

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСТЕЧЕНИЯ КИПЯЩЕЙ ВОДЫ ЧЕРЕЗ ДИАФРАГМЫ И ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ НАСАДКИ

А. А. ГУРЧЕНОК

Представлено профессором Г. И. ФУКС

Процесс истечения кипящей воды изучается давно. Однако до сих пор некоторые стороны этого процесса не ясны, а существующие представления о характере процесса парообразования при истечении противоречивы.

В данной работе проведено определение пропускной способности цилиндрических насадков различной длины с измерением давления по длине насадков. По результатам опытов высказываются соображения о картине потока и дается метод для подсчета пропускной способности диафрагм и цилиндрических насадков различной длины на кипящей воде.

Принятые обозначения:

d — диаметр насадка, мм,
 f — площадь сечения, см²,
 G — расход кг,
 g — ускорение силы тяжести, м/сек²,
 i — энтальпия, ккал/кг,
 x — степень сухости пара, кг/кг,
 p — давление, ата, кг/см²,
 l — длина насадка, мм,
 v — удельный объем, м³/кг,
 w — скорость, м/сек,
 μ — коэффициент расхода,
 φ — коэффициент скорости,
 ε — коэффициент сжатия струи.

I. Литературные данные

Теоретические исследования процесса истечения кипящей воды впервые производились Цейнером [1], Лоренцем [2], Рато [3], Флигнером [4]. Процесс истечения кипящей воды ими рассматривался как процесс адиабатного расширения (рис. 1).

Авторы применяют формулы термодинамики и получают, что скорость истечения будет равна:

$$w_1 = 91,5 \sqrt{i'_1 - i_2} \text{ м/сек,} \quad (1)$$

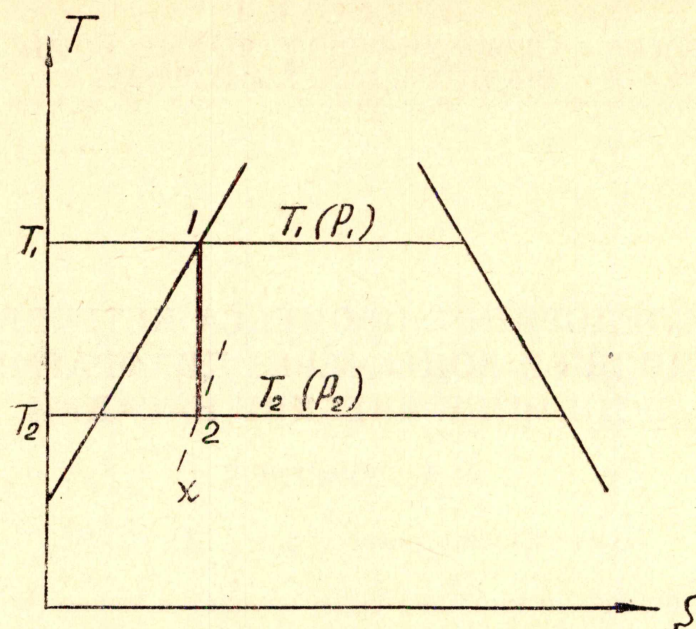


Рис. 1.

где

$$i_2 = i_2' + x \cdot r \text{ ккал/кг.} \quad (2)$$

Затем по величине скорости определяется пропускная способность:

$$G_{теор.} = f \frac{w}{v_{см}} \text{ кг/сек,} \quad (3)$$

где

$$v_{см} = v' + x (v'' - v') \text{ м}^3/\text{кг} \quad (4)$$

Авторы по-разному принимают значение величины давления в конце расширения. Цейнер и Лоренц считали, что происходит полное расширение до противодавления, Рато и Флигнер предполагали, что устанавливается критическое давление, величину которого следует определять из условий получения максимальной пропускной способности. Пример подобного расчета приведен в табл. 1.

Табл. 1

Начальное давление p_1 в ата	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Предполагаемое давление в конце расширения p_2 в ата	6,0	5,5	5,4	5,0	4,0	3,0	2,0	1,0
Пропускная способность, кг/см ² сек	0	0,4135	0,42	0,4065	0,3457	0,2726	0,1941	0,111

Из табл. 1 видно, что за критическое давление следует принять давление 5,4 ата.

Опытное исследование процесса истечения, проведенное Бониным и Пулиным [5] и Адамом [6], показало, что пропускная способность насадков на кипящей воде оказывается в несколько раз больше, чем максимальная производительность, определенная теоретически табл. 2.

Указанное расхождение результатов теоретических расчетов с опытными данными показало, что для определения пропускной способ-

Табл. 2

Начальное давление	Пропускная способность насадка кг/см ² сек			
	теоретические данные		опытные данные	
	$p_2=1 \text{ ата}$	$p_2=p_k$	кипящая вода	холодная вода
$p_1 = 2,0 \text{ ата}$	0,1090	0,23	0,78	1,15
$= 6,0 \text{ ата}$	0,1110	0,42	1,35	2,78

ности насадков на кипящей воде нельзя применять формулы адиабатного расширения. В более позднее время Далин [7], Якадин [8] также используют для подсчета пропускной способности насадков и диафрагм на кипящей воде формулы адиабатного расширения.

По формуле Далина, по которой расход равен

$$G_{кв} = \frac{1,26 \mu d^2 \sqrt{(p_1 - p_2) \frac{v_1 + v_{см}}{2}}}{v_{см}} \text{ кг/час} \quad (5)$$

результаты получаются меньшими, чем по данным указанных выше теоретических расчетов в $\sqrt{2}$ раз.

Якадин рекомендует отдельно вычислять площадь для пара и жидкости и принимать проходное сечение равным сумме указанных площадей:

$$f = f_n + f_{ж}. \quad (6)$$

Количество образовавшегося пара при этом им определяется из величины потери давления на трение $\Delta p_{тр}$, а расход жидкости — по полной разности давления $p_1 - p_2$. Получается, что за насадком в одном и том же сечении должно существовать два давления: для пара $p_n = p_1 - \Delta p_{тр} \text{ кг/см}^2$ и для жидкой части $p_{ж} = p_2 \text{ кг/см}^2$.

В действительности этого не наблюдается, что указывает на искусственность формулы. Из нее получается, что необходима дополнительная площадь для пропуска пара при истечении через диафрагму, тогда как этого не требуется.

В практике утвердились и другие методы расчета. Так, при расчете конденсатоотводчиков пользуются формулой Строганова [9], по которой определяется расход охлажденного конденсата:

$$G_k = 32 d^2 \sqrt{(p_1 - p_2)} \text{ кг/час} \quad (7)$$

По данным МЭИ [10] расход кипящей воды через диафрагмы равен 0,25 от расхода холодной воды, т. е.

$$G_{к.в.} = 0,25 G_{х.в.} = 5,65 d^2 \sqrt{(p_1 - p_2)} \text{ кг/час}, \quad (8)$$

где

$$G_{х.в.} = 22,6 d^2 \sqrt{(p_1 - p_2)} \text{ кг/час} \quad (9)$$

Опыты по истечению кипящей воды через диафрагмы не подтверждают зависимости (8). По данным опытов расход кипящей воды через диафрагмы остается почти равным расходу холодной воды [6], [11]. Визуальные наблюдения [11] при истечении кипящей воды через диафрагму показали, что через диафрагму проходит поток жидкости без пара, а процесс парообразования начинается за диафрагмой.

Имелись попытки объяснить физическую сторону процесса истечения воды метастабильным состоянием — перегревом воды. Однако из-

вестно, что для получения устойчивых состояний перегретой воды необходимо соблюдение целого ряда условий, осуществление которых трудно представить в условиях истечения кипящей воды: необходимо отсутствие пульсации, отсутствие растворенных газов и посторонних примесей в жидкости.

В действительности парообразование наблюдается не в самой диафрагме, а за ней потому, что процесс парообразования протекает с определенной скоростью и требует для своего завершения определенного отрезка времени. Данных о скорости процесса парообразования при истечении нет. В стационарных условиях скорость процесса парообразования определялась в опытах Зысиной и Кутателадзе [12]. С помощью высокоскоростной съемки выяснено, что при кипении в атмосферных условиях на возникновение, рост и отрыв одного пузырька пара в среднем требуется отрезок времени в 0,0285 секунды. Но этим процесс парообразования не завершается. После отрыва пузырьков от стенок процесс парообразования продолжается в объеме жидкости. В целом, считая и время кипения в объеме жидкости на завершение процесса парообразования, по данным опытов требуется отрезок времени в 0,02—1 секунды.

Если сопоставить отрезок времени, необходимый для парообразования, с временем нахождения частиц жидкости внутри насадка, то оказывается, что процесс истечения воды происходит в несколько раз быстрее процесса парообразования. Это приводит к тому, что при истечении через тонкие диафрагмы кипящая жидкость вытекает практически без пара. При истечении через насадки, длина которых в несколько раз больше диаметра отверстия, процесс парообразования будет тем полнее завершаться, чем длиннее насадок и чем под меньшей разностью давлений происходит истечение, т. е. чем больший отрезок времени частицы кипящей жидкости находятся внутри насадка. Следовательно, в рассмотренных теоретических работах в объяснении процесса истечения кипящей воды допускается неправильное предположение о полном развитии процесса парообразования за время пребывания частиц жидкости внутри насадка. Процесс истечения кипящей воды не может рассматриваться как обратимый процесс, каким является процесс адиабатного расширения пара, так как в процессе истечения кипящей воды в потоке наблюдается несоответствие между давлением и температурой.

II. ОПЫТНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

Опытное изучение процесса истечения кипящей воды было проведено на диафрагмах и цилиндрических насадках различной длины. В опытах определялись пропускная способность насадков на кипящей и холодной воде в зависимости от начального давления, распределение статического давления по длине насадков и проводились визуальные наблюдения за потоком.

Для проведения опытов была смонтирована специальная установка, схема которой приведена на рис. 2. Кипящая вода поступает из парового котла по трубе, конец которой опущен ниже верхнего уровня воды в котле. На верхний конец трубы навернут фланец с ввернутым в него насадком. На фланец прикреплена смотровая камера. В камере предусмотрены окна для наблюдения и кран для регулирования уровня воды. Вода из смотровой камеры стекает в мерник через нижнюю трубу — холодильный. Образовавшийся в смотровой камере пар конденсируется в верхней трубе — конденсаторе. Конденсат стекает в смотровую камеру и из нее в мерник. Из мерника вода выпускается в бак, откуда заби-

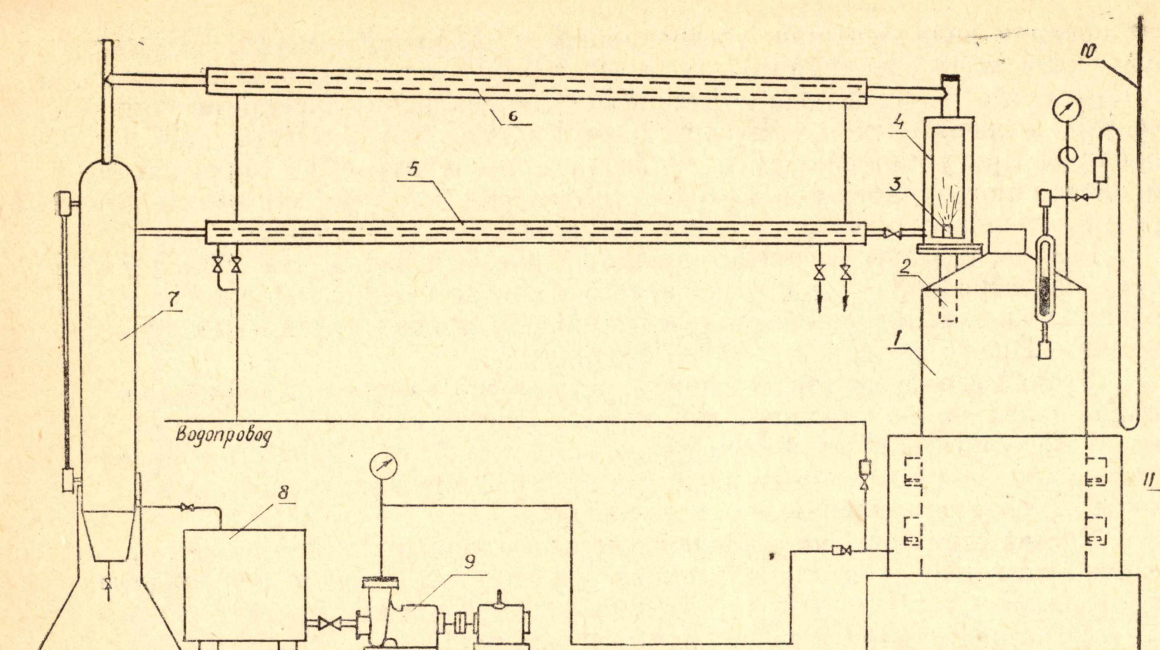


Рис. 2. Схема опытной установки:

1 — паровой котел; 2 — трубка для забора воды; 3 — испытуемый насадок; 4 — смотровая камера; 5 — труба-холодильник; 6 — труба-конденсатор; 7 — сборный сосуд; 8 — бак питательной воды; 9 — питательный насос; 10 — водяной U-ный манометр; 11 — электронагреватели.

рается на питание котла. Верхняя труба — конденсатор и мерник для поддержания внутри них атмосферного давления имеют сообщение с атмосферой. Обогрев котла осуществляется электрическим нагревателем.

Диафрагмы и цилиндрические насадки были изготовлены из латуни. Отверстия в них сверлились, после чего доводились разверткой. В насадках, в которых измерялось давление по длине насадка, были просверлены боковые отверстия. Отверстия сверлились диаметром 3,0 мм, а в месте выхода в канал — 0,5 мм. В отверстия впаивались трубочки, на которые закреплялись соединительные трубки манометров.

Измерение давления в котле от 0,02 до 0,4 ати производилось при помощи водяного манометра с ценой деления шкалы в 1 см в. ст., от 0,4 до 1,2 ати и выше — пружинным манометром с ценой деления шкалы — 0,1 ати — 1,0 ати. Давление по длине насадка измерялось при помощи U-ных ртутных манометров с ценой деления шкалы в 1,0 мм.

Измерение температуры кипения воды производилось при помощи ртутного термометра с ценой деления в 0,1° С. Измерение температуры имело целью определение установившегося режима кипения воды.

Расход определялся по времени наполнения предварительно протарированного объема мерника путем замера уровня воды по водоуказательному стеклу по шкале с ценой деления в 1,0 мм.

Суммарная ошибка при определении пропускной способности с учетом погрешностей измерений составляла $\pm 3,6\%$.

III. ОПИСАНИЕ ОПЫТОВ И ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Первая серия опытов. Задачей опытов было определение пропускной способности цилиндрических насадок на холодной и кипящей воде. Опыты ставились на лабораторном котле с давлением 1,2 ати. В опытах на холодной воде избыточное давление создавалось насосом. Отсче-

ты расхода делались при установившемся давлении: через каждые 0,04—0,05 ат до давления 0,4 ати, и через 0,1 ат — в остальных случаях. В опытах на кипящей воде давление регулировалось количеством включенных нагревателей и выпуском пара в атмосферу. Отсчеты расхода делались при установившемся давлении и температуре. Питание котла производилось подогретой водой периодически, мелкими порциями. Во время отдельных опытов делались визуальные наблюдения.

Результаты опытов представлены на рис. 3 и рис. 4. На последнем даны фотографии потока после насадка при истечении холодной и кипящей воды. Фотографирование сделано при просвечивании смотровой камеры. Время выдержки — 0,005 секунды.

Вторая серия опытов. Задачей опытов было измерение давления по длине насадков, но одновременно определялась и их пропускная способность. Результаты опытов представлены на рис. 5, где приведены значения пропускной способности насадков и на рис. 6, где приведены результаты измерения давления по длине насадка.

Третья серия опытов. Задачей опытов было определение пропускной способности насадков при давлениях в котле от 1,0 до 8,0 ати. Опыты проводились на котле Шухова-Берлина в котельной института, куда была перенесена измерительная часть опытной установки. Результаты опытов представлены на рис. 7. Данные о пропускной способности цилиндрических насадков на холодной воде для этой серии опытов подсчитывались по формуле истечения холодной воды:

$$G_{х.в} = f \cdot \mu \cdot \gamma_{к.в} \sqrt{2g(p_1 - p_2)} v_{х.в} \quad \text{кг/сек} \quad (10)$$

Величина коэффициента расхода взята по данным [13].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТОВ

1. ОБЩИЕ СООБРАЖЕНИЯ О ФИЗИЧЕСКОЙ КАРТИНЕ ПОТОКА

Из наблюдений и фотографирования потока видно внешнее отличие процесса истечения кипящей воды от истечения холодной воды. Так, при истечении холодной воды из насадка вытекает гладкая, прозрачная струя (рис. 4, а), а при истечении кипящей воды струя покрывается матовым налетом и часто разрывается возникающими на ее поверхности паровыми пузырьками.

В случае истечения в затопленное пространство струя холодной воды размывается и теряется, вызывая лишь вихревое движение воды (рис. 4, б); при истечении кипящей воды возникает отчетливо видимая струйка пара (рис. 4, г); под большой разностью давления струя пара сразу же после насадка расширяется, образуя сплошной столб пара (рис. 4, д, е). Отличается процесс истечения кипящей воды от процесса истечения холодной воды и по картине распределения давлений. При истечении холодной воды во входном сечении происходит почти полное падение давления до противодавления, а при истечении кипящей воды давление по длине насадка несколько снижается и окончательно падает до противодавления в выходном сечении (рис. 6, а, б, в, г, д, е). Как известно, подобная картина изменения давления по длине насадка наблюдается при истечении холодной воды через трубопровод с диафрагмой или неполностью открытым вентилем в выходном сечении [14]. Из этого следует, что при истечении кипящей воды через цилиндрические насадки проходное сечение для жидкостной части потока уменьшается, что происходит вследствие образования пара внутри насадка. Картина изменения давления по длине насадка, таким образом, позволяет опреде-

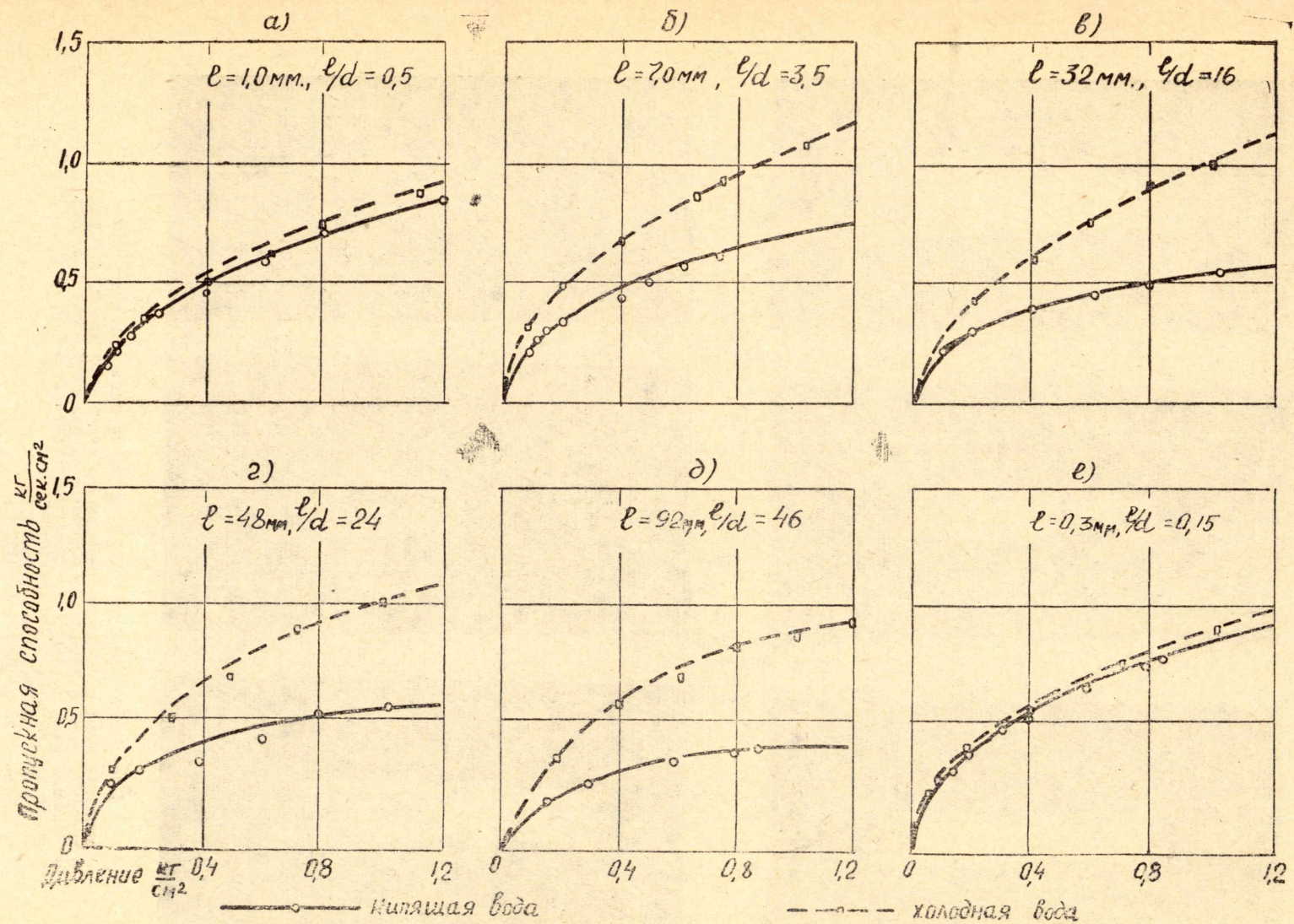


Рис. 3. Зависимость пропускной способности цилиндрических насадков различной длины от разности давлений по данным опытов.

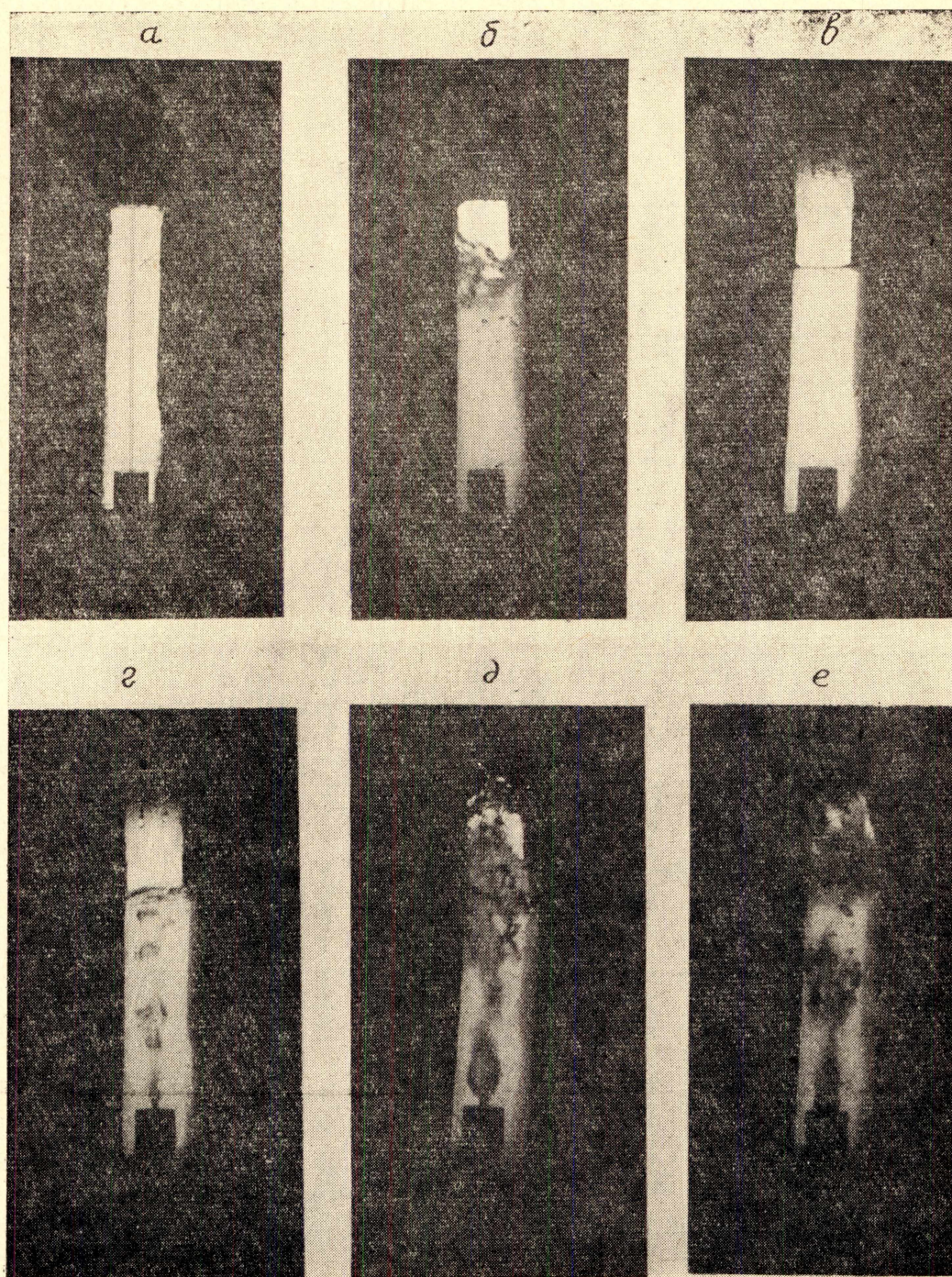


Рис. 4. Фотографии потока после насадка при истечении:

- а) холодной воды в свободное пространство при $p_1=0,05 \text{ кг/см}^2$, $t_B=22^\circ\text{C}$.
- б) холодной воды в затопленное пространство при $p_1=0,5 \text{ кг/см}^2$, $t_B=22^\circ\text{C}$.
- в) кипящей воды в затопленное пространство при $p_1=0,05 \text{ кг/см}^2$, $t_B=100,8^\circ\text{C}$.
- г) то же при $p_1=0,116 \text{ кг/см}^2$, $t_B=102,8^\circ\text{C}$.
- д) то же при $p_1=0,38 \text{ кг/см}^2$, $t_B=109^\circ\text{C}$.
- е) то же при $p_1=0,7 \text{ кг/см}^2$, $t_B=115,3^\circ\text{C}$.

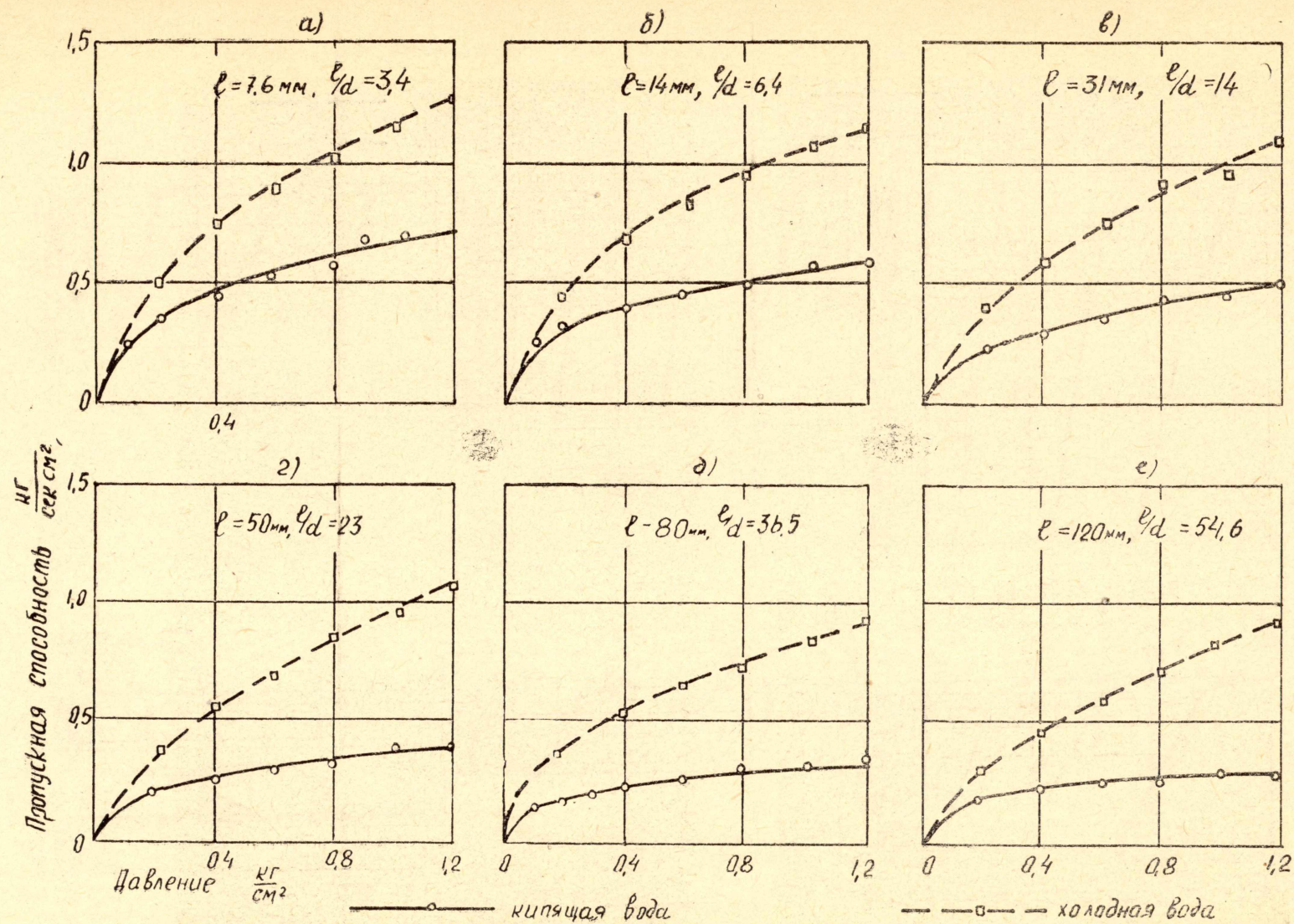


Рис. 5. Зависимость пропускной способности цилиндрических насадков различной длины от разности давлений по данным опытов.

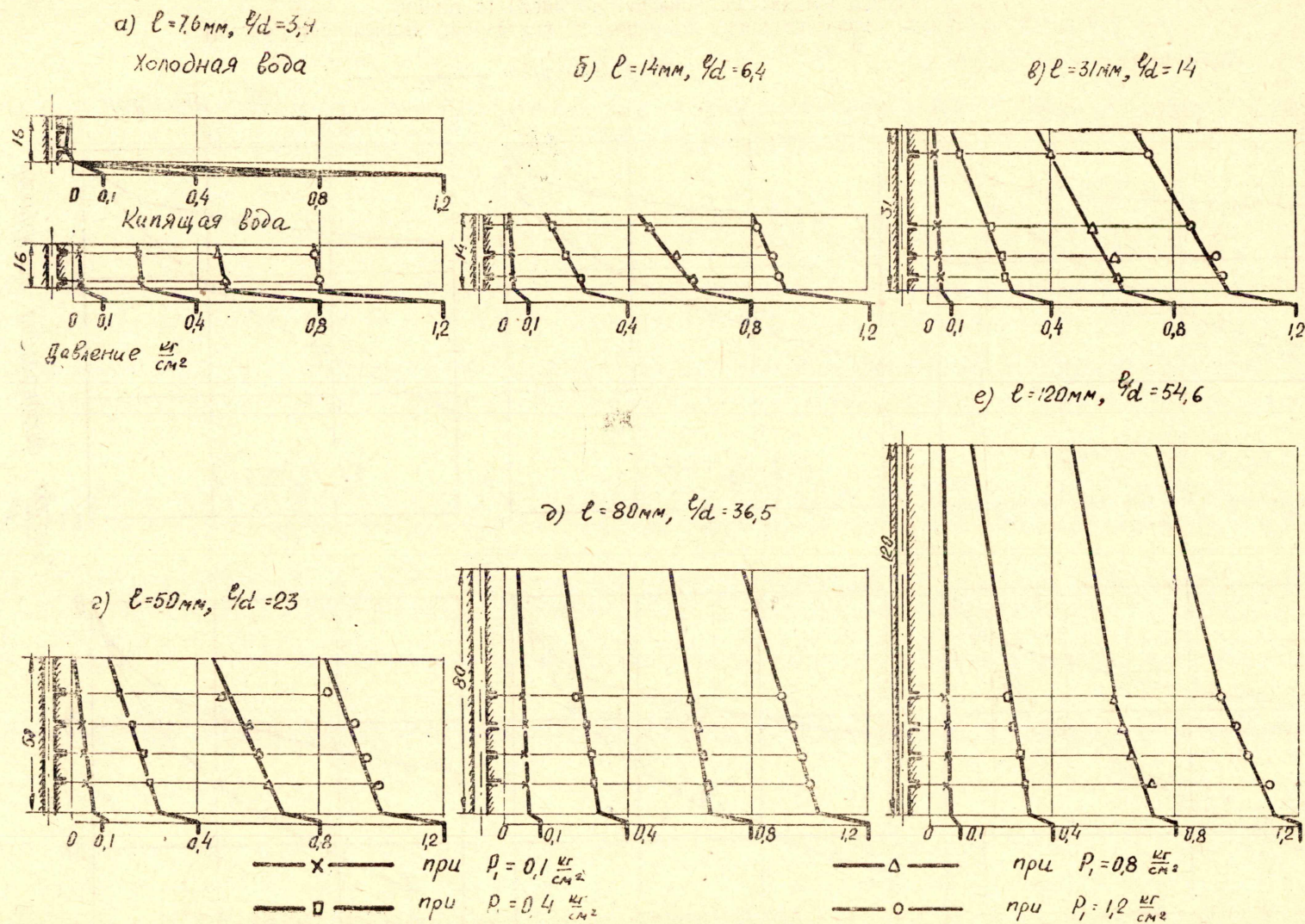


Рис. 6. Изменение давления по длине насадка при истечении холодной и кипящей воды по данным опытов.

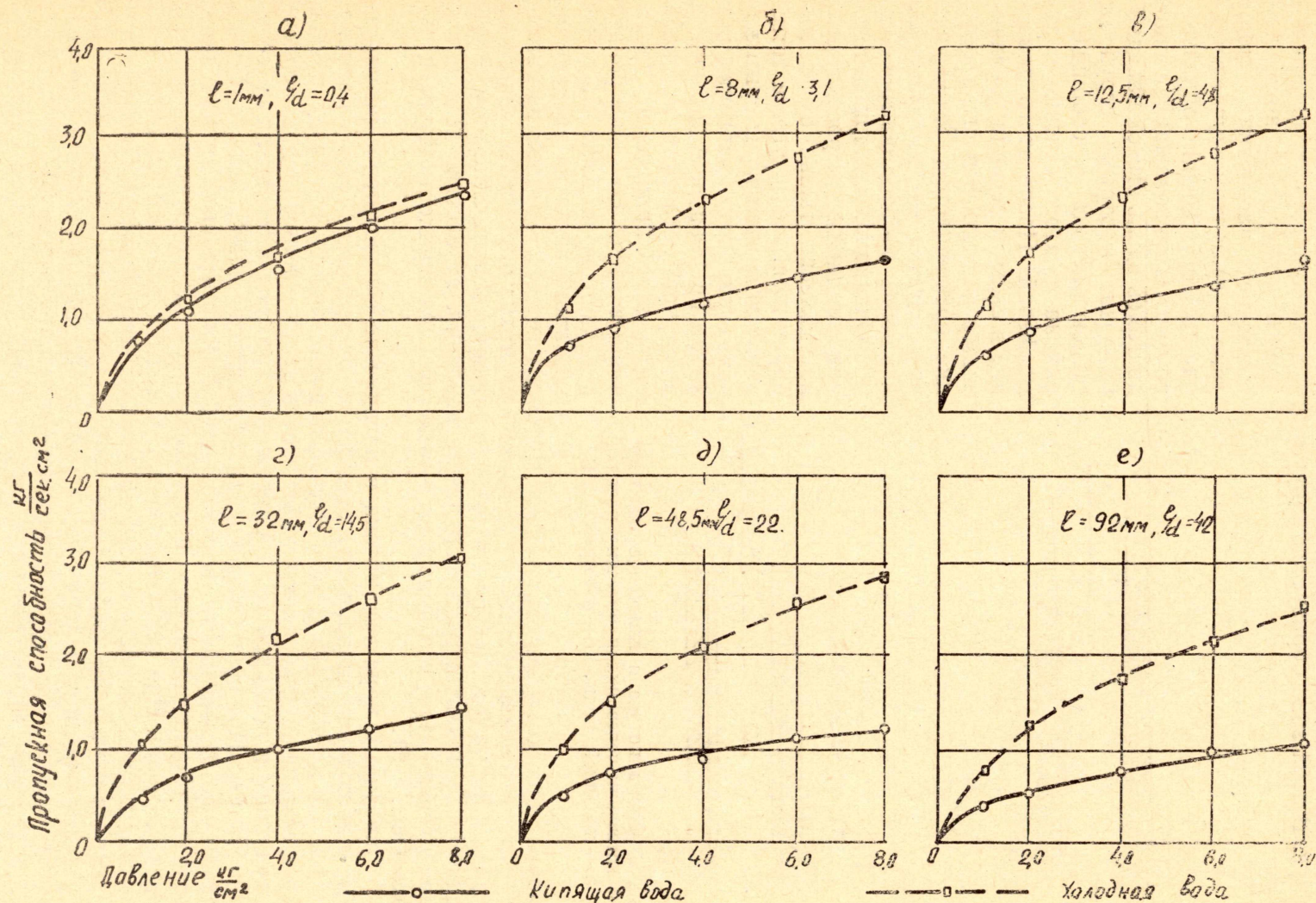


Рис. 7. Зависимость пропускной способности цилиндрических насадков различной длины от разности давлений по данным опытов.

лить долю сечения, занятую паром, а, следовательно, и судить о протекании процесса парообразования.

При истечении холодной воды во входном сечении происходит сжатие потока. Затем постепенно струя расширяется и вытекает полным сечением. В образовавшейся полости сжатого сечения воздух увлекается потоком струи. В этой зоне образуется вакууметрическое давление, величина ко-

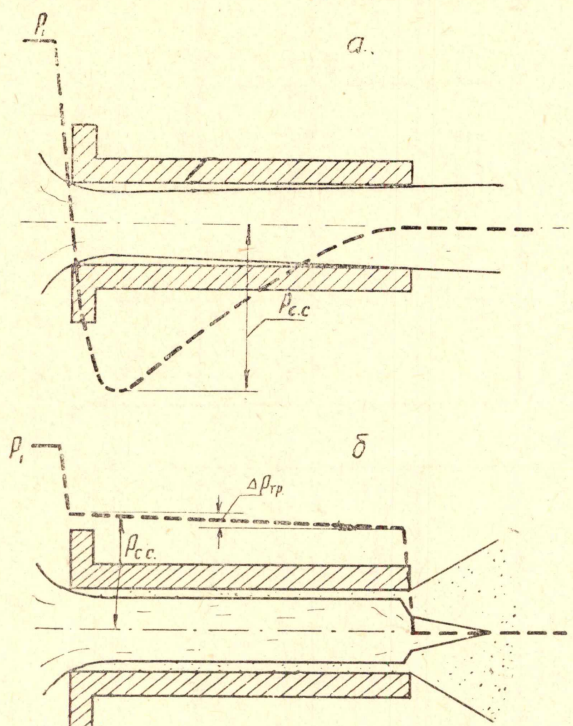


Рис. 8. Форма потока и изменение давления при истечении через цилиндрические насадки: а — холодной воды, б — кипящей воды.

торого может быть ниже, чем давление насыщения воды (рис. 8, а). В этом случае в районе сжатого сечения образуется пар. Образовавшийся пар, двигаясь вдоль стенок насадка, приводит к отрыву струи от стенок насадка и сообщению района сжатого сечения с атмосферой. После этого давление в сжатом сечении увеличивается до атмосферного и кипение прекращается. Затем снова создается вакууметрическое давление, процесс повторяется.

Очевидно, что при истечении кипящей воды рассмотренное явление также будет наблюдаться. Но в случае истечения холодной воды срыв вакууметрического давления вызывал прекращение кипения, а в случае истечения кипящей воды этот процесс не будет прерываться. На внутренней поверхности насадка постоянно зарождаются и растут пу-

зырьки пара, которые, отрываясь, выносятся вместе с потоком из насадка. При интенсивном парообразовании они могут образовать сплошное кольцо парожидкостной смеси, которое движется вместе с потоком. В выходном сечении происходит снижение давления, вследствие чего поток пара расширяется, что вызывает сжатие сечения жидкостной части потока (рис. 8, б).

Описанный характер потока в насадке не согласуется с результатами наблюдения за парообразованием в кипятильных трубах паровых котлов. По данным [15] в этом случае паровые пузырьки, образующиеся на вертикальной поверхности, отрываются от нее в направлении, перпендикулярном к поверхности, и, описав дугу, поднимаются вверх по середине трубы. Причина расхождения становится ясной, если сравнить траектории пузырьков в обоих случаях. В кипятильных трубах поле скорости установившееся, т. е. неравномерное. У стенок труб скорость близка к нулю. При истечении кипящей воды через насадки поток еще не установился, скорости по сечению примерно одинаковы. Паровые пузырьки движутся по прямой, почти параллельно оси потока (рис. 9). Следовательно, при наличии неустановившегося поля скорости (последнее наблюдается во входном участке насадка на длине 50—60 диаметров отверстия) может возникать поток в виде жидкостного ядра, окруженного паром.

В насадках с длиной, большей длины участка стабилизации, указанный тип потока не сохранится. Неравномерное поле скорости вызовет

турбулизацию потока, вследствие чего возникнет эмульсионный тип потока, при котором пар и жидкость перемешаны друг с другом и находятся почти в термодинамическом равновесном состоянии.

В свете высказанного уместно разобрать результаты опытных данных о замере температур по длине сопла, проведенных Адамом [6]. Эти замеры дали «противоречивые» результаты. Оказалось, что при истечении кипящей воды из коротких сопел был обнаружен перегрев жидкости на 15—40° С, а в опытах на длинных соплах наблюдались явления термодинамического соответствия. В нашем освещении результаты этих опытов вполне закономерны. При истечении из коротких сопел парообразование не успеет развиться и вода будет вытекать перегретой. В длинных соплах возможно завершение парообразования и наличие термодинамического соответствия.

2. ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ ДИАФРАГМ И НАСАДКОВ НА КИПЯЩЕЙ ВОДЕ

Пропускная способность диафрагм на кипящей воде, как показывают опыты, несколько уменьшается по сравнению с их пропускной способностью на холодной воде, что объясняется уменьшением величины удельного веса в кипящей воде.

Пропускная способность диафрагм на холодной воде равняется:

$$G_{х.в} = f \cdot \mu \cdot \gamma_{х.в} \sqrt{2g(p_1 - p_2) v_{х.в}} \text{ кг/сек.} \quad (10)$$

Для случая истечения кипящей воды:

$$G_{к.в} = f \cdot \mu \cdot \gamma_{к.в} \sqrt{2g(p_1 - p_2) v_{к.в}} \text{ кг/сек.} \quad (11)$$

Из (10) и (11) получаем

$$\frac{G_{к.в}}{G_{х.в}} = \left(\frac{\gamma_{к.в}}{\gamma_{х.в}} \right)^{1/2} \quad (12)$$

Так как $\gamma_{к.в} < \gamma_{х.в}$, то и $G_{к.в} < G_{х.в}$,

По результатам опытов указанная зависимость подтверждается. Следовательно, пропускную способность диафрагм на кипящей воде можно определить по формуле истечения холодной воды, если в нее подставить значения удельного веса кипящей воды.

Выше указывалось, что по данным [10] пропускная способность диа-

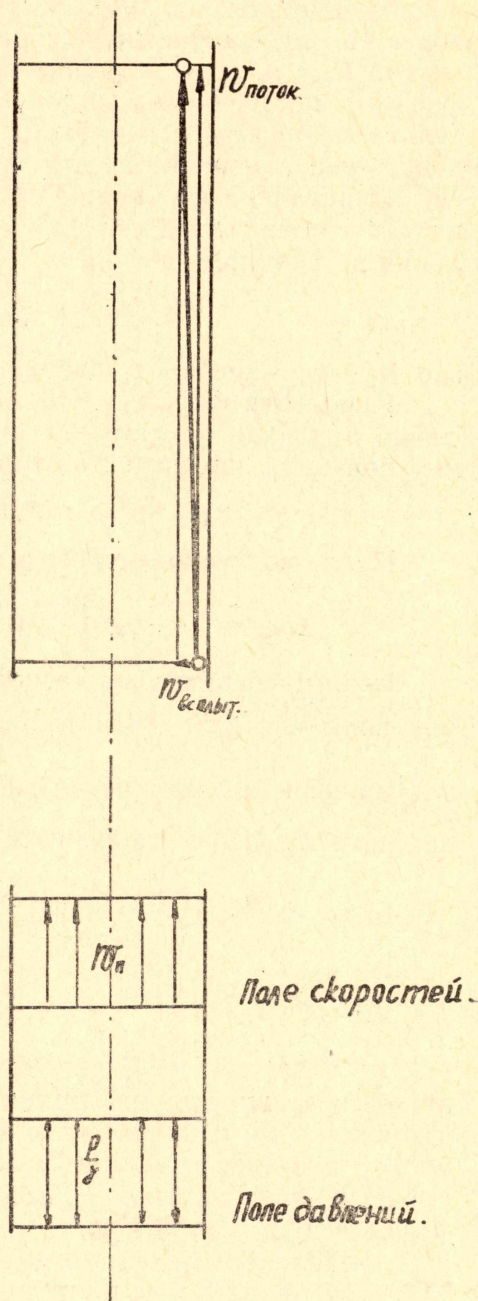


Рис. 9. Траектория движения парового пузырька внутри при истечении кипящей воды.

фрагм на кипящей воде равна 0,25 от пропускной способности на холодной воде. Такие результаты могли быть получены лишь при противодействии за диафрагмой.

При истечении кипящей воды через цилиндрические насадки, как показали опыты, их пропускная способность меньше, чем на холодной воде. Нами был произведен расчет пропускной способности цилиндрических насадков по величине падения давления на входе в насадок по формуле истечения холодной воды. Расчет показывает совпадение результатов расчета с опытными данными. Последнее позволяет рекомендовать указанный метод для расчета пропускной способности цилиндрических насадков на кипящей воде. Для этого следует в формулу (10) вместо полной разности давлений подставить величину падения давления во входном сечении, т. е. записать ее в виде:

$$G_{к.в} = f \cdot \mu \cdot \gamma_{к.в} \sqrt{2g(p_1 - p_{cc})} v_{к.в} \text{ кг/сек}, \quad (13)$$

где $p_1 - p_{cc}$ — разность давлений во входной части насадка.

Используя формулу (13), были произведены расчеты величины падения давления по результатам третьей серии опытов. Полученные данные показали зависимость величины $p_1 - p_{cc}$ от длины насадка в виде:

$$p_1 - p_{cc} = (p_1 - p_2) [0,71 - \log(l/d)^{1/3}] \text{ кг/см}^2 \quad (14)$$

После подстановки (14) в (13) получим:

$$G_{к.в} = f \cdot \mu \cdot \gamma_{к.в} \sqrt{2g(p_1 - p_2) [0,71 - \log(l/d)^{1/3}]} \cdot \gamma_{к.в} \text{ кг/сек} \quad (15)$$

Если пренебречь величиной изменения удельного веса при нагревании воды и считать, что $\gamma_{к.в} = \frac{1}{\gamma_{к.в}} = 1000 \text{ кг/м}^3$, то, принимая постоянное значение коэффициента расхода $\mu = 0,62$ и заменив f на $\frac{\pi d^2}{4}$, получаем формулу (15) в следующем виде

$$G_{к.в} = 24 d^2 \sqrt{(p_1 - p_2) [0,71 - \log(l/d)^{1/3}]} \text{ кг/час.} \quad (16)$$

В ы в о д ы

1. Получены: а) Опытные данные о пропускной способности на кипящей воде диафрагм и цилиндрических насадков диаметром 2—2,6 мм, длиной 1—120 мм. б) Опытные данные об изменении давления по длине цилиндрических насадков диаметром 2—2,6 мм длиной 8—120 мм.

2. Проведены визуальные наблюдения и фотографирование процесса истечения кипящей воды.

3. Получены расчетные методы для определения пропускной способности диафрагм и цилиндрических насадков диаметром 2,0—2,6 мм и длиной 1—120 мм при разности давлений 0,02—8,0 ати.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zeuner — Technische Thermodynamik, Bd. II, 1890, Bd. I, 1901.
2. Rateau — Note sur l'écoulement de l'eau chaude par les tuyeres, Annales des mines, Tome I, 1902.
3. Lorenz H. — Lehrbuch der technischen Physik, Bd. II, 1904.
4. Fliegner A. — Schweizerische Bauzeitung, Bd. XLV, Nr. 23, 25, 1905.
5. Sauvage M. — Annales des mines, 1892, p. 192—202.

6. Adam I.— Mitt. Forschungsarbeiten, VDI, № 35, 36, 1906.
 7. Далин А. М.— Сбор и возврат конденсата, ГЭИ, 1949.
 8. Якадин А. И.— Конденсатное хозяйство промышленных предприятий, ГЭИ, 1952.
 9. Строганов И. Г.— Конденсационные горшки, Известия ВТИ, № 1, 1927.
 10. Лебедев П. Д., Щукин А. А.— Фабрично-заводская теплотехника, ГЭИ, 1948.
 11. Benjamin M. W. and Miller I. F.— A. S. M. E., Vol 63, No, 5, 1941.
 12. Кутателадзе С. С.— Теплопередача при конденсации и кипении, Машгиз, 1952.
 13. Евреинов В. П.,— Гидравлика, ОНТИ, НКТП, 1934.
 14. Отт А. А.— Гидравлика, ОНТИ, НКТП, 1937.
 15. Рачко В. А.— «Исследование теплоотдачи к воде, кипящей внутри вертикальной трубки», ЖТФ, том XI, вып. 13—14, 1941.
-