

## К ВОПРОСУ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА ПРИ АДИАБАТИЧЕСКОМ ПАРООБРАЗОВАНИИ

С. В. ПОЛОЖИИ

(Представлена проф. докт. техн. наук И. Н. Бутаковым)

В [1] уже были вскрыты недостатки современных исследований определения расхода при истечении нагретой воды, связанного с явлением адиабатического парообразования. Адиабатическое парообразование (без подвода тепла в процессе сброса давления нагретой жидкости) в предельном случае может протекать двояко: при изоэнтропическом и изоэнтальпическом сбросе давления нагретой воды. В первом случае в процессе адиабатического парообразования происходит генерация пара и кинетической энергии потока. Во втором случае процесс протекает с производством пара без существенного приращения кинетической энергии. Возможность осуществления того или иного процесса адиабатического парообразования зависит от типа испарительного элемента и условий процесса. Для нагретой жидкости изоэнтропический процесс адиабатического парообразования может быть осуществлен только в расширяющихся испарительных элементах (соплах) определенной конструкции, исключающей значительную потерю кинетической энергии процесса. В теоретическом случае коэффициент скорости равен единице. Во всех остальных случаях адиабатическое парообразование протекает с отклонением от изоэнтропического парообразования и тем больше, чем менее совершенны испарительные элементы. В цилиндрических, коноидальных и в диафрагменных испарительных элементах происходит изоэнтальпическое парообразование или близкое к нему, без существенного получения кинетической энергии.

На рис. 1 для иллюстрации показано экспериментальное значение кинетической энергии (скорости потока) адиабатического парообразования для различных испарительных элементов в зависимости от начальной температуры нагретой воды при сбросе давления в вакуум. В табл. 1 приведены геометрические характеристики некоторых исследованных на кафедре теплоэнергетических установок Томского политехнического института испарительных элементов, а на рис. 2 показана схема экспериментальной установки, на которой производилось изучение адиабатического парообразования. Расширяющийся испарительный элемент № 1 при начальной температуре нагретой воды, равной температуре насыщения, позволяет осуществить адиабатическое парообразование, близкое к изоэнтропическому процессу. Цилиндриче-

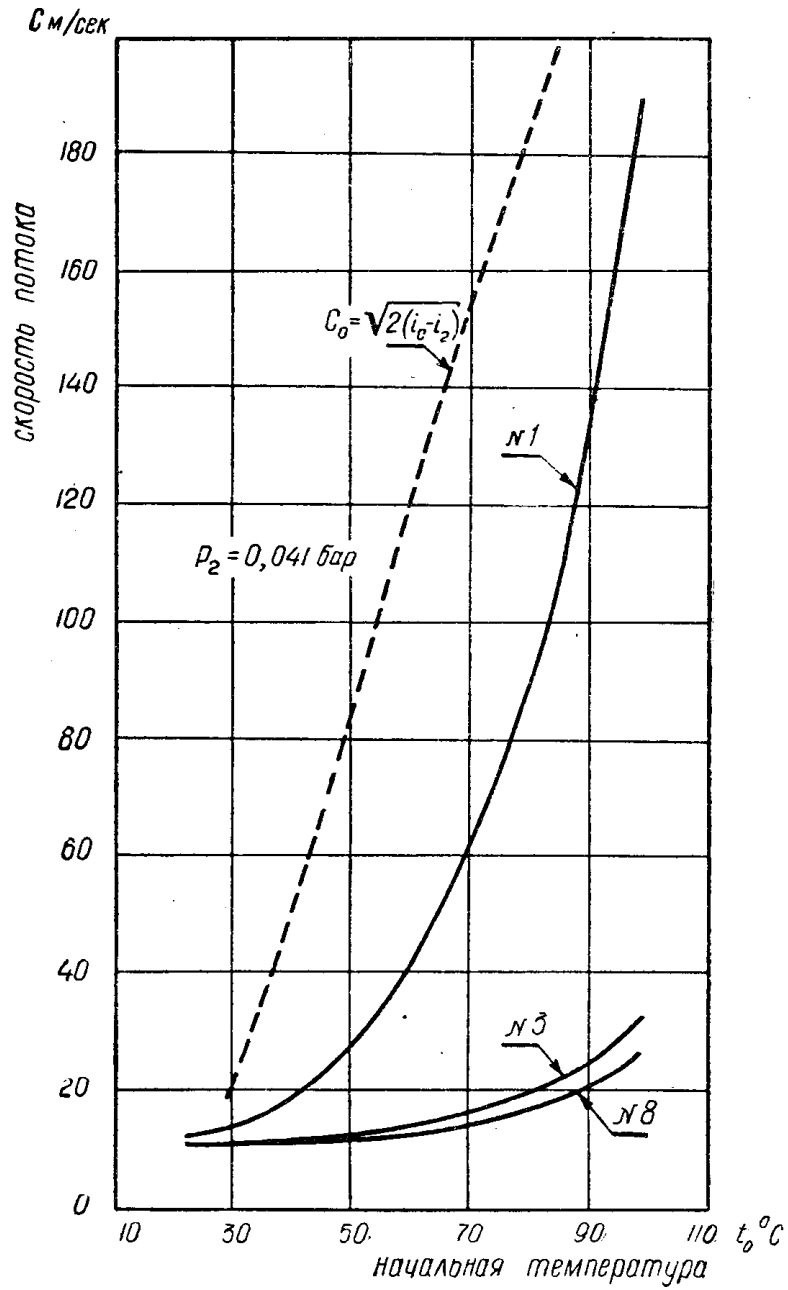


Рис. 1. Скорость истечения потока при адиабатическом парообразовании в зависимости от температуры нагретой воды: № 1 — расширяющийся, № 3 — конусообразный, № 8 — цилиндрический испарительный элемент,  $C_0$  — теоретическая скорость при изэнтропическом сбросе давления.

ский испарительный элемент № 8 и коноидальный № 3, наоборот, не позволяют существенно увеличить энергию потока и являются представителями испарительных элементов изоэнтальпического типа (рис. 1). К этой группе испарительных элементов не могут быть при-

Таблица 1

Основные характеристики испарительных элементов, использованных в статье

| Номер испарительного элемента | Тип испарительного элемента | Геометрические размеры           |                      |                               |                                |                            |
|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|----------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------------------------|
|                               |                             | диаметр минимального сечения, мм | угол раскрытия, град | длина расширяющейся части, мм | длина цилиндрической части, мм | диаметр выходной части, мм |
| № 1                           | Расширяющийся               | 2,0                              | 14                   | 125                           | 25                             | 28                         |
| № 2                           | Расширяющийся               | 2,18                             | 36                   | 40                            | 20                             | 28                         |
| № 3                           | Конноидальный               | 1,15                             | —                    | —                             | —                              | 1,15                       |
| № 8                           | Цилиндрический              | 2,2                              | —                    | —                             | 70                             | 2,2                        |

менены термодинамические зависимости изоэнтропического процесса парообразования вида:

$$x = \frac{S'_0 - S'_2}{S''_2 - S'_2},$$

$$C_0 = \sqrt{2(i'_0 - i_2)}.$$

Поэтому неправильной является попытка расчета параметров потока при истечении нагретой воды из цилиндрических насадок на базе термодинамических зависимостей изоэнтропического процесса, как это сделано в [2]. Появление в печати этой статьи вновь вынуждает возвратиться к вопросу о методике теоретических и экспериментальных исследований явлений, связанных с адиабатическим парообразованием.

В экспериментах [2] до предела ограничена задача исследования физической и термодинамической сущности процесса. Опыты поставлены весьма упрощенно и не основываются на правильной теоретической гипотезе, вследствие чего не только не вскрывается физическая сущность процесса, но даже остаются неизвестными изменение температуры и давления процесса и факторы, влияющие на них. Весь экспериментальный материал в этой работе получен при явно недостаточном разнообразии и количестве замеров. В опытах измерялось только давление перед насадком, в некоторых точках по длине и давление среды, куда происходит истечение, температура воды в нагревателе, расход нагретой и холодной воды. При такой постановке эксперимента автору работы [2] оказались неизвестными изменения давления и температуры процесса по всей длине испарительного элемента, своеобразии протекания процесса и зависимость его от типа и формы испарительных элементов, начальных и конечных параметров и др. Подобное же относится и к энергетической характеристике процесса парообразования и факторов, влияющих на него и, в частности, температурного напора, типа испарительных элементов и т. п. Невьяснена также структура потока и место зарождения паровой фазы, ввиду постановки опытов в непрозрачных испарительных элементах. В опытах даже не измерялась температура потока на выходе из испарительного элемента. Не измерялось и давление на выходном срезе испарительного элемента. Вместо всего этого выводы и заключения в [2] построены на умозрительных соображениях, не имеющих ничего общего с действительными явле-

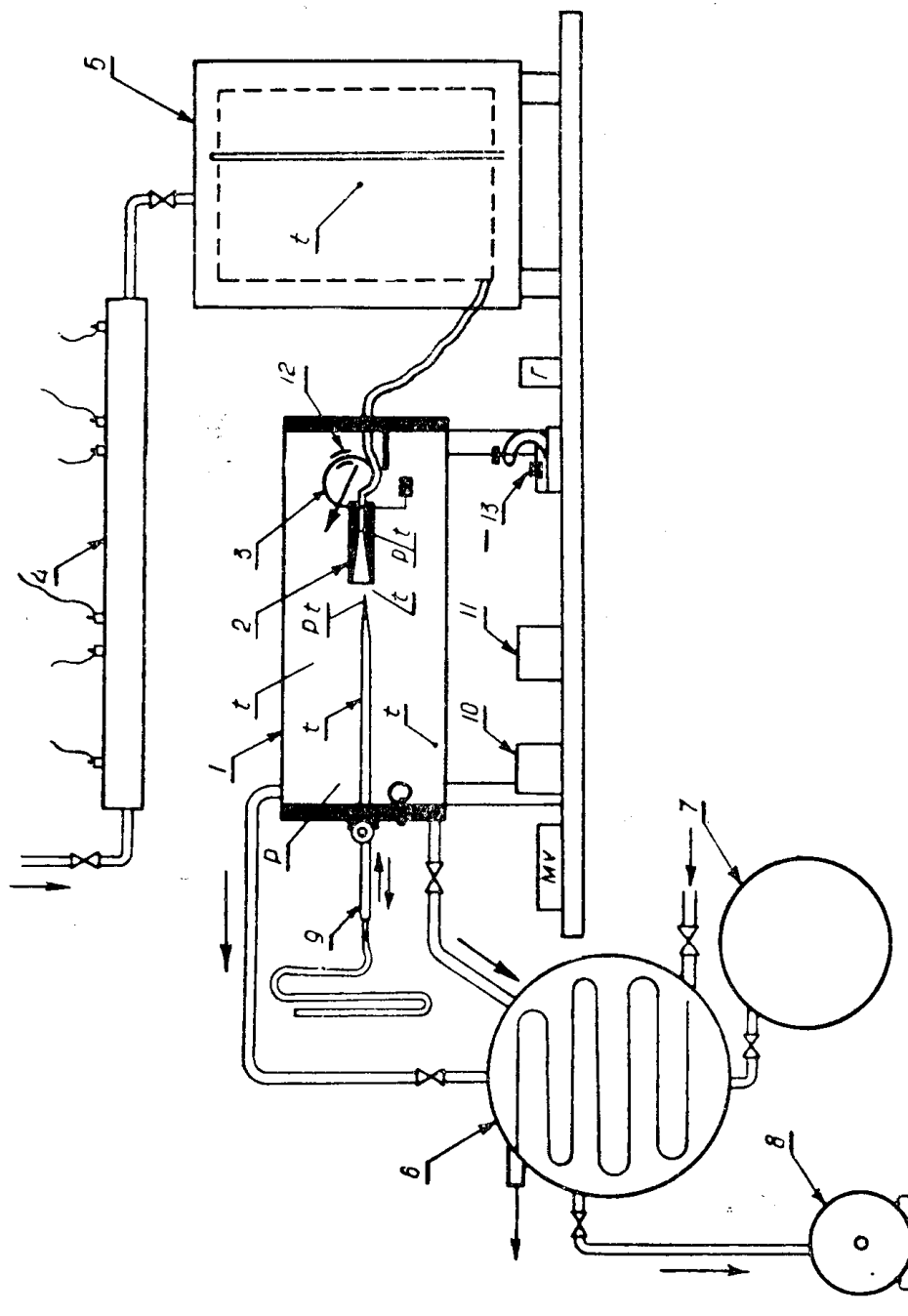


Рис. 2. Схема экспериментальной установки по исследованию адиабатического парообразования под вакуумом: 1 — корпус, 2 — испаритель, 3 — измеритель реактивной силы, 4 — нагреватель воды, 5 — мерный бак, 6 — конденсатор, 7 — сборник воды и конденсата, 8 — вакуумный насос, 9 — подвижная пустотелая измерительная игла, 10 — переключатель термометра, 11 — переключатель давления, 12, 13 — рабочие и компенсационные тензодатчики,  $P$  — место измерения давления,  $t$  — место измерения температуры.

ниями в исследуемом процессе. Это прежде всего относится к изменению давления в цилиндрическом испарительном элементе и к завершенности процесса парообразования.

В качестве иллюстрации действительного изменения давления и температуры в испарительных элементах на рис. 3—5 приведены экспериментальные кривые изменения этих параметров для некоторых испарительных элементов при неизменном начальном и конечном давлении потока и различных начальных температурах нагретой воды. Эти экспериментальные данные хорошо вскрывают своеобразие истечения

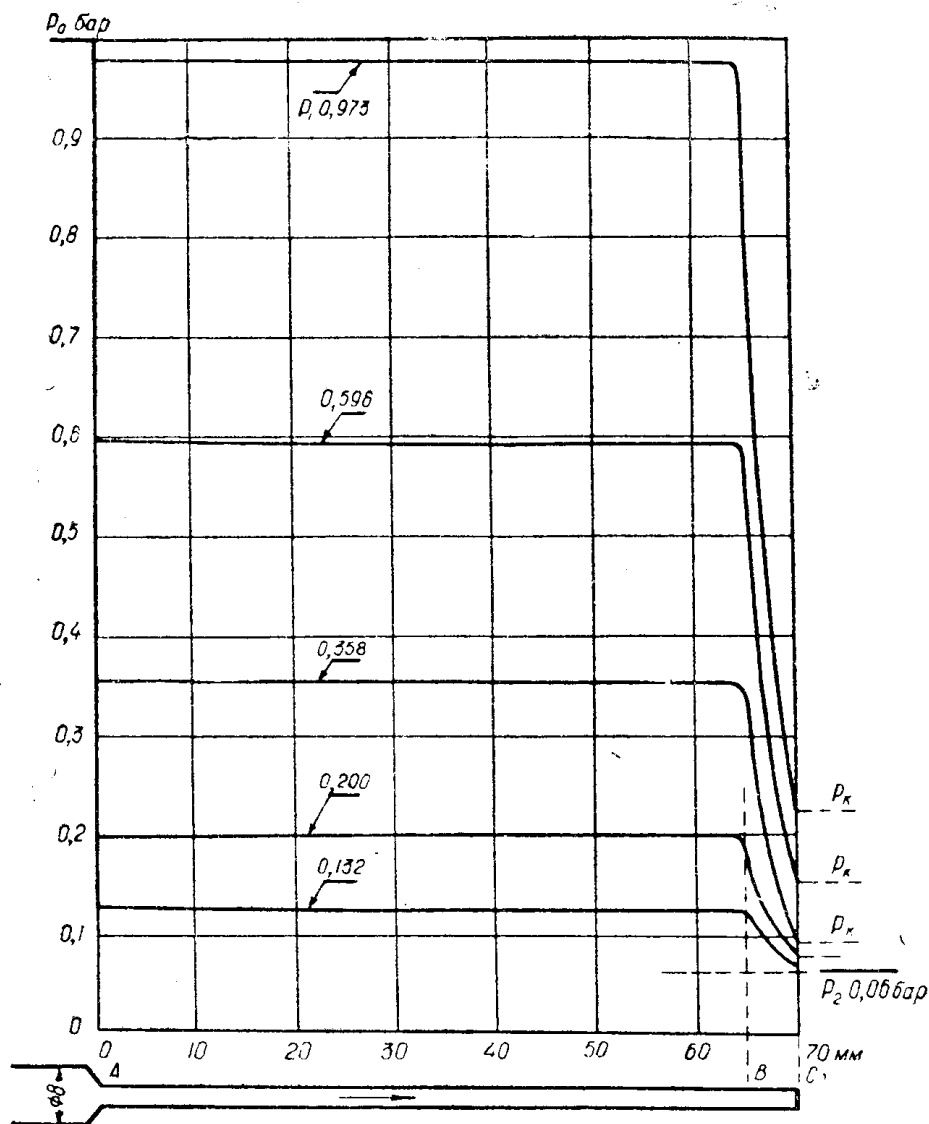


Рис. 3. Изменение давления процесса адиабатического парообразования в цилиндрическом испарительном элементе в зависимости от температуры нагретой воды:  $A$  — входной участок,  $BC$  — парогенерирующий участок,  $AB$  — жидкость при параметрах насыщения. Индекс «0» — начальное давление нагретой воды, индекс «1» — давление насыщения при температуре нагретой воды, индекс «2» — конечное давление за испарительным элементом, индекс «к» — критическое давление на выходном срезе испарительного элемента.

при адиабатическом парообразовании и его отличие от истечения однофазных жидкостей.

Изменение давления процесса адиабатического парообразования в цилиндрическом испарительном элементе в зависимости от температуры нагретой воды, при неизменном ее давлении, происходит в два этапа: во входной и выходной части испарительного элемента. При этом, чем больше недогрета вода относительно температуры насыщения при начальном давлении, тем большая доля падения давления приходится на выходной участок. При температуре нагретой воды, равной или ниже температуры насыщения при давлении среды, все падение давления приходится только на входной участок как при истечении холодной воды. При температуре нагретой воды точно отвечающей температуре насыщения при давлении на входе в испарительный элемент, весь сброс давления приходится на выходную часть цилиндрического испарительного элемента. Падение давления во входном участке происходит до давления насыщения, соответствующего начальной температуре нагретой воды. Это давление сохраняется по длине цилиндрической части, если исключить сопротивление трения испарительного элемента, вплоть до участка начала парообразования в выходной части испарительного элемента. Сброс давления во входном участке характеризует наличие недогрева жидкости относительно температуры насыщения при ее давлении на входе в испарительный элемент. Изменение давления во входном и выходном участке протекает различно. Во входном участке происходит резкое изменение давления (по вертикали, рис. 3) и всегда до давления насыщения при данной температуре нагретой воды. В выходном участке давление падает по криволинейной зависимости на некотором участке испарительного элемента и не до конечного давления среды, а до определенного критического давления, величина которого также зависит от начальной температуры нагретой воды при неизменных давлении среды и давлении воды на входе в испарительный элемент. Критическое давление в выходном срезе испарительного элемента тем выше, чем больше начальная температура нагретой воды приближается к температуре насыщения при давлении воды на входе в испарительный элемент. Падение давления от критического до давления среды происходит в свободном пространстве вне испарительного элемента. Другим важным следствием детального исследования температуры и давления процесса адиабатического парообразования в цилиндрических испарительных элементах является обнаружение активного парообразующего участка в выходной части на расстоянии 4—6 мм от выходного среза испарительного элемента для данной величины сброса давления (рис. 3, 4) и условий эксперимента.

В [2, 3] не измерялось ни давление, ни температура в активном участке испарительного элемента и эта особенность процесса осталась неизвестной для автора рассматриваемых работ. Схема падения давления в [2] (рис. 2) и в [3] (рис. 1) не отвечает действительному процессу. Изменение температуры процесса парообразования в цилиндрическом испарительном элементе (рис. 4) происходит только в выходной части и также зависит от начальной температуры нагретой воды при неизменном давлении на входе и давлении среды. Падение давления во входном участке не вызывает парообразования, так как давление снижается на этом участке только до температуры насыщения, которой достигает нагретая вода во входном участке. В цилиндрической части сохраняется равновесное состояние между давлением и температурой и также не происходит парообразования при небольшом гидравлическом сопротивлении этого участка. Парогенерирующим (активным) является, как уже отмечалось, только выходной участок цилиндрического испарительного элемента, в котором в соответствии с падением

давления происходит и падение температуры до критической величины в пределах испарительного элемента и от критической до температуры среды вне испарительного элемента. Одновременное измерение давления и температуры на активном участке показало относительно высокое соответствие между измеренной температурой и температурой насыщения, найденной из таблиц водяного пара по измеренному давлению.

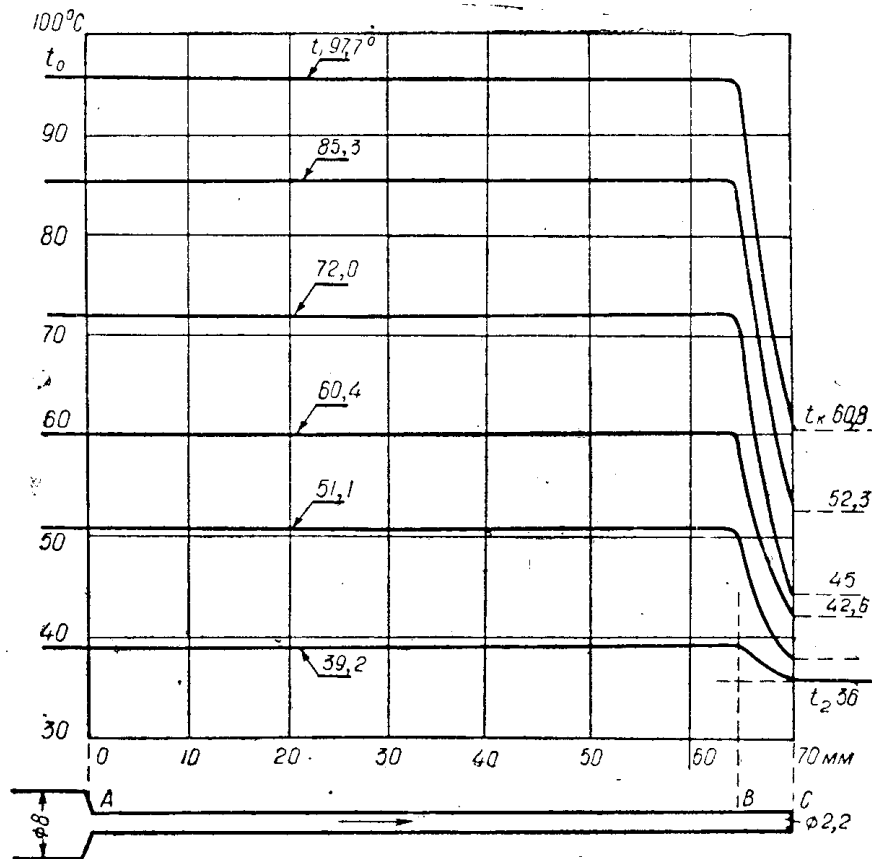


Рис. 4. Изменение температуры процесса адиабатического парообразования в цилиндрическом испарительном элементе в зависимости от температуры нагретой воды: А — входной участок, АВ — участок равновесного состояния давления и температуры насыщения, ВС — парогенерирующий участок. Индексы «0», «1», «2», «к» — начальная температура нагретой воды, температура насыщенная, температура за испарительным элементом, критическая температура в выходном срезе испарительного элемента соответственно.

лению (рис. 5). Такое своеобразие изменения давления и температуры в цилиндрических испарительных элементах при небольшой величине сброса давления является весьма примечательным и показывает, насколько неправильна методика экспериментального исследования расхода нагретой воды в [3] и в других работах, указанных в [1], когда в опытах производилось только измерение давления: перед насадком, давление среды или дополнительно еще в некоторых случайных точках по длине насадка. В работах [2, 3] не только допущена несоответствующая методика экспериментальных исследований, но также используется недопустимое обращение с данными своих же опытов. В одном случае экспериментальные данные дополняются надуманными представлениями тех участков процесса, на которых не производилось

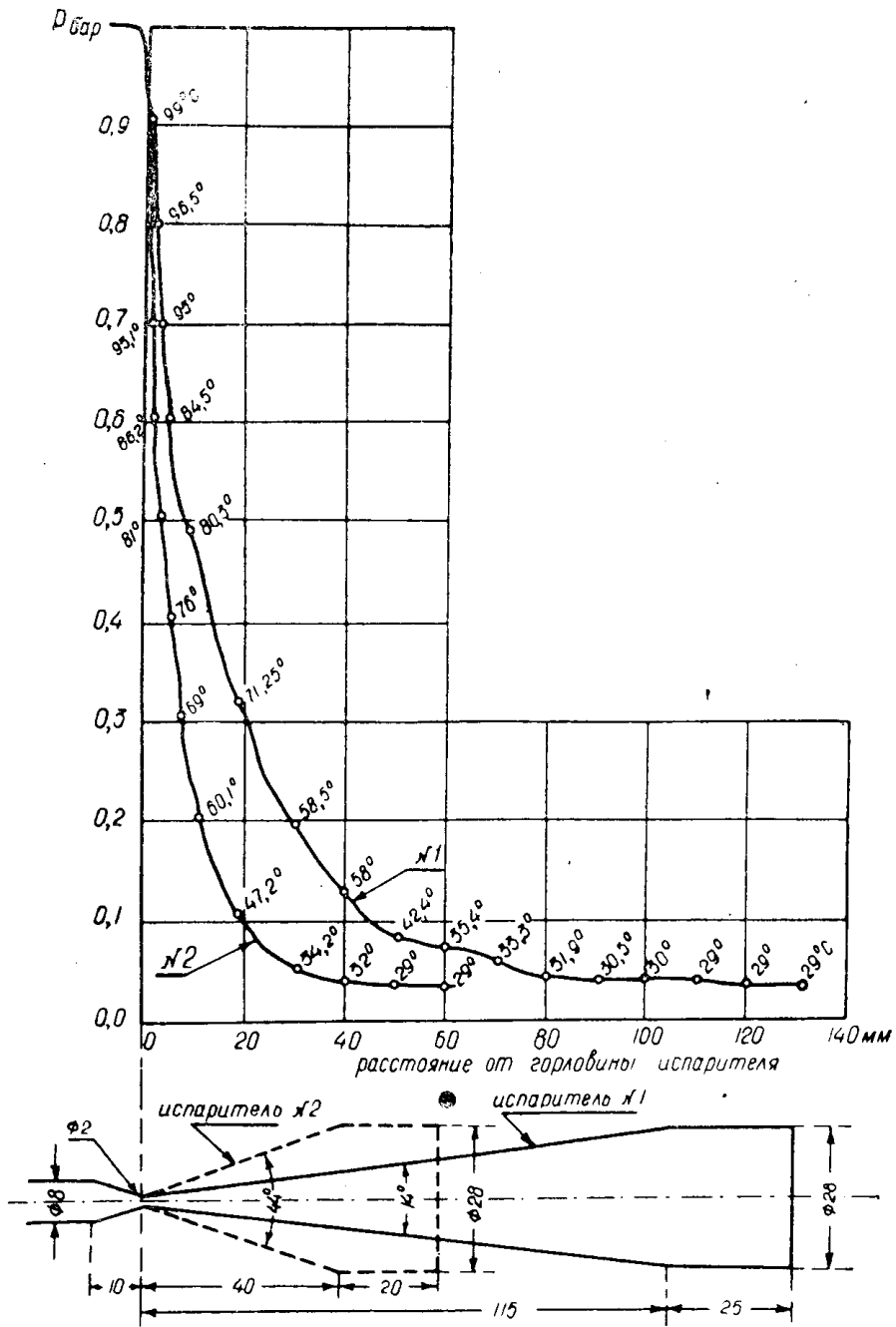


Рис. 5. Изменение давления и температуры процесса адиабатического парообразования для расширяющихся испарительных элементов.



соответствующих измерений параметров процесса, о которых говорилось выше. На рис. 6, а показана схема выявленных из опыта [3] и домысленных участков процесса (сплошные и пунктирные кривые соответственно). В другом случае допускается полный отход от своих же выявленных опытных данных [3], который обнаруживается в последующей работе [2] (рис. 6, б). Как видно из этого рисунка, падение давления вопреки опыту представляется теперь автором [2] совершенно по-иному. Все падение давления процесса от  $P_1$  до  $P_2$  перенесено на входной участок, а изменение температуры представлено в виде линейной зависимости от длины насадка (пунктирная кривая рис. 6, а). Причем опорными опытными данными такого «закона» изменения температуры процесса является измерение температуры только в одной точке — в котле и то на значительном расстоянии от входного участка насадка. Построив такую не существующую в природе схему процесса, не отвечающую даже в какой-то степени своим же опытными данным, автор работы [2] пытается убедить читателя в достоверности своих «теоретических» выводов расчета параметров в потоке при истечении нагретой воды, в правильности своих предпосылок о степени совершенства процесса, времени нахождения воды в насадке и т. п. Такие теоретические исследования не могут претендовать на решение поставленной задачи, вносят только путаницу в этот вопрос. В этой связи необходимо отметить также ошибочность трактовки в [2] длины испарительного элемента как основного фактора степени завершенности процесса парообразования. Такая гипотеза связывает адиабатическое парообразование не с действительными побудителями процесса: величиной, характером сброса давления и температурным напором, а только с временем пребывания воды в насадке. На этом предположении построены все выводы и заключения в работе [2]. Неправильность такого положения становится очевидной не только из рассмотрения действительного характера изменения давления и температуры в цилиндрических насадках наших опытов, о которых говорилось выше (рис. 3 и 4), но и по опытным данным самого автора работы [3].

Снижение расхода нагретой воды с увеличением длины насадка в опытах [2] (рис. 5) фактически объясняется не различием во времени нахождения воды внутри насадка, как утверждается в [2], а возрастанием гидравлических сопротивлений в более длинных насадках при неизменном начальном давлении и давлении среды (табл. 2). Из этих

Таблица 2

Зависимость расхода холодной и кипящей воды от длины цилиндрического насадка [2] (рис. 5).

| Номер рисунка по [2] | Длина цилиндрического насадка, мм | Холодная вода                               |  | Кипящая вода                               |  | Снижение расхода нагретой воды $\frac{G_{гор}}{G_{хол}}$ |
|----------------------|-----------------------------------|---|--|--|--|--|
|                      |                                   | расход холодной воды, г/см <sup>2</sup> сек | расход относительно насадка $\tau$ , % | расход кипящей воды, г/см <sup>2</sup> сек | расход относительно насадка $\tau$ , % |  |
| 5-г                  | 250                               | 0,97  | 100                                    | 0,326                                      | 100                                    | 0,33   |
| 5-д                  | 500                               | 0,70  | 71,5                                   | 0,235                                      | 71,8                                   | 0,33   |
| 5-е                  | 1500                              | 0,50  | 51,5                                   | 0,167                                      | 51,2                                   | 0,33   |

опытов следует, что относительное снижение расхода холодной и нагретой воды в зависимости от длины насадка при неизменном  $P_1$  и  $P_2$  имеет одну и ту же величину и не зависит от длины цилиндрического насадка. Следовательно, парообразование при неизменном начальном и конечном давлении процесса протекает идентично во всех трех на-

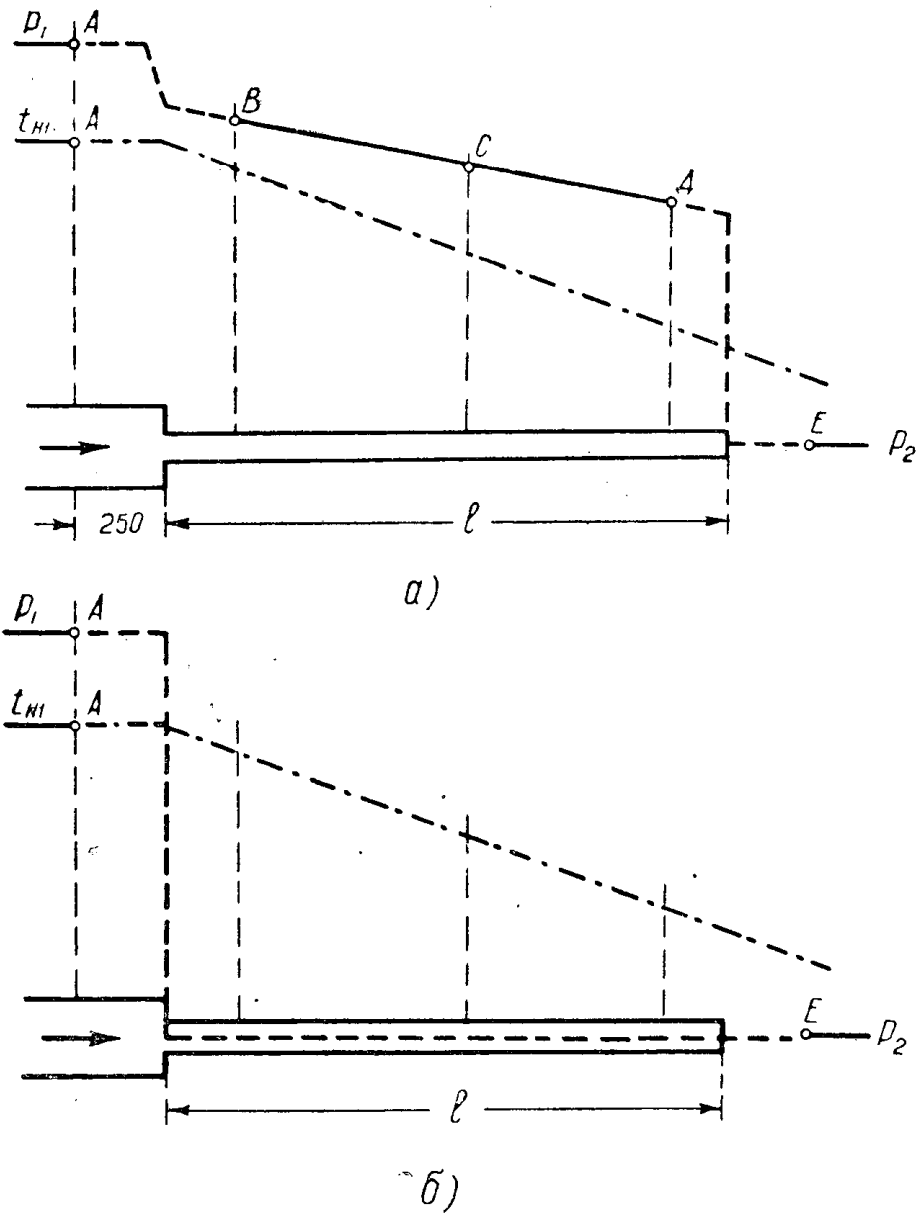


Рис. 6. а) Схема изменения давления и температуры в цилиндрическом насадке при истечении нагретой воды по данным [3].  
 б) то же по данным [2]: А — место замера давления и температуры в опытах. В, С, Д, Е — место замера давления в опытах. Сплошные кривые — изменение давления потока по замерам. Пунктирные кривые — изменение давления процесса по предположению автора работы [2, 3]. Штрих-пунктирные кривые — изменение температуры процесса по предположению автора работы [2, 3].  $P_1$ ,  $P_2$  — замеренное давление в котле и за насадком,  $t_{н1}$  — замеренная температура в котле,  $l$  — длина насадка.

садках различной длины и не зависит от времени нахождения воды в насадке. Эту действительную картину процесса автор работы [2] не вскрыл в своих же собственных экспериментах лишь только потому, что не обращал внимание на изменение расхода холодной воды с увеличением длины насадка и имел предвзятое ошибочное мнение о факторах, влияющих на процесс парообразования и его расход при истечении нагретой воды.

Комплексное исследование адиабатического парообразования под вакуум, проведенное автором на кафедре теплоэнергетических установок ТПИ по выяснению экспериментальным путем максимально возможных зависимостей и факторов, влияющих на процесс адиабатического парообразования, позволило более глубоко разобраться в этом вопросе и, в частности, выявить энергетическую характеристику процесса, изменение параметров и степени совершенства адиабатического парообразования, определить скорость и некоторые другие особенности парообразования при истечении нагретой воды. Отсутст-

Таблица 3

Методика теплового расчета адиабатического парообразования и сравнение ее с данными эксперимента

|                               | Наименование величин  | Расширяющийся ИЭ № 1 |
|-------------------------------|---|----------------------|
| Данные опыта                  | Начальное давление и температура нагретой воды $P_0$ , бар; $t_0$ , °C                    | 1,025; 84,6          |
|                               | Давление и температура в выходном сечении испарительного элемента (ИЭ), $P_2$ бар, $t_2$  | 0,0408; 29,0         |
|                               | Давление и температура за пределами испарительного элемента $P_{2cp}$ бар; $t_{2cp}$ °C   | 0,0408; 29,0         |
|                               | Скорость истечения на выходе из испарительного элемента $C_2$ , м/сек                     | 107,2                |
|                               | Расход потока $g_2$ , кг/сек  | 0,0243               |
| Теоретические расчеты         | Теплопадение в испарительном элементе $h_s = i'_0 - i'_2 + (s'_0 - s'_2) T_{н2}$ , кДж    | 25,76                |
|                               | Скорость истечения $C_s = \sqrt{2h_s}$ , м/сек  | 218                  |
|                               | Относительное количество пара $x_s = \frac{(s'_0 - s'_2) \cdot T_{н2}}{r_p}$ , кг/кг      | 0,0872               |
| Расчетные данные              | Коэффициент скорости ИЭ $\varphi = \frac{C_2}{C_s}$                                       | 0,491                |
|                               | Количество пара $x_p = x_s + (1 - \varphi)^2 \frac{h_s}{r_2}$ , кг/кг                     | 0,0946               |
|                               | Удельный объем потока на выходе из ИЭ $v_p = v_2 + x_p (v'_2 - v_2)$ , м <sup>3</sup> /кг | 3,26                 |
|                               | Расход потока $g_p = \rho \cdot C_2 \cdot f_2$ , кг/сек                                   | 0,0232               |
| Сопоставление опыта и расчета | Относительный расчетный расход $\beta_p = \frac{g_p}{g_2}$                                | 0,955                |
|                               | Несоответствие опытного и расчетного расхода $\Delta g = (1 - \beta) \cdot 100$ , %       | 4,5                  |

вие существенного несоответствия изменения давления и температуры процесса наряду с другими характеристиками подтверждает термодинамическую природу адиабатического парообразования и возможность с достаточной для практических целей точностью производить расчеты параметров этого процесса в расширяющихся испарительных элементах по термодинамическим зависимостям, подобно тому, как это делается при расчете параметров и процессов влажного пара (адиабатической конденсации), учитывая при этом энергетическую направленность и некоторые специфические особенности этих процессов, полученных экспериментальным путем: падение давления в жидкой фазе без парообразования при недогретой воде, величину сброса давления в пределах испарительного элемента и ряда других факторов. Например, для расширяющегося испарительного элемента № 1 в табл. 3 приведена методика теоретического расчета процесса адиабатического парообразования и сравнение его с данными эксперимента. Обозначение величин в формулах стандартное. Индекс «о» — начальные параметры, «2» — в выходном сечении испарительного элемента, «2 ср» — параметры среды, вне испарительного элемента, «s» — теоретическое значение при изэнтропическом сбросе давления и, наконец, индекс «р» — расчетное значение.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Положий С. В. О процессе парообразования при истечении нагретой воды. Изв. вузов СССР — Энергетика, № 2, 1960.
2. Гурченко А. А. К расчету параметров в потоке при истечении кипящей воды. Изв. ТПИ, т. 110, 1962.
3. Гурченко А. А. Исследование процесса истечения кипящей воды через диафрагмы и цилиндрические насадки. Изв. ТПИ, т. 101, 1958.