

### К РАСЧЕТУ ПАРАМЕТРОВ В ПОТОКЕ ПРИ ИСТЕЧЕНИИ КИПЯЩЕЙ ВОДЫ

А. А. ГУРЧЕНОК

(Представлено проф. докт. техн. наук Г. И. Фуксом)

При расчете параметров и расхода при истечении кипящей воды обычно исходят из предположения, что расширение происходит адиабатно [1] (рис. 1). Отсюда получают следующие расчетные зависимости:

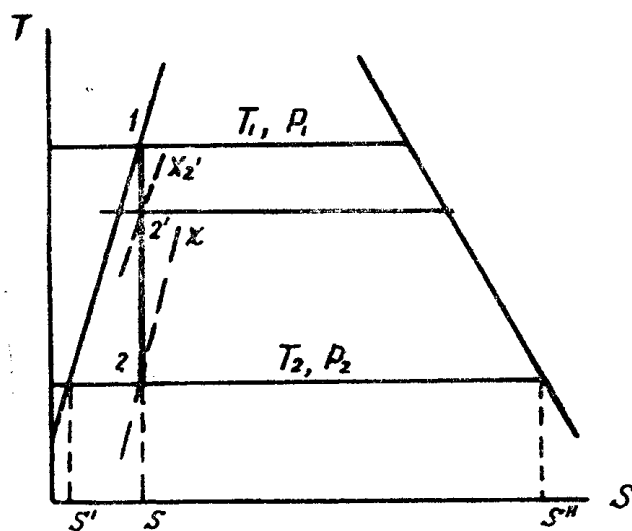


Рис. 1. 1—2 линия адиабатного расширения кипящей воды.

паросодержание в конце расширения:

$$x = \frac{s - s'}{s'' - s'} \text{ кг/кг}; \quad (1)$$

скорость истечения:

$$c = 91,5 \sqrt{i_1 - i_2} \text{ м/сек}; \quad (2)$$

удельный объем в конце расширения:

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

$$\text{расход} \quad g = \frac{c}{v \cdot 10^4} \quad \text{кг/см}^2\text{сек.} \quad (4)$$

Исследование процесса истечения кипящей воды через диафрагмы и насадки показало, что значения расхода оказываются в несколько раз большими, чем определенные по соотношениям (1, 2, 3, 4) [2]. Такое расхождение результатов, как показано в [3], может быть объяснено неполным завершением процесса парообразования, вследствие слишком короткого отрезка времени пребывания частиц жидкости внутри насадка. При этом нарушается связь между основными параметрами в потоке пароводяной смеси и их значения не соответствуют состояниям, которые проходит поток при равновесном адиабатном расширении по линии 1—2, рис. 1.

В работе показана возможность определения расхода при истечении кипящей воды с использованием указанных соотношений (1, 2, 3, 4) по  $T-S$  или  $P-V$  диаграмме при условии заданной величины степени завершения процесса парообразования.

### Теоретическое определение расхода кипящей воды

На рис. 2 приведена картина изменения давления внутри насадка при истечении кипящей воды [2]. Снижение давления сразу же во входном сечении приводит к тому, что поток кипящей воды становится перегретым. Величина перегрева при этом определяется разностью температуры насыщения  $t_{s_1}$  при начальном давлении  $P_1$  и температурой насыщения  $t_{s_2}$ , соответствующей установившемуся давлению  $P_2$ . Для сохранения перегретого состояния жидкости, как известно, требуются особые условия: наличие идеально чистой жидкости, в которой отсутствуют центры парообразования, спокойное состояние жидкости. Поэтому при истечении кипящей воды внутри насадка сразу же возникает процесс образования паровой фазы.

Вследствие малого отрезка времени процесс парообразования не успевает полностью завершиться внутри насадка и в потоке на выходе из насадка его температура  $t$  оказывается выше, чем температура насыщения  $t_{s_2}$  при установившемся давлении  $P_2$ .

Отношение

$$\xi = \frac{t_{s_1} - t}{t_{s_1} - t_{s_2}} \quad (5)$$

характеризует степень завершения процесса парообразования. Если парообразования нет, то

$$t = t_{s_1}, \quad \text{откуда} \quad \xi = 0,$$

если процесс завершен, то

$$t = t_{s_2}, \quad \text{откуда} \quad \xi = 1.$$

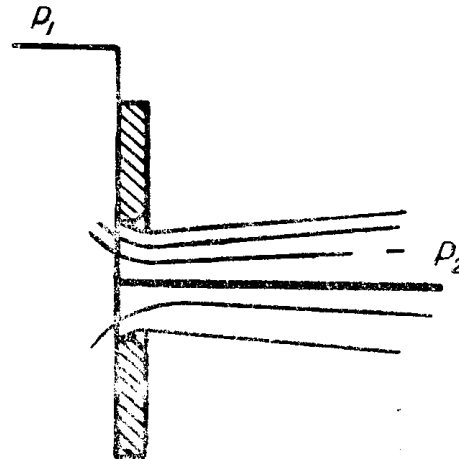


Рис. 2. Картина снижения давления при истечении через диафрагму:  $P_1$  — начальное давление,  $P_2$  — противодавление.

Изображая состояние при незавершенном процессе парообразования точкой 2' (рис. 1), получим

$$x_{2'} = \frac{s_1 - s_2'}{s_2' - s_2'} \cdot \kappa_2 / \kappa_2. \quad (6)$$

Очевидно, что  $x_{2'} < x$  из (1), так как

$$t_{s_1} - t < t_{s_1} - t_{s_2}.$$

Образующийся пар в потоке находится в виде отдельных пузырьков, движущихся вместе с потоком. Вследствие наличия поверхностного натяжения на линии раздела фаз возникают дополнительные силы, создающие внутри паровых пузырьков повышенное по сравнению с окружающей средой давление. По данным [4], величина разности давлений внутри пузырьков пара  $p$  и давления среды  $p_2$  определяется из формулы

$$p - p_2 = \Delta t \left( \frac{\partial p}{\partial t} \right)_s. \quad (7)$$

Здесь  $\Delta t$  — перегрев жидкости, °С;

$\left( \frac{\partial p}{\partial t} \right)_s$  — производная давления по температуре на линии насыщения,

равная

$$\left( \frac{\partial p}{\partial t} \right)_s = \frac{r \cdot \gamma' \cdot \gamma''}{A T_s (\gamma' - \gamma'')}. \quad (8)$$

где  $r$  — теплота парообразования, ккал/кг,

$\gamma'$ ,  $\gamma''$  — соответственно удельный вес жидкости, пара, кг/м<sup>3</sup>,

$A$  — тепловой эквивалент работы, ккал/кгм,

$T_s$  — температура насыщения, °К.

С учетом (7) уравнение (3) для определения величины удельного объема для случая состояния 2' запишется в виде

$$v_{2'g} = v'_{p_2} + x_{2'} (v''_p - v'_{p_2}) \cdot \text{м}^3/\text{кг}. \quad (9)$$

Здесь  $v'_{p_2}$  — удельный объем кипящей воды при давлении  $p_2$ .

$v''_p$  — удельный объем пара при давлении  $p$ .

Из (9) видно, что величина удельного объема, определяемая с учетом дополнительного давления внутри пузырьков пара меньше, чем при определении из (3) для равновесного адиабатного расширения. В зависимости от степени завершения процесса парообразования значение величины  $v_{2'g}$  изменяется от  $v'_1$  при  $\xi = 0$  до  $v_2$  при  $\xi = 1$ .

Процесс расширения, построенный по значениям действительной величины удельного объема с учетом дополнительного давления внутри пузырьков пара, изобразится линией 1—2g, проходящей левее линии адиабатного расширения (рис. 3). При  $\xi = 0$  линия расширения совпадает с левой пограничной кривой, при  $\xi = 1$  — с линией адиабатного расширения. Положение точки 2g находится по двум параметрам: величине удельного объема  $v_{2'g}$  и давлению в конце расширения  $p_2$ .

По изображению процесса действительного расширения 1—2g на  $T-S$  диаграмме можно определить величину приращения кинетической энергии в потоке (площадка 12g3 (рис. 3) равна в масштабе указанной величине). Нужно заметить, что при изображении линии

действительного расширения на  $T-S$  диаграмме допускается условность: состояние потока в конце расширения (точка  $2g$ ) характеризуется по давлению  $p_2$  и по величине сухости пара  $x_{2'}$ , тогда как значение температуры в потоке выше и равно  $T > T_2$ . Состояние потока в точке  $2g$  неустойчивое и по мере завершения процесса парообразования происходит переход в состояние, правее точки  $2$ , а теоретически, без учета потерь, в точку  $2$ .

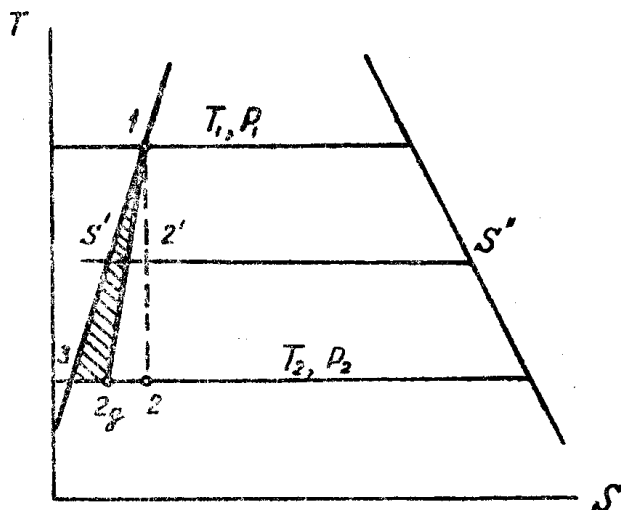


Рис. 3. 1— $2g$ —линия расширения кипящей воды с неполной степенью завершения процесса парообразования.

Аналогично процесс истечения кипящей воды с учетом неполного завершения процесса парообразования может быть построен в  $P-V$  диаграмме. Для этого нужно предварительно построить  $P-V$  диаграмму состояний кипящей воды и области влажного пара, на которой нанести линию адиабатного расширения кипящей воды (1—2, рис. 4).

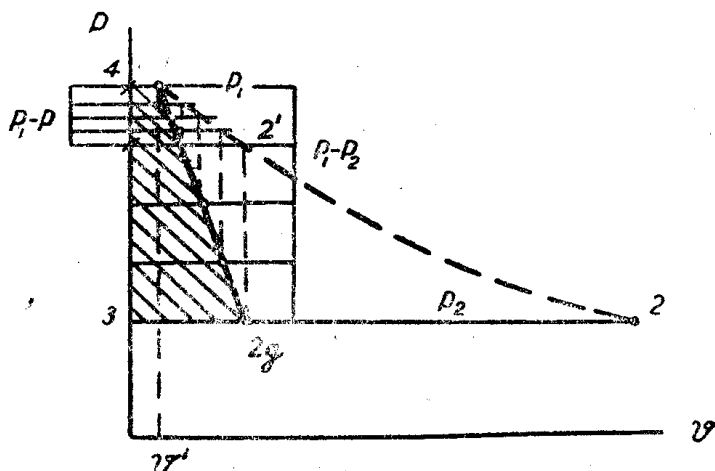


Рис. 4. 1—2 адиабатное расширение. 1— $2g$ —линия действительного расширения потока кипящей воды.

Линия действительного расширения 1— $2g$  строится в зависимости от заданной степени завершения процесса парообразования, по которой

определяется величина удельного объема в конце расширения (точка 2g). Для определения положения промежуточных точек на линии 1—2g делят отрезки  $p_1 - p$  и  $p_1 - p_2$  на равные части. Полученные промежуточные точки на линии 1—2' сносят до пересечения с соответствующей точкой на участке  $p_1 - p_2$ . При этом исходят из предположения, что линия расширения 1—2g должна представлять пропорционально увеличенный участок 1—2' на линии адиабатного расширения (точка 2' соответствует давлению насыщения при температуре  $t$  потока).

Проектируя точки 1 и 2g на ось давления, получим фигуру 12g3/4. площадь которой представляет в масштабе величину приращения кинетической энергии в процессе истечения. Аналитически эта зависимость запишется в виде

$$-\int_{p_1}^{p_2} v dp = \frac{c^2 - c_H^2}{2g} \quad (10)$$

В рассматриваемом случае величина скорости подхода  $c_H$  мала и поэтому выражение (10) может быть записано в виде

$$\frac{c^2}{2g} = \int_{p_1}^{p_2} v dp, \quad (10a)$$

откуда

$$c = \sqrt{2g \int_{p_1}^{p_2} v dp} \text{ м/сек} \quad (11)$$

Уравнение (11) может быть решено: а) путем численного определения величины интеграла через сумму вида

$$\int_{p_1}^{p_2} v dp = \sum_{i=1}^n v_i \Delta p_i, \quad (12)$$

где  $v_i$  — среднее значение объема на  $i$ -м участке,

$\Delta p_i$  — интервал изменения давления там же;

б) путем планиметрирования площади 12g3/4 в силу условия

$$-\int_{p_1}^{p_2} v dp = M_f \cdot S_{12g3/4}, \quad (13)$$

где  $M_f$  — масштаб площади,  $кгм/см^2$ ,

$S$  — площадь,  $см^2$ .

Тогда из (11) и (13) получим

$$c = \sqrt{2g M_f S_{12g3/4}} \text{ м сек.} \quad (14)$$

В табл. 1 приведены значения скорости и расхода, полученные по указанному методу (пример расчета дан в приложении). Задача решалась путем построения линий действительного расширения в  $P$ — $V$  диаграмме и планиметрированием площади для каждого заданного

Определение расхода при истечении кипящей воды с начальным давлением  $p_1 = 2 \text{ ата}$  в район с противодействием  $p_2 = 1 \text{ ата}$

Степень завершения парообразования $\xi\%$	0,0	7,8	16,8	33,5	53	75	100
Давление насыщения потока, $p_s \text{ ата}$	2,0	1,9	1,8	1,6	1,4	1,2	1,0
Степень перегрева потока $\Delta t \text{ }^\circ\text{C}$	20,5	18,9	17,24	13,64	9,65	5,16	0
Паросодержание, $x \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$	0,0	0,00313	0,00627	0,0129	0,0203	0,0224	0,0373
Давление внутри паровых пузырьков, $p \text{ ата}$	0	1,68	1,61	1,49	1,35	1,19	1,0
Удельный объем потока $v \text{ м}^3/\text{кг}$	0,001	0,004	0,008	0,0145	0,028	0,044	0,065
$S_{12g34}, \text{ см}^2$	11,7	39	60	100	163	253	370
$Mf \cdot S_{12g34}, \text{ кгм}$	10,0	33,6	52	82	140	218	310
Скорость потока, $\text{см}/\text{сек}$	13,6	25	31	43	51	63,5	77
Расход, $g \frac{\text{кг}}{\text{см}^2 \text{сек}}$	1,36	0,625	0,39	0,26	0,18	0,145	0,118

значения степени завершения процесса парообразования (начальные параметры кипящей воды заданы из условий возможности проведения опытного исследования). Из табл. 1 видно, что с увеличением степени завершения процесса парообразования расход кипящей воды уменьшается. Максимальный расход получается при истечении без парообразования ( $\xi = 0,0\%$ ), минимальный—в случае равновесного адиабатного расширения ( $\xi = 100\%$ ).

#### Опытное определение расхода и обсуждение результатов

Опытное определение расхода кипящей воды было проведено на цилиндрических насадках различной длины. Так как с длиной насадки связано время нахождения частиц жидкости внутри него, а следовательно, и степень завершения процесса парообразования при одних и тех же условиях истечения, то полученные результаты будут отражать указанную зависимость.

Для проведения опытов использовалась лабораторная установка, описанная в [2]. Была исследована серия цилиндрических насадок длиной а)—0,5 мм, б)—8,0 мм, в)—92 мм, г)—250 мм, д)—500 мм, е)—1500 мм. Начальное давление изменялось в интервале 0,1—1,2 ата. Истечение происходило в район с атмосферным противодействием. Опыты ставились на холодной и кипящей воде.

Результаты опытов представлены на рис. 5 на фиг. а, б, в, г, д, е. Из рис. 5 видно, что при одних и тех же начальных условиях расход кипящей воды тем меньше, чем длиннее насадок. Обобщенные

результаты опытов при  $p_1 = 2 \text{ атм}$  представлены кривой 1 на рис. 6. Там же построена кривая 2 — зависимости расхода от степени завершения процесса парообразования по данным табл. 1. Из рис. 6 видно, что картина изменения расхода как на опытной кривой, так и на теоретически определенной оказывается идентичной.

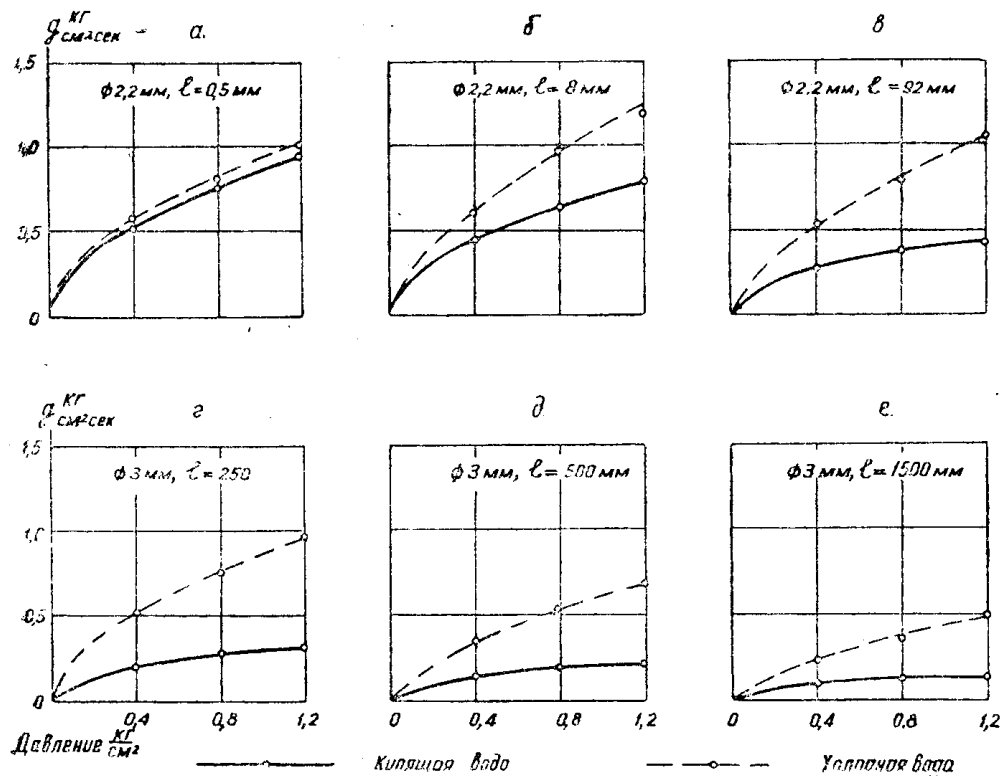


Рис. 5. Зависимость расхода от разности давлений при истечении кипящей и холодной воды через цилиндрические насадки различной длины по данным опытов.

Из сопоставления кривых устанавливается зависимость степени завершения процесса парообразования от длины насадков, а следовательно, от времени пребывания частиц жидкости в них в процессе истечения. Так, в опыте с насадкой длиной 1500 мм расход равен теоретически определенному расходу при полностью завершеном процессе парообразования. Допуская указанную аналогию, можно определить отрезок времени, при котором при указанных условиях полностью завершается процесс парообразования. В данных табл. 1 величина выходной скорости равна в этом случае 77 м/сек. Согласно закону сплошности потока расход одинаков в любом сечении насадка. Поэтому для входного и выходного сечения можно записать:

$$g = \frac{c_{вх}}{v' \cdot 10^4} = \frac{c_{вых}}{v \cdot 10^4} \quad (15)$$

Решая (15), получим

$$c_{вх} = 1,2 \text{ м.сек.}$$

Путь, равный длине насадка при равноускоренном движении, поток будет проходить за отрезок времени, равный

$$\tau = \frac{e}{c_{вх} + 0,5(c_{вых} - c_{вх})}; \quad \tau = 0,04 \text{ сек.}$$

Данных о времени протекания процесса парообразования в условиях истечения нет. Однако имеются данные по скоростной съемке роста паровых пузырьков при кипении в атмосферных условиях, согласно которым рост паровых пузырьков завершается через 0,0295—1,0 сек [5]. Совпадение результатов является некоторой проверкой предложенного метода определения термодинамических параметров в процессе истечения кипящей воды.

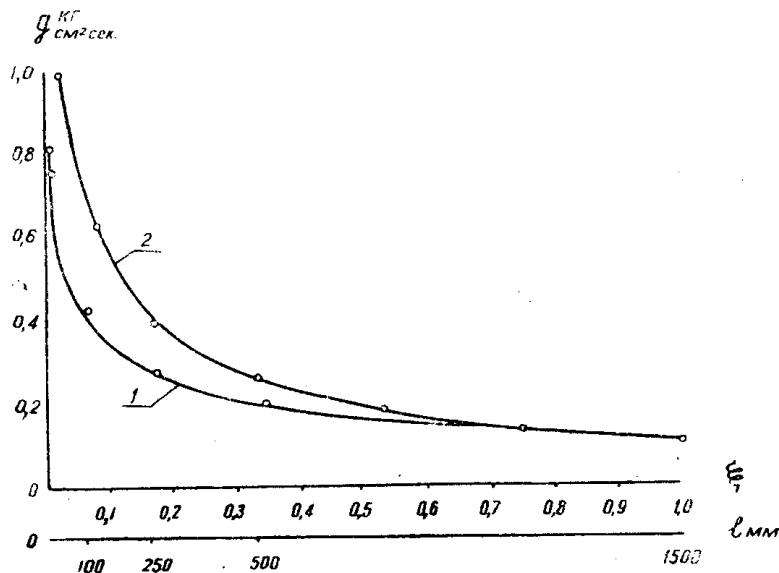


Рис. 6. 1 - опыт, 2 - теоретический расчет.

### Приложение

Пример. Истечение кипящей воды происходит при начальном давлении  $p_1 = 2 \text{ ата}$  в район с атмосферным давлением  $p_2 = 1 \text{ ата}$  со степенью завершения процесса парообразования  $\xi = 16,8\%$ . Определить параметры потока в конце расширения и расход.

Решение. Из таблиц термодинамических свойств воды и пара находим, что температуры насыщения равны: при  $p_1 - t_{s_1} = 119,62^\circ\text{C}$ ,  $p_2 - t_{s_2} = 100^\circ\text{C}$ . Тогда из (5)

$$0,168 = \frac{119,62 - t}{119,62 - 100}$$

получим  $t = 116,33^\circ\text{C}$ ,

что соответствует давлению насыщения  $P_s = 1,8 \text{ ата}$ . Указанное термодинамическое состояние обозначено точкой 2', лежащей на линии адиабатного расширения (рис. 1).

Определяем величину сухости пара в точке 2'

$$x_{2'} = \frac{s_1 - s_{2'}}{s_{2''} - s_{2'}}.$$

После подстановки численных значений получим

$$x_{2'} = \frac{0,3539 - 0,3554}{1,7123 - 0,3554} = 0,00627 \text{ кг/кг}.$$

Образовавшийся пар находится в объеме жидкости в виде паровых пузырьков. Внутри пузырьков пара будет повышенное давление, величина которого определяется из формулы (7).



Для условий задачи значение  $\left(\frac{dp}{dt}\right)_s$  и  $\Delta t$  равны:

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_s = \frac{427 \cdot 540 - 960 \cdot 0,58}{373(960 - 0,58)} = 358 \text{ кг/м}^2\text{°C},$$

$$\Delta t = 116,33 - 100 = 16,33^\circ\text{C}.$$

Тогда из (7) получим

$$\Delta p = 358 \cdot 16,33 = 5850 \text{ кг/м}^2 = 0,585 \text{ кг/см}^2,$$

откуда полное давление равно

$$p = 1,033 + 0,585 = 1,618 \text{ кг/см}^2.$$

Определяем величину удельного объема пароводяной смеси с учетом дополнительного давления внутри паровой фазы. Из (9) после подстановки численных значений получим

$$v_{2g} = 0,00105 + 0,067 \cdot 1,11 = 0,008 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Строим  $P-V$  диаграмму состояний с масштабом: давление — 1 *атм* — 20 *см*, удельный объем 0,0173 *м*<sup>3</sup>/*кг* — 10 *см*, площадь  $M_f = 0,862 \text{ кг/см}^2$ . Затем на  $P-V$  диаграмме наносим кривую адиабатного расширения 1—2. Затем строим кривую действительного расширения 1—2*g* путем переноса точки 2' на линию давления  $p_2 = 1 \text{ атм}$  в точку 2*g* (рис. 4) и соответственного переноса промежуточных точек. Планиметрируя площадь между кривой процесса 1—2*g* и осью ординат, получим  $S_{12g34} = 60 \text{ см}^2$ ,  $M_f \cdot S_{12g34} = 52 \text{ кгм}$ . Величина скорости потока в выходном сечении равна

$$c = 4,3 \sqrt{52} = 31 \text{ м/сек}.$$

Расход кипящей воды равен

$$g = \frac{31}{0,008 \cdot 10^4} = 0,39 \text{ кг/см}^2\text{сек}.$$

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Перельман И. Л. Обдувочные устройства паровых котлов на перегретой воде. ГЭИ, 1956.
2. Гурченко А. А. Исследование процесса истечения кипящей воды через диафрагмы и цилиндрические насадки, «Известия ТПИ», т. 101, 1958.
3. Гурченко А. А. Определение завершенности процесса парообразования при истечении кипящей воды, «Известия ТПИ», т. 101, 1958.
4. Михеев М. А. Основы теплопередачи, ГЭИ, 1958.
5. Кугателадзе С. С. Теплопередача при конденсации и кипении. Машгиз, 1952.