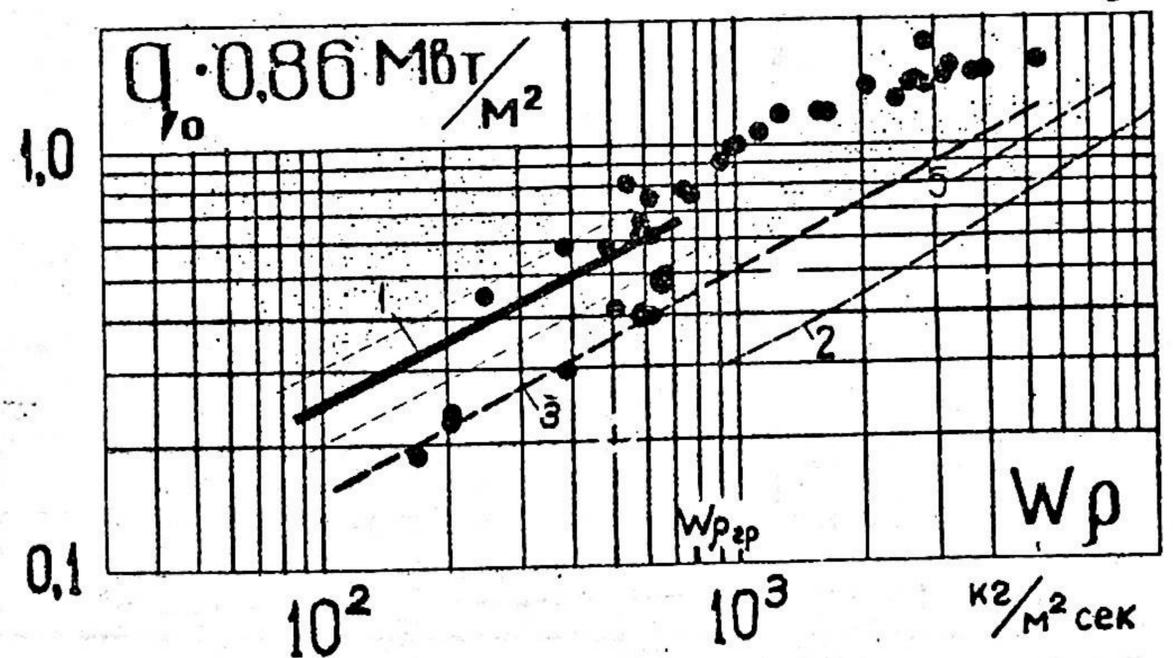


Рис. 2. Зависимость  $Q_{кр,0}$  от массовой скорости. Обозначения те же, что и на рис. 1. 5 - расчёт по формуле Набойченко К.В. /3/.

бензол  $\rho = 9,0 \text{ бар}$

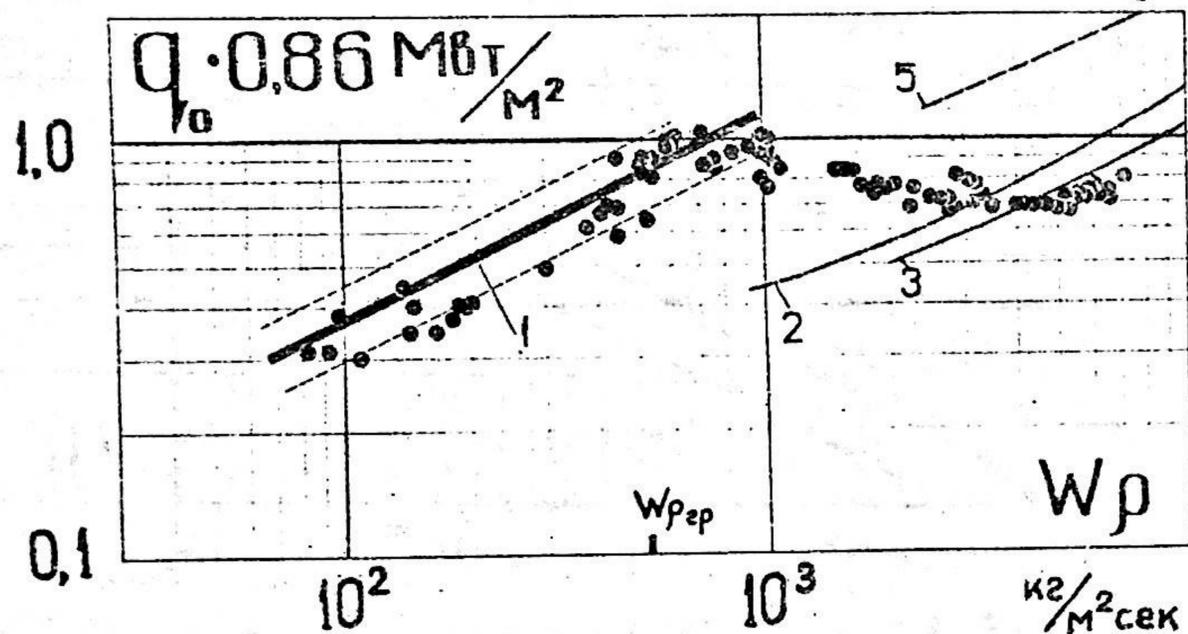


Рис. 3. Зависимость  $Q_{kp,0}$  от массовой скорости. ● - данные настоящего исследования, 1 - расчёт по формуле (8), 2 - расчёт по формуле Поварина П.И. /1/, 3 - расчёт по формуле Михайлова Л.Е. /4/, 5 - расчёт по формуле Набойченко К.В. /3/.

бензол  $\rho = 16 \text{ бар}$

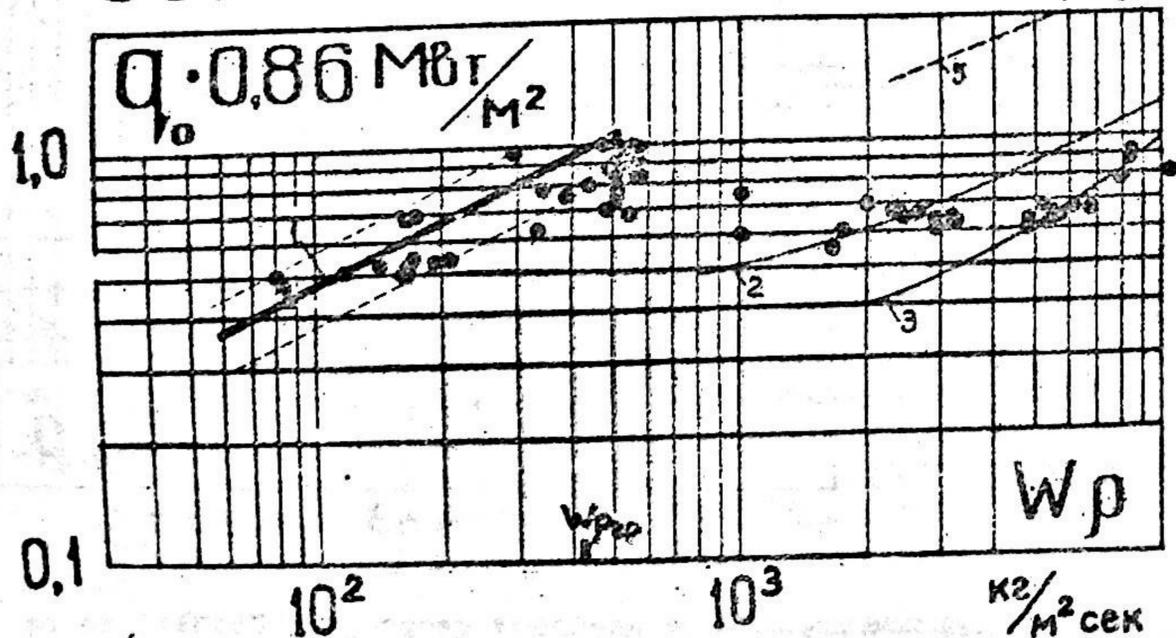


Рис. 4. Зависимость  $Q_{kp,0}$  от массовой скорости. Обозначения те же, что и на рис. 3.

бензол  $\rho = 30 \text{ бар}$

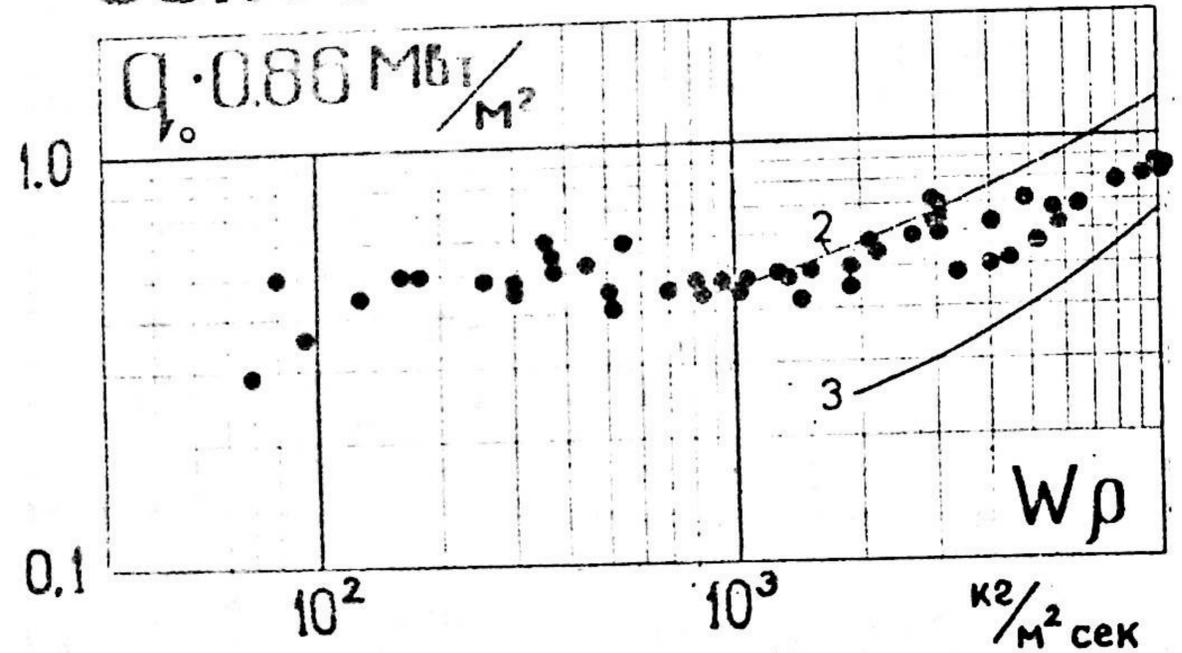


Рис. 5. Зависимость  $Q_{kp,0}$  от массовой скорости. ● - данные настоящего исследования, 2 - расчёт по формуле Поварина П.И. /1/, 3 - расчёт по формуле Михайлова Л.Е. /4/.

бензол  $\rho = 38 \text{ бар}$

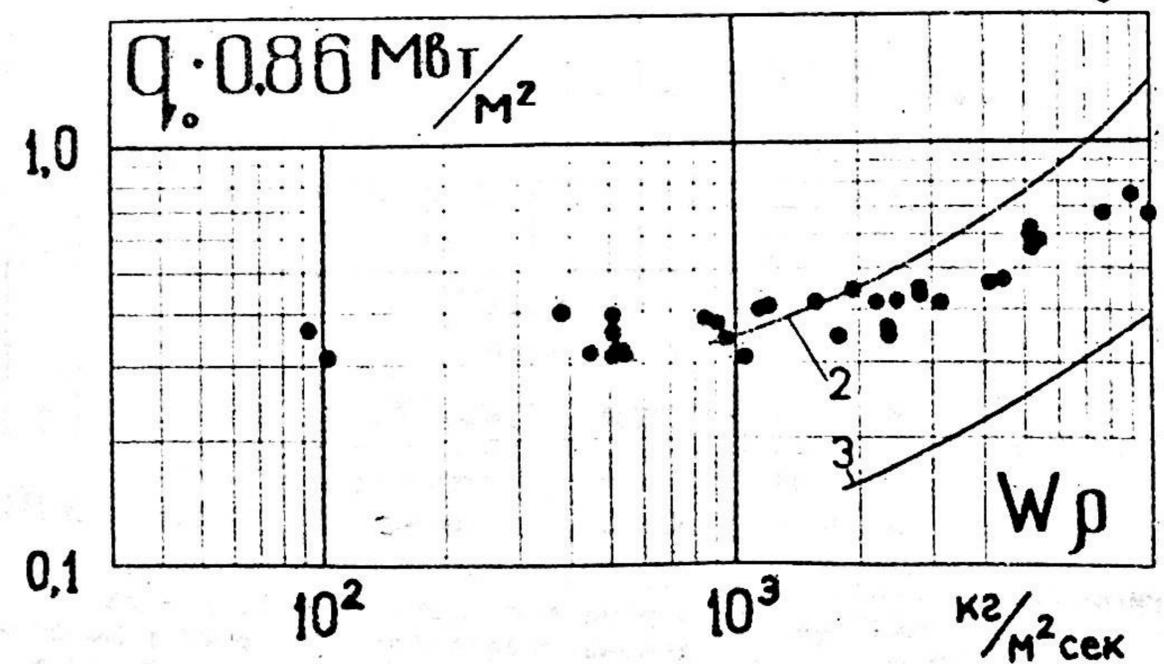


Рис. 6. Зависимость  $Q_{kp,0}$  от массовой скорости. Обозначения те же, что и на рис. 5.

## БЕНЗОЛ

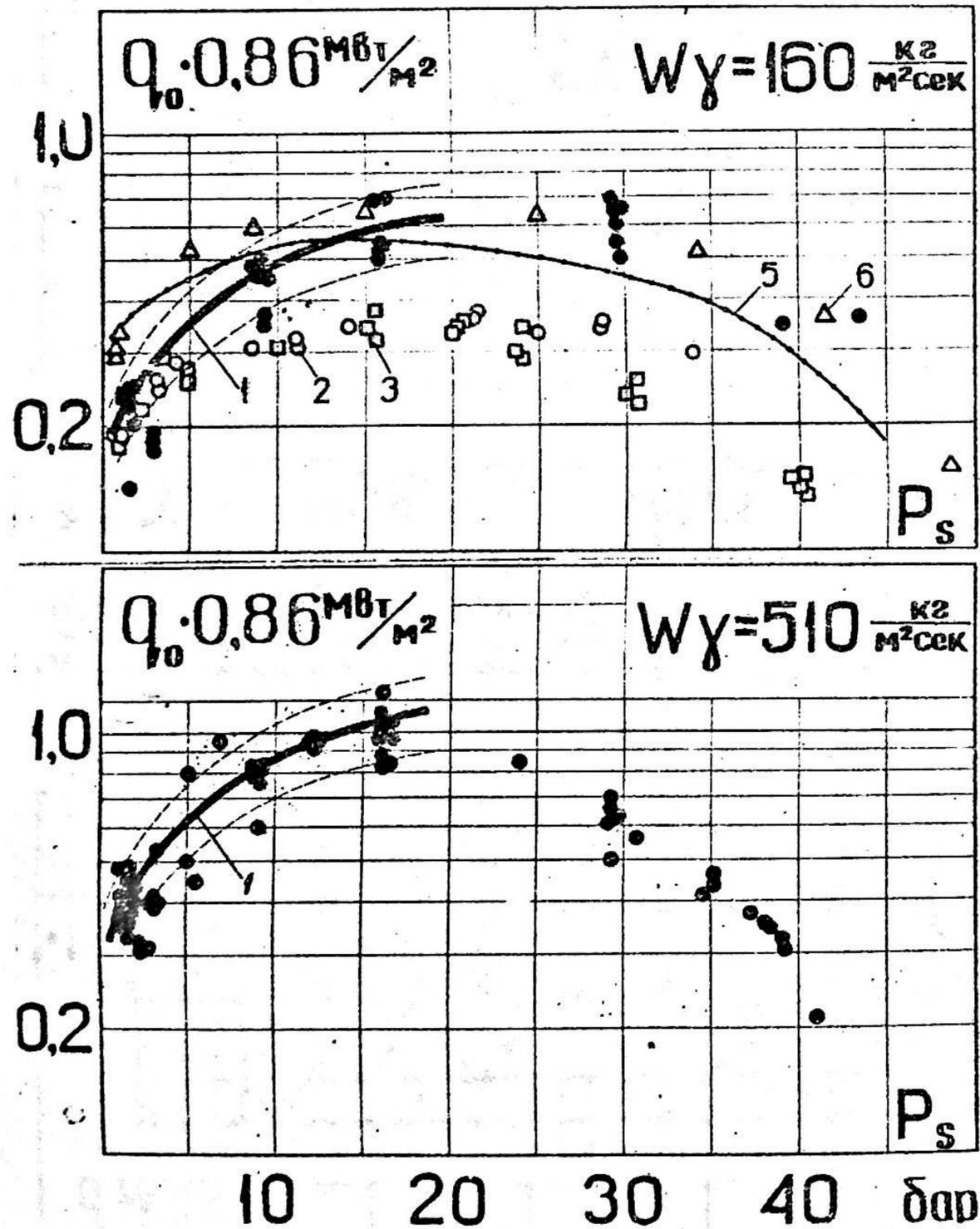


Рис. 7. Зависимость  $Q_{kp,0}$  от давления.  $\bullet$  - данные настоящего исследования, 1 - расчёт по формуле (8), 2 - данные работы /5/, 3 - данные работы /6/, 5 - расчёт по формуле Кутателадзе С.С. /7/, 6 - результаты Чикелли и Бония /8/.

## БЕНЗОЛ

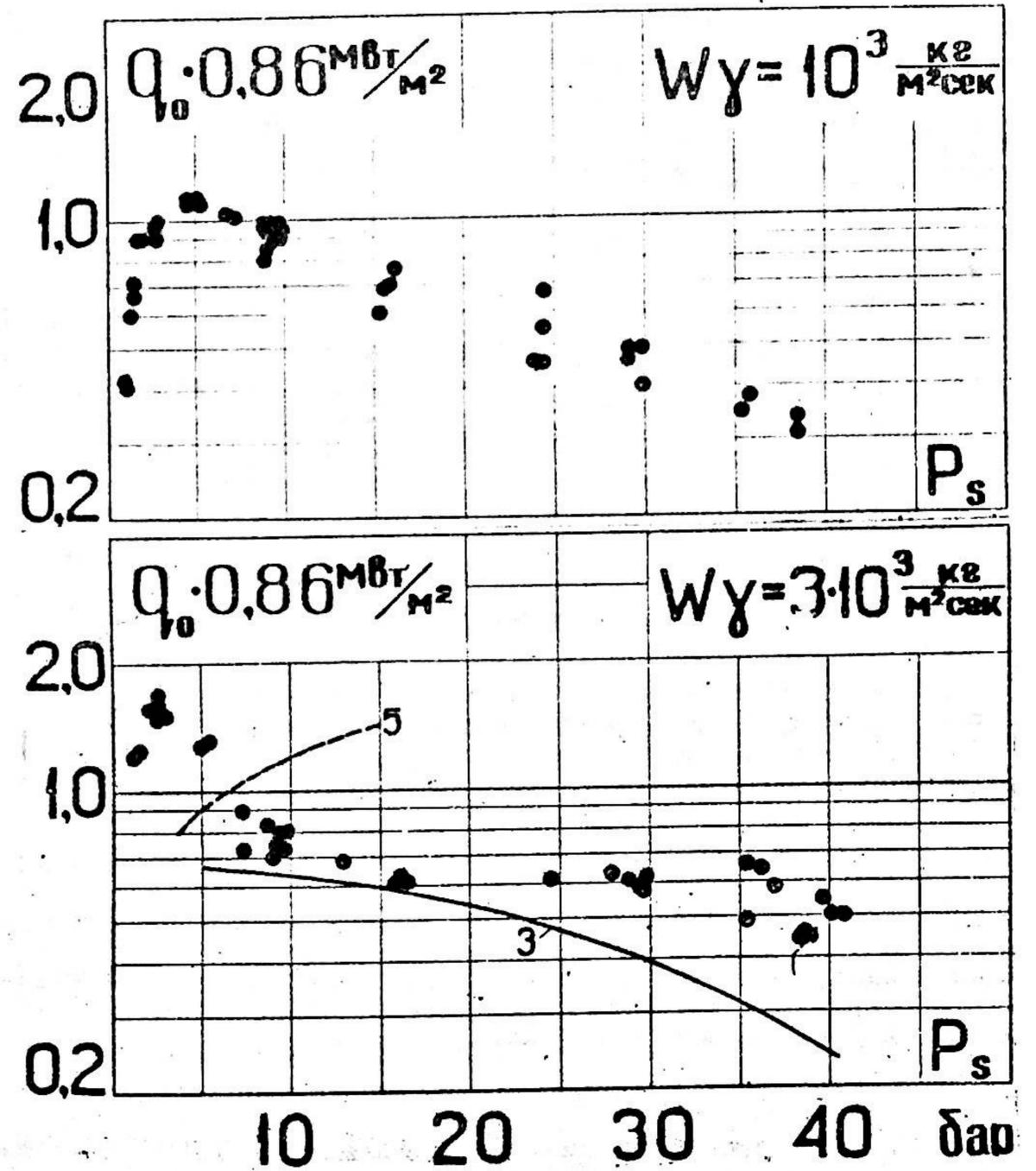


Рис. 8. Зависимость  $Q_{kp,0}$  от давления.  $\bullet$  - данные настоящего исследования, 3 - расчёт по формуле Михайлова Л.Е. /4/, 5 - расчёт по формуле Набойченко К.В. /8/.

БЕНЗОЛ

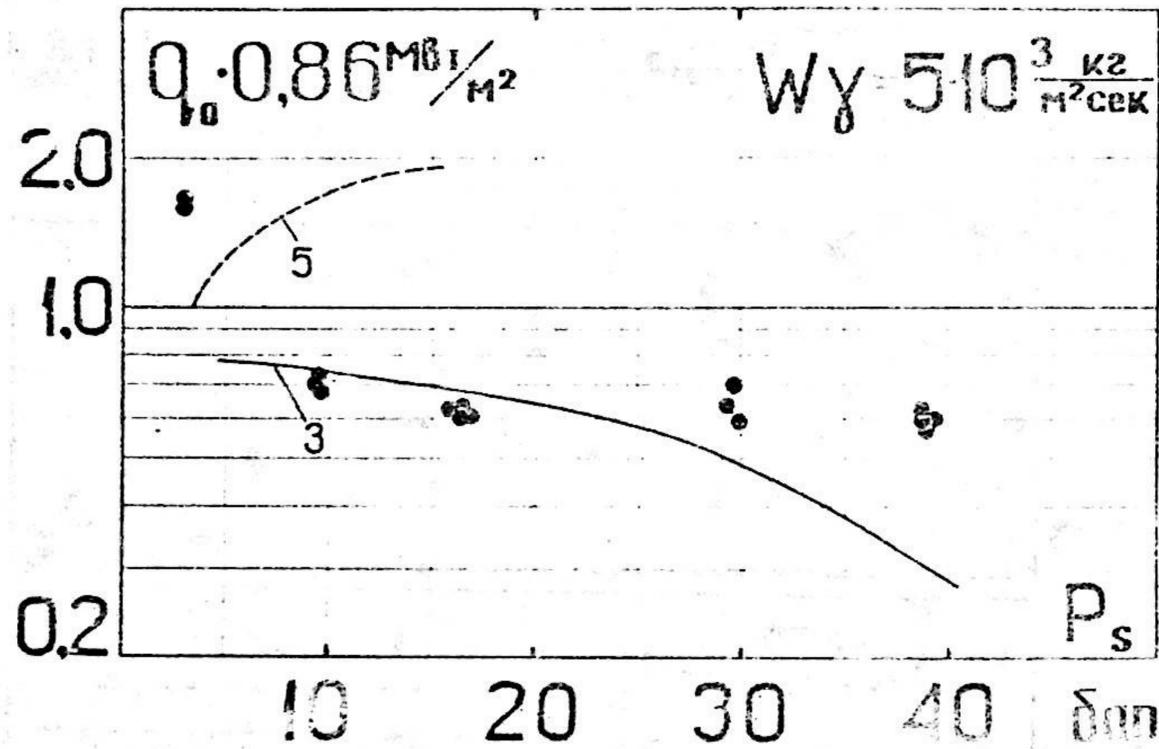


Рис. 9. Зависимость  $q_{кр,0}$  от давления. Обозначения те же, что и на рис. 8.

Как видно из рис. 1 и 2, экстраполированная в область малых скоростей формула Л.С.Стермана также удовлетворительно описывает наши данные при давлениях 1,5 и 3 бара. При увеличении давления результаты не совпадают.

В опытах с водой также получены области различного влияния на  $q_{кр,0}$  скорости циркуляции жидкости (рис. 10). При давлении 1,5 бар наблюдается две области: первая область  $W_p$  до значения  $\sim 1000$   $\text{кг/м}^2\text{сек}$ , в которой скорость влияет на  $q_{кр,0}$  в степени  $\sim 0,5$ , т.е.  $q_{кр,0} \sim W_p^{0,5}$ ; вторая - от 1000 до значения  $8 \cdot 10^3$   $\text{кг/м}^2\text{сек}$  -  $q_{кр,0} \sim W_p^{1,5}$ . При давлении 30 бар получены три области различного влияния  $W_p$  на  $q_{кр,0}$ : первая область - от режима естественной циркуляции до  $\sim 500$   $\text{кг/м}^2\text{сек}$  - скорость

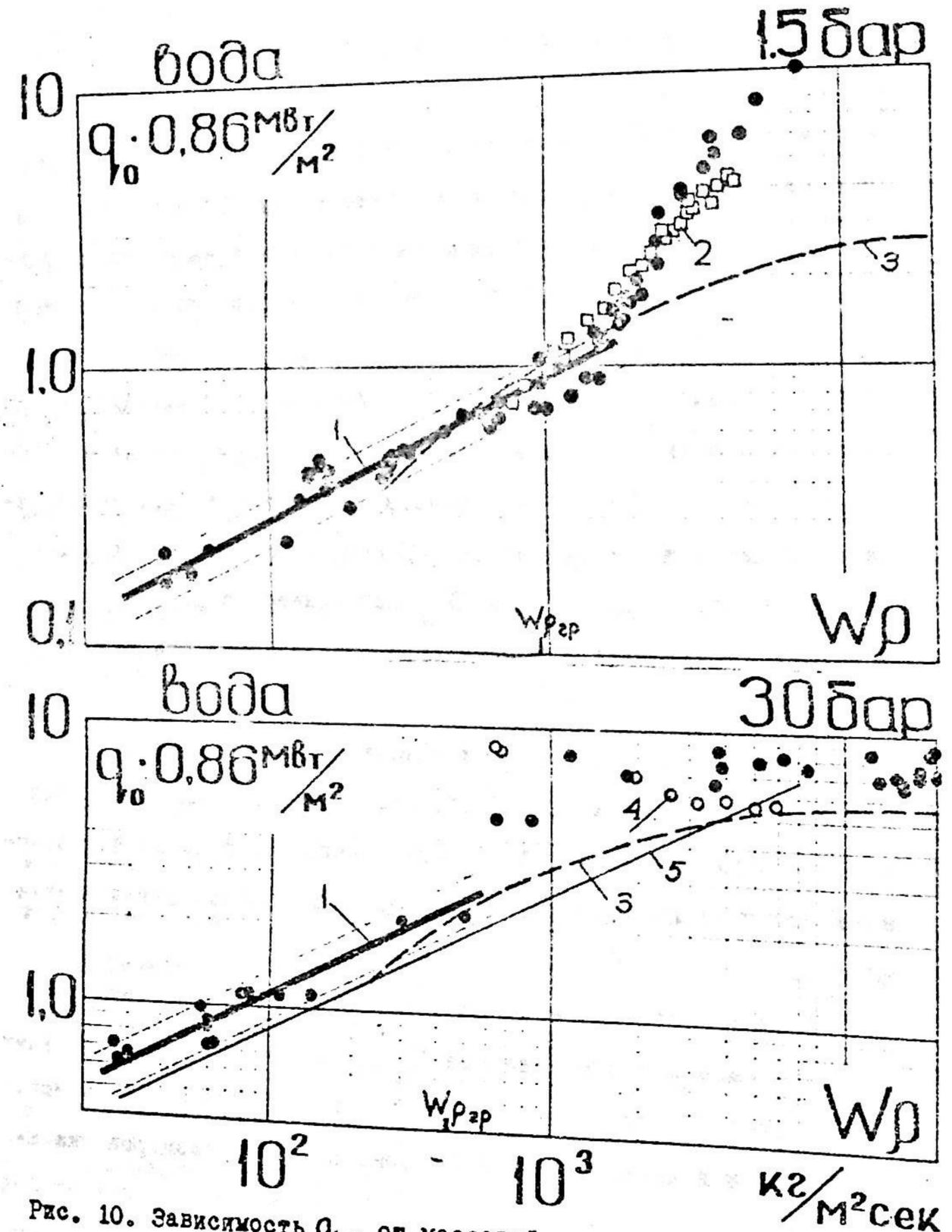


Рис. 10. Зависимость  $q_{кр,0}$  от массовой скорости воды. ● - данные настоящего исследования, 1 - расчет по формуле (8), 2 - экспериментальные данные Кириллова Е.А. /9/, 3 - расчетная формула Ивашевича А.А. /10/, 4 - экспериментальные данные, полученные в ЦЭИ /11/, 5 - экстраполированная формула Стермана Л.С. /2/.

влияет на  $Q_{\text{кp,о}}$  в степени  $\sim 0,5$ ; вторая область - при  $W_p \sim 500 + 10^3$  степень влияния скорости  $\sim 1,5$  и, наконец, третья область -  $W_p = 10^3 + 20 \cdot 10^3$  - скорость практически не влияет на  $Q_{\text{кp,о}}$  и даже наблюдается тенденция к отрицательному эффекту.

Полученные на воде данные были сопоставлены с результатами других исследователей. Частично этот вопрос иллюстрируется на рис. 10. Формула А.А.Ивашкевича хорошо описывает полученные данные до значений скорости  $2000 \text{ кг/м}^2 \text{ сек}$  при давлении  $1,5 \text{ бар}$  и до  $\sim 600 \text{ кг/м}^2 \text{ сек}$  - при давлении  $30 \text{ бар}$ . При высоких скоростях течения при  $P = 30 \text{ бар}$  расчетная зависимость А.А.Ивашкевича проходит приблизительно на  $20\%$  ниже наших данных. Хорошее согласие полученных значений  $Q_{\text{кp,о}}$  наблюдается с первичными данными П.Л.Кириллова и А.Н.Васильева, полученными при атмосферном давлении.

При давлении  $30 \text{ бар}$  наши данные удовлетворительно согласуются с результатами В.И.Субботина /11/. Экстраполированная в область низких значений скорости расчетная формула Л.С.Стермана проходит на  $10\%$  ниже полученных нами данных при давлении  $30 \text{ бар}$ .

В настоящей работе не исследовалось специально влияние диаметра канала и его длины на  $Q_{\text{кp,о}}$ . Однако отмеченное удовлетворительное совпадение с данными нескольких исследований, полученными в каналах различных геометрических размеров указывает, что увеличение длины канала и диаметра выше используемых в данной работе, по-видимому, влияет не очень сильно. Об этом свидетельствуют также результаты работы В.Е.Дорожука /12/.

Для первой области ( $Q_{\text{кp,о}} \sim W_p^{0,5}$ ) было получено большое число характерных осциллограмм, позволяющих сделать вывод о том, что наступлению кризиса предшествуют периодические коле-

бания показаний зонда от уровня, соответствующего жидкости, до уровня, соответствующего чистому пару. (Условно можно представить в виде прямоугольных "импульсов", у которых верхняя горизонтальная площадка характеризует наличие в трубке жидкости, нижняя - пара).

В такт этим колебаниям наблюдались значительные броски скорости, причем в моменты, когда зонд фиксировал переход от уровня жидкости до уровня пара, датчик скорости отмечал значительное уменьшение скорости (рис. 11). При переходе показаний зонда от уровня пара к жидкости фиксировалось увеличение скорости больше среднего расходного значения. Такие колебания начинались при тепловых нагрузках, меньших критического значения на  $15+20\%$ , причем при дальнейшем увеличении тепловой нагрузки на трубке интенсивность колебаний нарастала. Колебания скорости немного отставали по фазе от показаний зонда. Средняя частота колебаний составляла  $\sim 3,5+5 \text{ гц}$  при скорости  $\sim 0,5 \text{ м/сек}$  и  $\sim 7+10 \text{ гц}$  при скорости  $\sim 1 \text{ м/сек}$  ( $P=1,5 \text{ бар}$ ). Такие характерные колебания наблюдались в той области, в которой экспериментальная зависимость  $Q_{\text{кp,о}}$  от  $W_p$  соответствует степени расхода  $0,5$ .

Периодическое запаривание верхней части канала и одновременно фиксируемое резкое снижение расхода позволяет сделать вывод о псевдоснарядной форме течения парожидкостной смеси. Кормовая часть "снаряда" толчкообразно распространяется навстречу потоку, то удаляется из канала потоком жидкости.

Следует отметить, что по показаниям приборов, обычно используемых при исследовании кризиса теплоотдачи, поток выглядел как беспульсационный. Колебаний показаний манометров и расходомера не отмечалось. Аналогичные колебания в двухфазном

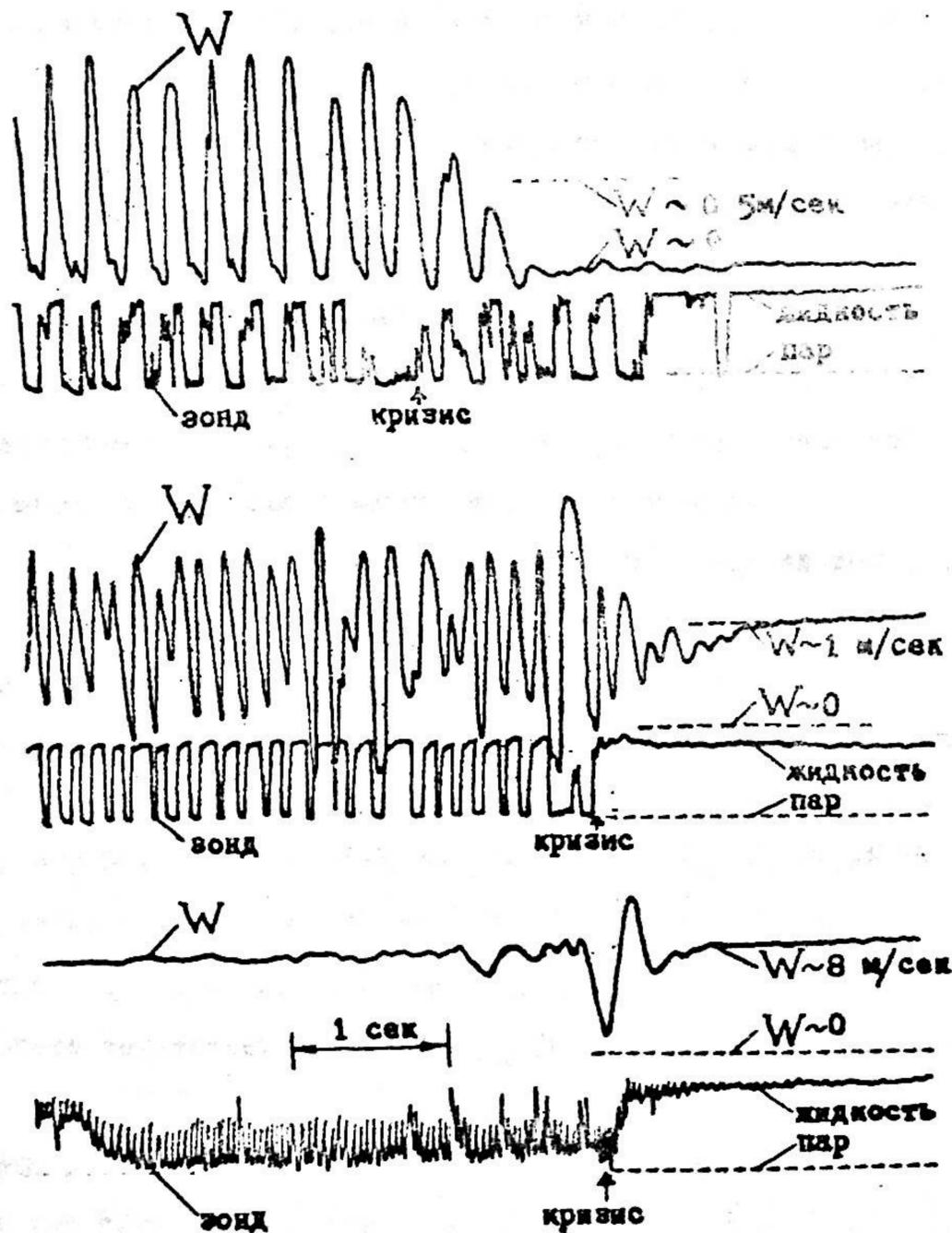


Рис. 11. Осциллограммы, полученные при давлении 1,5 бар.  
Направление процесса - слева направо.

потоке при низких скоростях циркуляции воды наблюдались в работах Spigt C.L. /13/, Сато /14/, Bergles A.E. /15/, причем в работе /15/ наблюдалась снарядная форма течения парожидкостной смеси перед кризисом даже в случае недогретой жидкости (при недогревах  $\sim 20^\circ$ ).

В других областях изменения скорости участка, как правило, сгорали и было получено значительно меньшее количество осциллограмм, что не дает возможности сделать окончательные выводы. Показания датчиков позволяют судить о том, что в этих областях изменения скорости гидродинамический режим течения другой, а, следовательно, и форма гидродинамической природы кризиса может быть отличной:

Наиболее подробные и характерные осциллограммы получены для области псевдоснарядного режима течения, поэтому эта область была вынрана для обобщения экспериментальных данных.

Из анализа экспериментальных результатов, полученных на воде, можно сделать следующие выводы:

1. При малых скоростях циркуляции  $Q_{\text{КР,0}}$  монотонно уменьшается. При этом не обнаружено предела снижения  $Q_{\text{КР,0}}$  с уменьшением скорости.

2. Наблюдается область ( $P=30$  бар), где скорость циркуляции при значительном изменении практически не влияет на  $Q_{\text{КР,0}}$

Аналогичные результаты были получены и на бензоле. Идентичный ход кривых  $Q_{\text{КР,0}} = f_1(W_0)$  позволяет предположить качественную идентичность происходящих процессов и результаты анализа опытных данных, полученных на воде, распространить на результаты исследования, проведенного с бензолом.

Опыты на бензоле позволили также подтвердить мнение некоторых экспериментаторов, что величины  $Q_{\text{КР,0}}$  в трубах могут

быть существенно ниже значений, полученных в большом объеме.

Механизм и природа кризиса хотя и носят гидродинамический характер, при малых скоростях в области существования псевдоснарядного режима существенно отличаются от наблюдаемых в большом объеме. Можно лишь отметить, что при низких скоростях совпадает с полученным в большом объеме только качественный характер зависимости  $Q_{кр,с}$  от давления.

#### IV

На основе расшифровки показаний зонда и датчика скорости предпринята попытка разработать приближенную модель кризиса теплоотдачи при псевдоснарядном режиме течения пароводяной смеси в трубе и на ее основе обобщить опытные данные. Исходным является одновременное запаривание выходной части трубки, отмечаемое зондом, и быстрое снижение расхода жидкости в ней, что фиксировалось на шлейфовом осциллографе.

Обогреваемую трубку схематично можно представить, как это показано на рис. 12. В момент  $\tau_1$  растет число пузырей в рабочей трубке, скорость смеси на выходе обогреваемой трубки возрастает. В момент  $\tau_2$  скорость удаления пароводяной смеси из трубки по какой-то причине не может больше увеличиваться, т.е. достигает граничного значения, а т.к. для нормального удаления пара требуется большая скорость смеси на выходе, пар начинает накапливаться в рабочей трубке и в виде сливающихся пузырей варивообразно устремляется навстречу потоку (на выход пар по-прежнему удаляется с конечной скоростью). В момент  $\tau_3$  игла омывается преимущественно паром с незначительным количеством жидкости, распределенной в ядре в виде кусков пены. В момент  $\tau_4$  граница раздела останавливается и затем жидкость вы

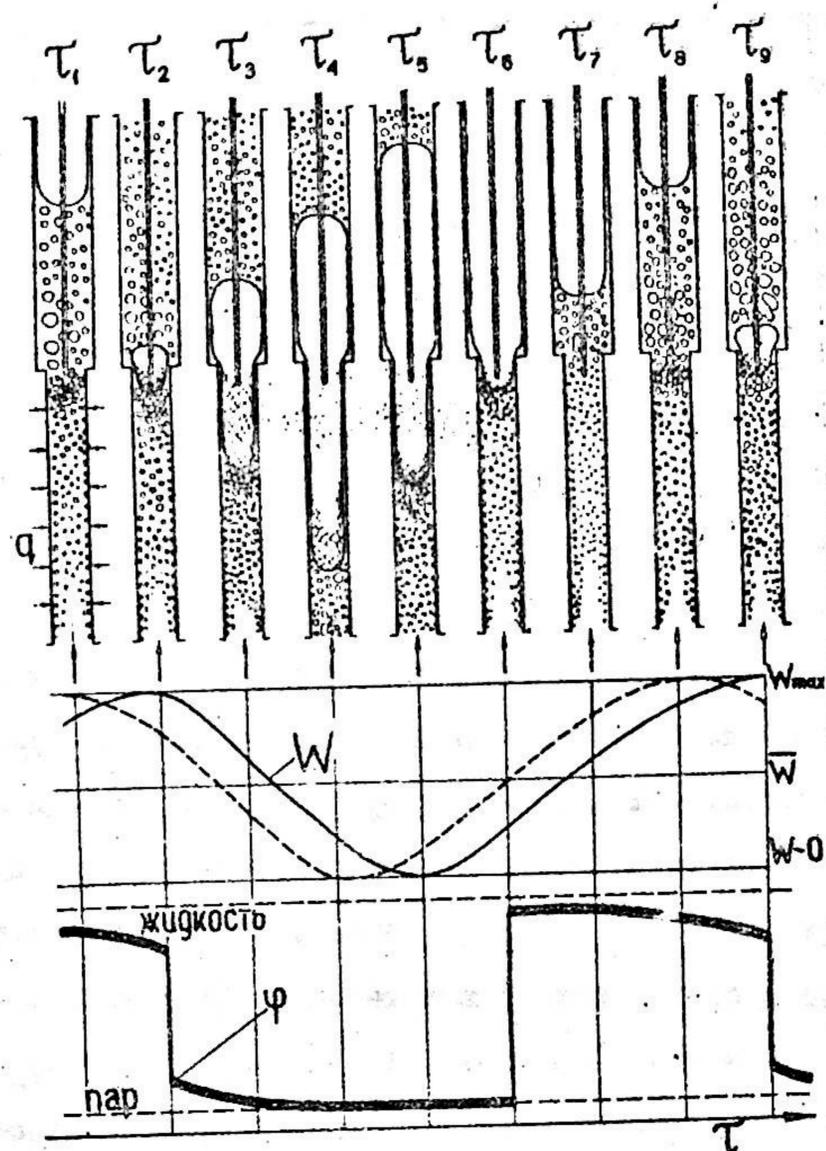


Рис. 12. Модель псевдоснарядного режима течения парожидкостной смеси в трубе. В центре рабочей трубки схематично изображен зонд.

таккивает из рабочей трубки паровой "снаряд" ( $\tau_5, \tau_6$ ), на место которого поступает уже новая порция жидкости ( $\tau_6, \tau_7$ ). При  $\tau_8$  (эквивалентно  $\tau_1$ ) цикл повторяется. В идеальном случае уменьшение скорости циркуляции должно начаться при  $\tau_1$  и прекратиться при  $\tau_4$  (пунктирная линия). В реальных условиях необходимо учесть запаздывание прихода сигнала в место установки датчика скорости, так что колебания скорости будут немного отставать по фазе (сплошная линия) от колебаний паросодержания, фиксируемых зондом. Этот сдвиг фаз отчетливо просматривается на всех осциллограммах для псевдоснарядного режима течения. Полученные для этого режима осциллограммы показывают, что частота колебаний пропорциональна скорости. В работе предложено объяснение возможной причины, вызывающей колебательный процесс в трубе перед наступлением кризиса, основанное на заклинивании теплового канала при достижении критического расхода смеси.

Независимо от причины, вызывающей это явление, попытаемся представить возможный механизм возникновения кризиса теплоотдачи при псевдоснарядном режиме течения. Для этого введем следующие гипотезы:

При врывообразном движении паровой границы навстречу потоку, на стенке остается пленка жидкости толщиной  $\delta$ . Эта пленка заторможена в связи с тем, что нет ее подпитки. Уменьшение толщины пленки идет только за счет ее испарения (механический унос мал). Процессами конденсации и диффузии пренебрегаем.

При этих допущениях, правомерность которых обосновывается в работе, можно предположить, что если за период  $T$  жидкая пленка толщиной  $\delta$  успеет высохнуть со скоростью  $Q_{кр,0}/z\rho'$  наступит кризис, что можно выразить в виде балансного соотно-

шения: 
$$\frac{\delta}{Q_{кр,0}/z\rho'} \sim T \dots\dots\dots (4)$$
 Здесь необходимо найти  $\delta$  и  $T$ , чтобы вычислить  $Q_{кр,0}$

Опираясь на результаты решения задачи о нестационарном пограничном слое /16/, а также на результаты исследования, выполненного Cooper M.G /17/, можно предположить справедливость соотношения

$$\delta \sim C \sqrt{\nu \cdot T} \dots\dots\dots (5)$$

На основе анализа осциллограмм и учета главных сил, действующих в потоке, получен список величин, существенных для оценки  $T$ . Обработка его методами теории подобия и размерностей приводит к соотношению:

$$T = \frac{1}{W} \cdot F\left(\frac{\gamma' - \gamma''}{\gamma''}\right) \cdot \sqrt{\frac{\epsilon}{\gamma' - \gamma''}} \cdot \Psi\left(\frac{L}{D}\right) \dots\dots (6)$$

Подставив (6) и (5) в (4) получим:

$$Q_{кр,0} = C_1 \frac{\sqrt{\nu' W'}}{\sqrt{\frac{\epsilon}{\gamma' - \gamma''}} \cdot \sqrt{F\left(\frac{\gamma' - \gamma''}{\gamma''}\right)}} \cdot z\rho' \frac{1}{\Psi\left(\frac{L}{D}\right)} \dots\dots (7)$$

С учетом данных эксперимента (7) переписывается в виде:

$$Q_{кр,0} = 3,0 \frac{z(\nu' \rho')^{0,5}}{\sqrt{\frac{\epsilon}{\gamma' - \gamma''}}} \cdot \left(\frac{\gamma''}{\gamma' - \gamma''}\right)^{0,6} \cdot (W\rho')^{0,5} \dots\dots (8)$$

Приводя эту формулу к безразмерному виду и учитывая для исследованной области давлений, что  $\frac{\gamma''}{\gamma' - \gamma''} \sim 1$  и  $\frac{\gamma''}{\gamma' - \gamma''} \sim \frac{\gamma''}{\gamma'}$ ,

получим:

$$\frac{Q_{кр,0}}{z\sqrt{g\gamma''} \cdot \sqrt{\epsilon(\gamma' - \gamma'')}} = 3 \left(\frac{\gamma''}{\gamma'}\right)^{0,1} \cdot \left(\frac{\nu' \gamma'' W'}{g\epsilon}\right)^{0,5} = 3 \left(\frac{\gamma''}{\gamma'}\right)^{0,1} \cdot \left(\frac{Fr}{Ga \cdot We^2}\right)^{0,25} \dots\dots (9)$$

Степень 0,5 влияния скорости на  $q_{кр,0}$  не является неожиданной. Экспериментально она получена многими авторами, однако в данной работе она получена расчетным путем на основе рассмотренной модели кризиса при псевдоснарядном режиме течения и анализа экспериментального материала по механизму движения жидкости и пара перед наступлением кризиса. Установлено, что указанная зависимость сохраняется вплоть до очень малых скоростей, соответствующих естественной циркуляции.

Формула (9) удовлетворительно описывает опытные данные настоящего исследования на воде и бензоле с точностью 20% (рис. 13) и справедлива в области существования псевдоснарядного режима течения, начиная от скоростей естественной циркуляции.

Границы применимости по давлению: для бензола - до 16 бар для воды - до 30 бар.

Верхняя граница существования псевдоснарядного режима течения оценивалась по величине критерия Рейнольдса для парожидкостной смеси:

$$Re_{см} = \frac{W}{1 - \varphi_0 \left(1 - \frac{\gamma''}{\gamma'}\right)} \cdot \frac{D}{\nu} \leq 3,2 \cdot 10^4 \quad \dots (10)$$

$\varphi_0$  оценивалось с использованием рекомендаций З.Л. Миропольского /18/ для воды. Верхней границе по скорости для псевдоснарядного режима течения пароводяной смеси соответствовало одинаковое значение  $\varphi_0 \sim 0,56$  для обоих давлений: 1,5 и 30 бар.

В связи с тем, что для бензола данных по определению истинного объемного паросодержания в литературе нет, было введено предположение, что верхняя граница  $W_{гр}$  по скорости для бензола тоже характеризуется  $\varphi_0 = 0,56$ . Результаты расчетов для бензола и воды (с учетом (10) и  $\varphi_0 = 0,56$ ) сведены

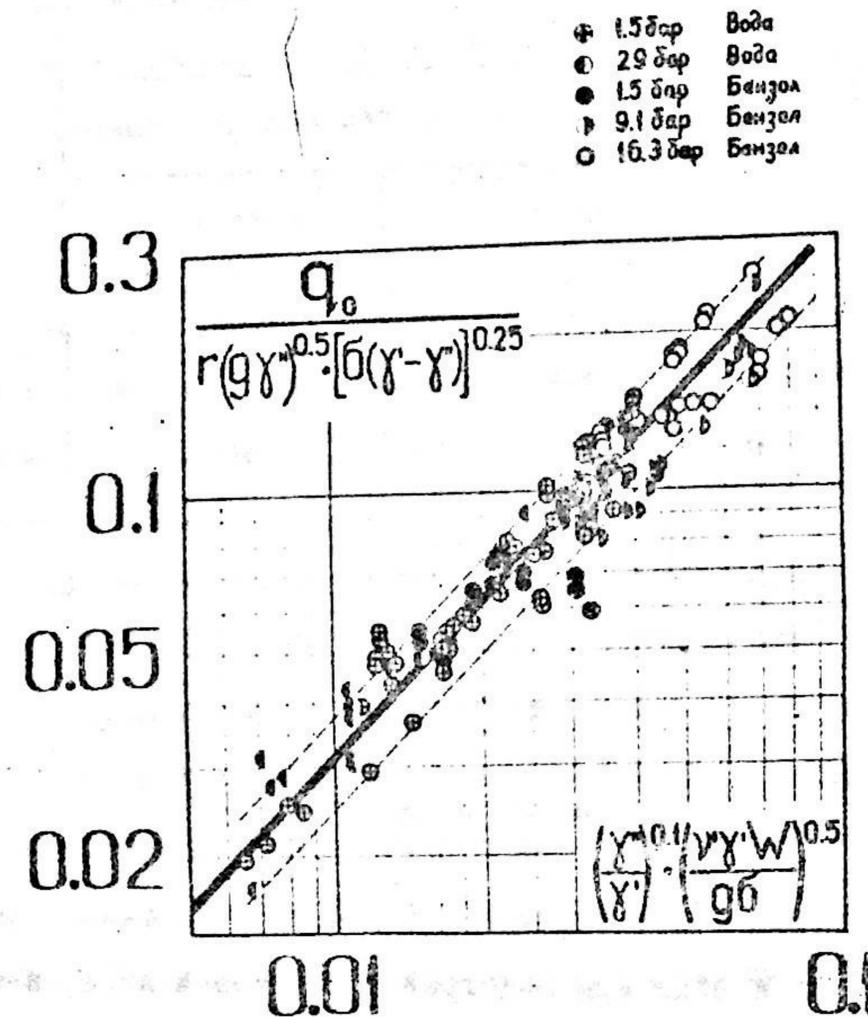


Рис. 13. Обобщение экспериментальных данных по кризису теплоотдачи для псевдоснарядного режима течения парожидкостной смеси в трубе.

в таблицу и нанесены на графиках рис. 1-4 и 10.

бар	кг/м <sup>2</sup> сек	
	Вода	Бензол
1,5	910	1000
3,0	-	790
9,0	-	515
16,0	-	420
30,0	427	-

### В Н В О Д Ы

1. Получены экспериментальные данные по кривису теплоотдачи бензола и воды при недогреве, близком к нулю, в широком интервале изменения режимных параметров и при тщательном контроле за чистотой теплоотдающей поверхности.

Бензол:  $W_p$  изменялось от скорости естественной циркуляции до  $10^4$  кг/м<sup>2</sup>сек, при фиксированных давлениях 1,5; 3; 9; 16; 30 и 38 бар.

Давление изменялось от 1,5 до 38 бар при фиксированных расходах  $W_p$  :  $160$ ;  $500$ ;  $10^3$ ;  $3 \cdot 10^3$ ;  $5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>2</sup>сек.

Вода:  $W_p$  изменялось от скорости естественной циркуляции до  $2 \cdot 10^4$  кг/м<sup>2</sup>сек при фиксированных давлениях 1,5 и 30 бар.

2. Получены области различного влияния на  $Q_{кр,о}$  скорости циркуляции жидкости. В области малых скоростей не обнаружено предела снижения критических тепловых нагрузок при уменьшении скорости циркуляции вплоть до уровня естественной конвекции. При малых  $W_p$  значения  $Q_{кр,о}$  получены существенно ниже критических тепловых потоков для большого объема. При больших скоростях течения обнаружены области, в которых скорость либо не оказывает влияния на  $Q_{кр,о}$ , либо отрицательно влияет на критический тепловой поток.

3. Использование малоинерционной аппаратуры и полученные осциллограммы позволили установить, что в условиях так называемых беспульсационных режимов при низких скоростях циркуляции перед возникновением кризиса теплоотдачи наблюдаются более высокочастотные нестационарные явления ( $\sim 10$  гц), не отмечаемые обычной измерительной аппаратурой.

Периодическое запаривание верхнего участка канала и одновременно фиксируемое резкое снижение расхода позволяют сделать вывод о псевдоснарядной форме течения при низких скоростях циркуляции и свидетельствует о совершенно иной по сравнению с большим объемом форме гидродинамической природы кризиса, что особенно отчетливо проявляется при низких давлениях. В различных областях изменения скорости при малых недогревах или малых истинных паросодержаниях механизмы кризиса могут быть различными.

4. На базе полученных экспериментальных данных по механизму кризиса разработана приближенная модель кризиса теплоотдачи при псевдоснарядном режиме течения и на основе этой модели получена полуэмпирическая зависимость, удовлетворительно описывающая экспериментальные данные ( $\pm 20\%$ ). В полученной фор-

## Л и т е р а т у р а

1. ПОВАРИН П.И. Приближенные методы расчета критической тепловой нагрузки для органических теплоносителей в условиях принудительного течения. В сб.: "Теплообмен, гидродинамика и теплофизические свойства веществ". М., 1968, 74.
2. СЕРМАН Л.С., МИХАЙЛОВ В.Д. Исследование критических тепловых потоков при поверхностном кипении органической жидкости в трубах. "ИФЖ", 1964, № 12.
3. НАБОУЧЕНКО К.В., КИРЯТИН А.А., ГРИВОВ Б.С. Исследование критических тепловых потоков при вынужденном движении смеси монохлорпропиладифенил-бензола. "Теплоэнергетика", № 11, 81-86, 1965.
4. МИХАЙЛОВ Л.Е. Обобщение некоторых опытов по кривису кипения жидкости при вынужденном движении на основе термодинамического подобия. "ПМТФ", М., 1963, № 3, 130-135.
5. ХЕНЕ, ГУБЕР. Кипение бензола, дифенила и бензол-дифенильных смесей в большом объеме под давлением. "Теплопередача", серия С, 85, № 3, 31-38, 1963.
6. ГОЛОВИН В.С. и др. Исследование теплообмена и критических тепловых нагрузок при кипении жидкостей в условиях свободного движения на поверхностях из различных материалов. В сб.: "Кривис кипения и температурный режим испарительных поверхностей нагрева", тр. ЦКТИ, 1965, вып. 58, 35-46.
7. КУТАТЕЛАДЗЕ С.С. Основы теории теплообмена. Маггиз, 1962
8. Chicheley M., Bonilla C., "Trans. Amer. Inst. Ch. Eng." 1945, n 8

9. ВАСИЛЬЕВ А.Н., КИРИЛЛОВ П.Л. Исследование кривиса теплообмена, связанного с резким вскипанием жидкости в каналах малого диаметра. В сб.: "Вопросы теплофизики ядерных реакторов", 1969, вып. 2, 49-57.
10. ИВАШКЕВИЧ А.А. Критические тепловые потоки при вынужденном движении жидкости в каналах. "Атомная энергия", 1960, т.8, № 1.
11. СУББОТИН В.И. и др. Критические тепловые нагрузки при кипении воды в трубах. В сб.: "Исследование теплоотдачи к пару и воде, кипящей в трубах при высоких давлениях", под ред. Доклежалъ Н.А. М., Атомиздат, 1958, 120.
12. ДОРОЩУК В.Е., ЛАНЦМАН Ф.П. Выбор величин критических тепловых потоков при кипении воды в вертикальных трубах с равномерным обогревом. "Теплоэнергетика", № 12, 1970, 17.
13. Spigt C.L. "Warmte-overdracht in kokende vloeistoffen" *Chemische techniek*, 6, 15, September, 1967, Ch. 49.
14. САТО Т., ХАЯСИДА И., МОТОДА Т. Влияние пульсаций расхода на критический тепловой поток. В сб.: "Достижения в области теплообмена". М., 1970, 231.
15. Kizby G.J., Stanifort R., Fiozy M.P., Bezgles A.E., AEEW-M725, 1967.
16. ШЛИХТИНГ. Теория пограничного слоя. 1969.
17. Cooper M.G. and A.J.P. Lloyd. The microlayer in nucleate pool boiling. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 12, 895-913, 1969.
18. МИРОПОЛЬСКИЙ Э.Л. и др. Истинные объемные паросодержания при течении пароводяной смеси в каналах различной формы (разработка расчетных рекомендаций), 1969, отчет № 207, ЭНИИ.