

вторичных нейтронов, их спектров или сечения поглощения.

Полученные в расчетах коэффициенты чувствительности показывают, что в гибридном реакторе наибольшее влияние на основные функционалы оказывают спектры вторичных нейтронов реакций  $^{238}\text{U}(n, 2n)$ ;  $^{238}\text{U}(n, n')$  cont;  $\text{Fe}(n, n')$  cont, для которых вклад в скорость делений на  $^{238}\text{U}$  и соответственно в размножение нейтронов на один нейтрон источника может быть значительным. Неопределенности функционалов, обусловленные неточностью спектров 15—20%, для рассматриваемой модели гибридного реактора оцениваются в 3—4,5% для скорости делений и 2—2,5% для выхода трития.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Usachev L. «J. Nucl. Engng, A/B», 1964, v. 18, p. 371.
2. Усачев Л. Н., Бобков Ю. Г. В кн.: Труды конф. «Нейтронная физика». Ч. I. Киев, «Наукова думка», 1972, с. 47.

3. Бобков Ю. Г. и др. Там же, ч. I. М., изд. ЦНИИатоминформ, 1976, с. 76.
4. Conn R., Stacey W. «Nucl. Fusion», 1973, v. 13, p. 185.
5. Gerstl S., Dudziak D., Muir D. «Nucl. Sci. Engng», 1977, v. 62(1), p. 137.
6. Steiner D., Tobias M. «Nucl. Fusion», 1974, v. 14, p. 153.
7. Gerstl S. In: Proc. Fifth Int. Conf. on Reactor Shielding, Knoxville, TN, 18—22 Apr. 1976.
8. Котов В. В. и др. Препринт ИАЭ-2817. М., 1977.
9. Howerton R. e.a. UCRL-50400, 1971, v. 4.
10. Захарова С. М., Сивак Б. Н., Тошинский Г. Н. Бюл. информ. центра по ядерным данным. Вып. 3. Приложение 1. Ядерно-физические константы для расчета реакторов. М., Атомиздат, 1967.
11. Захаров Л. Н. и др. Препринт ИАЭ-2994. М., 1978.
12. Золотухин В. Г., Усиков Д. А. Оценка реакторных параметров методом Монте-Карло. М., Атомиздат, 1979.
13. Марин С. В., Марковский Д. В., Шаталов Г. Е. Препринт ИАЭ-2832. М., 1977.
14. Kotov V., Shatalov G. In: Proc. of a US-USSR Symp. on Fusion-Fission Reactors. Liwermore, 13—16 July, 1976, p. 129.

Поступила в Редакцию 4.06.79

УДК 621.039.587

## Исследование характеристик вставок ограничения расхода при моделировании аварийной разгерметизации контура реактора

ТИХОНЕНКО Л. К., КАРАСЕВ Э. К., ЛУТОВИНОВ С. З., ГАБАРАЕВ Б. А., ТРУБКИН Е. И.

Вопрос ограничения расхода теплоносителя в условиях аварийной разгерметизации контура — один из самых актуальных. В патентной литературе предложено несколько решений этой задачи [1, 2]. Как правило, это либо предохранительные устройства, обеспечивающие автоматическое перекрытие проходного сечения трубопровода в момент аварийной разгерметизации контура, либо сопла типа трубы Вентури, которые не перекрывают, а лишь ограничивают аварийный расход теплоносителя. Последние более перспективны с точки зрения надежности, так как в них отсутствуют подвижные элементы. Вместе с тем всегда следует учитывать, что в номинальном режиме работы реактора подобные сопла являются «паразитными» сопротивлениями, поэтому при выборе геометрии проточной части сопла необходимо не только обеспечить достаточно эффективное ограничение расхода теплоносителя в аварийном режиме, но и гарантировать низкое гидравлическое сопротивление в условиях нормальной эксплуатации.

Проектирование ограничительных сопел требует соответствующей информации о течении теплоносителя в условиях аварийного и нормального режимов работы реактора. Обилие факторов, определяющих течение в упомянутых случаях, затрудняет теоретические исследования, в которых используют, главным образом, приближенные модели [3, 4]: равновесный однородный поток, течение

со скольжением фаз, течение метастабильной жидкости и т. п. Подобные модели согласуются с экспериментом только в отдельных узких диапазонах параметров. Имеющиеся сведения об экспериментальных работах (см. табл. 1) указывают на разрозненность исследованных областей режимных и геометрических параметров. Ни в одной из работ, приведенных в этой таблице, не проводилось систематического исследования зависимости критического расхода от геометрических параметров. Некоторое исключение представляет исследование [6], в котором рассматривается сопло с длиной цилиндрического участка 120 мм и диаметром минимального сечения 19,0 мм. Однако эта работа проведена только для насыщенной воды ( $\Delta t_{s0} = 0$ ). Между тем, для канальных реакторов типа РБМК практически интересна область параметров  $\Delta t_{s0} = 0—30^\circ\text{C}$ ,  $p_0 = 0,1—9$  МПа и  $d_r \leq 150$  мм. Как следует из табл. 1, этот диапазон почти не исследован. Экстраполяция же имеющихся эмпирических данных на эту область представляется неоправданной.

В настоящей статье представлены результаты экспериментального исследования зависимости критических расходных характеристик сопел типа трубы Вентури от геометрических факторов (диаметр и длина цилиндрической горловины сопла, угол раскрытия конического диффузора) и от режимных параметров (давление и недогрев воды

Таблица 1

Данные экспериментальных исследований

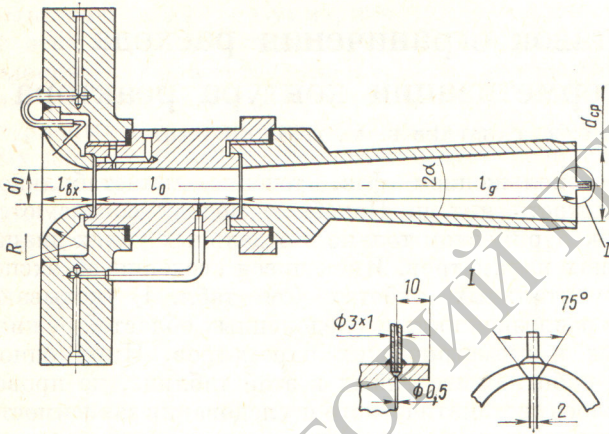
Начальные параметры		Входной участок		Горловина		Диффузор		Литература
$p_0$ , бар	$\Delta t_{s0}$ , °C	профиль	$l_{вх}$ , мм	$d_r$ , мм	$l_r$ , мм	профиль	$F_{ср}/F_0$	
6 20—100	5—6	Лемниската Дуга с $R = 10$ мм	40	3	1	Конус 3—7° Конус 3°	12—45	[5]
	0		10	3,84	18		3,8	[6]
8—90 5—20	0—140 1—70	Дуга с $R = 180$ мм Конус	114	19,0	65—120	Конус 3—6°	2,17—2,50	[7] [8]
			—	103	6,4		0	
1,1—20 5—20	0—10 0—60	Плоские сопла То же	93	10,0	0	Конус 3,6°	12,0	[9] [10]
			—	5,0	7	Конус 3,9°	13,9	

на входе в сопло). Эксперименты проведены на осесимметричных соплах, состоящих из трех элементов: сужающегося входного участка с округлением в форме четверти дуги окружности ( $R = 30$  мм),

Таблица 2

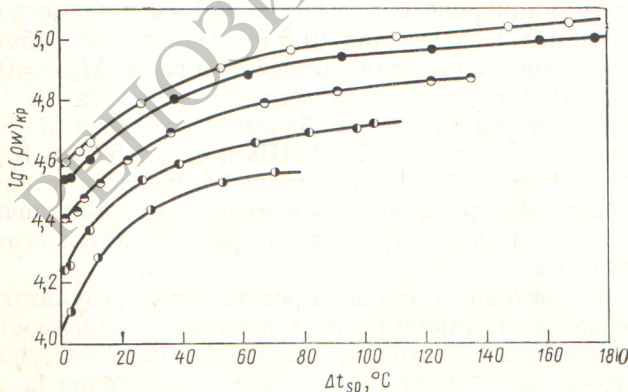
Геометрия исследованных сопел

Номер сопла	Входной участок		Горловина		Диффузор		
	$R$ , мм	$l_{вх}$ , мм	$d_r$ , мм	$l_r$ , мм	$\alpha$ , град.	$l_{диф}$ , мм	$d$ среза, мм
1	30	30,5	20,04	0	6	180,3	38,95
2	30	30,5	20,04	41,3	6	180,3	38,95
3	30	30,5	20,04	81,1	6	180,3	38,95
4	30	30,5	20,04	160,7	6	180,3	38,95
5	30	30,5	20,04	161,3	Без диффузора		
6	30	30,5	20,04	160,7	3	180,4	29,45
7	30	29,0	30,0	165,5	6°35	90	40,4
8	30	31,03	19,98	26,0	5°42	193	38,85
9	30	34,4	10,03	156,4	Без диффузора		

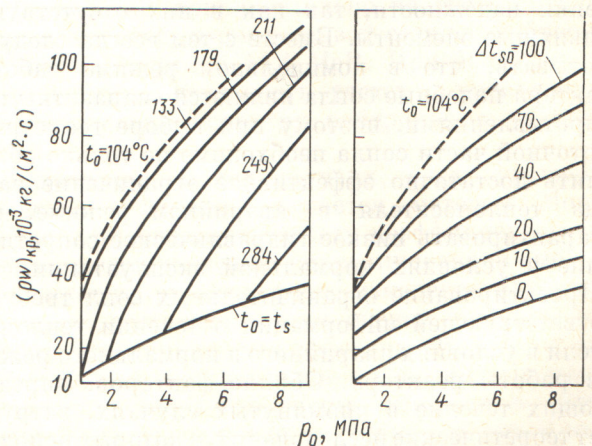


Р и с. 1. Типичный рабочий участок

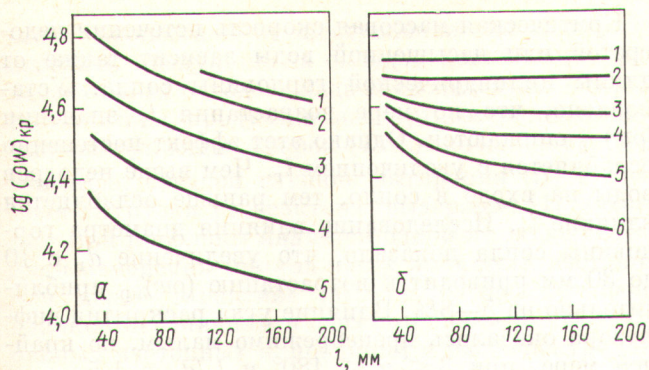
цилиндрического участка ( $d_r = 10—30$  мм,  $l_r = 0—160$  мм) и расширяющегося диффузора ( $\alpha = 3°, 6°$  и  $180°$ ). Геометрия сопел приведена на рис. 1 и в табл. 2. Эксперименты выполнены в условиях



Р и с. 2. Влияние входного недогрева на критическую массовую скорость (сопло № 9) при  $p_0 = 9,0$  (○);  $7,0$  (●);  $4,0$  (◐);  $2,0$  (◑);  $1,0$  (◒) МПа



Р и с. 3. Влияние давления на входе в сопло на критическую массовую скорость (сопло № 9)

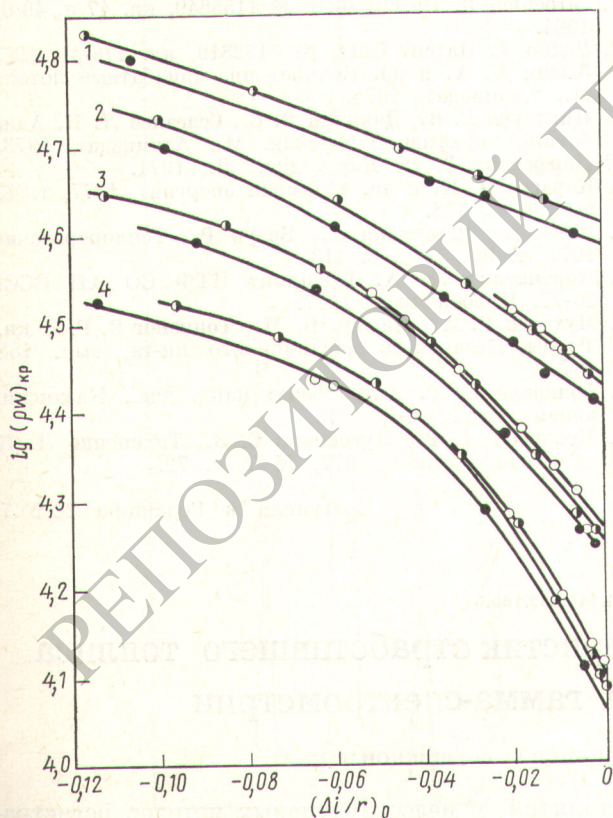


Р и с. 4. Влияние длины на критическую массовую скорость (сопла с диаметром горловины 20 мм): а — насыщенная вода,  $p_0 = 9,0$  (1);  $7,0$  (2);  $4,0$  (3);  $2,0$  (4);  $1,0$  МПа (5); б — подогретая вода,  $\Delta t_{s0} = 100$  (1);  $60$  (2);  $30$  (3);  $20$  (4);  $10$  (5);  $0^\circ$  (6)

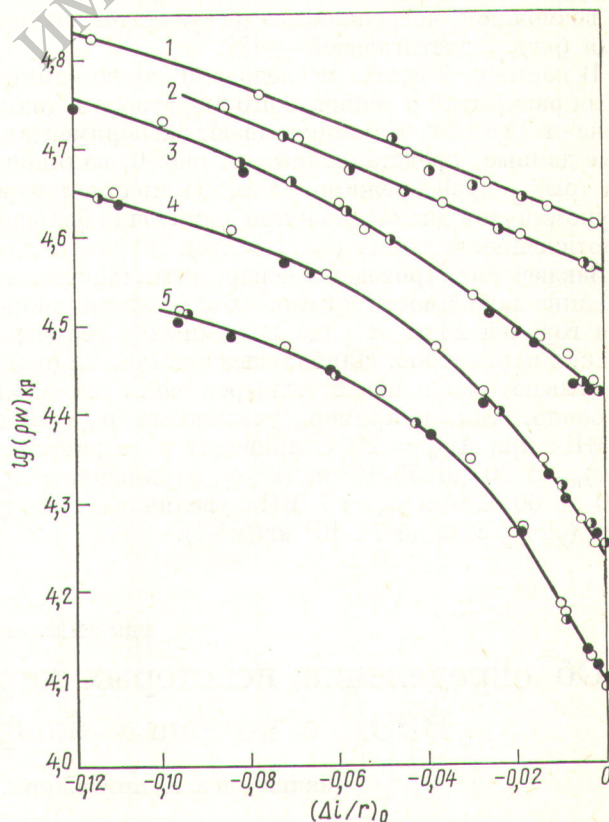
стационарного истечения при  $p_0 = 0,1-9$  МПа и  $\Delta t_{s0} = 0-100$  °С. Погрешность измерений не превышала  $\pm 2\%$  для давления,  $\pm 1,4$  °С для температуры и  $\pm 4\%$  для массового расхода. Экспериментальная установка и методика эксперимента заимствованы из работы [41].

Результаты измерений свидетельствуют о существенном влиянии  $p_0$  и  $\Delta t_{s0}$  на критическую массовую скорость, приведенную к минимальному сечению проточной части сопла. Из рис. 2 и 3 следует, что с увеличением  $p_0$  и  $\Delta t_{s0}$  значение критической массовой скорости возрастает. Необходимо отметить, что результаты, соответствующие  $\Delta t_{s0} = 0$ , получены интерполяцией графических зависимостей, построенных в координатах  $(\rho w)_{кр} - (\Delta l/r)_0$ . В данном случае подобный шаг обусловлен техническими трудностями, связанными с получением на входе в сопло точных значений параметров насыщения.

Из исследованных геометрических факторов наиболее сильное влияние на  $(\rho w)_{кр}$  оказывает длина цилиндрической горловины сопла  $l_r$ . Очевидно, критическая массовая скорость зависит не от длины цилиндрического участка, а от несколько большей эффективной величины, представляющей собой сумму длины цилиндрического участка и длины части входного участка. Отсчет последней ведется от сечения, где начинается вскипание жидкости. Из рис. 4 видно, что во всем исследованном диапазоне  $p_0$  возрастание  $l_r$  приводит



Р и с. 5. Влияние диаметра горловины на критическую массовую скорость (сопла № 4-7, 9 с длиной горловины 160 мм) при  $p_0 = 9,0$  (1);  $4,0$  (2);  $2,0$  (3);  $1,0$  МПа (4) и  $d_r = 10,03$  (●);  $20,04$  (○) и  $30,0$  (○) мм



Р и с. 6. Зависимость критической массовой скорости от подогрева на входе при различных углах раскрытия выходного участка (сопла № 4-6 с цилиндрической горловиной 160 мм и диаметром 20 мм) при  $p_0 = 9,0$  (1);  $7,0$  (2);  $4,0$  (3);  $2,0$  (4);  $1,0$  МПа (5) и  $\alpha = 180$  (●);  $6$  (○);  $3^\circ$  (○)

к уменьшению критической массовой скорости истечения как насыщенной, так и недогретой воды. Влияние  $l_r$  на  $(\rho w)_{кр}$  ослабляется тем быстрее, чем больше недогрев воды на входе в сопло. Например, при  $\Delta t_{s0} = 10^\circ\text{C}$  увеличение  $l_r$  от 0 до 160 мм приводит к снижению  $(\rho w)_{кр}$  на 47%, тогда как при  $\Delta t_{s0} = 30^\circ\text{C}$  изменение  $l_r$  в этих же пределах уменьшает  $(\rho w)_{кр}$  приблизительно всего лишь на 13%.

Немаловажный практический интерес представляет вопрос о вероятном влиянии диаметра горловины сопла на критическую массовую скорость истечения недогретой и насыщенной воды. В настоящей работе эксперименты выполнены на соплах с диаметром горловины 10, 20 и 30 мм. Рис. 5 свидетельствует о некотором расхождении по  $d_r$  кривых, описывающих зависимость  $(\rho w)_{кр}$  от относительного недогрева  $(\Delta i/r)_0$  при различных значениях давления воды на входе в сопло. Из этого рисунка следует, что при  $d_r = 30$  мм значения  $(\rho w)_{кр}$  на 5—8% выше, чем при  $d_r = 10$  мм. Разумеется, вопрос о влиянии диаметра горловины сопла подлежит дальнейшему экспериментальному исследованию, так как отмеченное расхождение кривых  $(\rho w)_{кр} = f[(\Delta i/r)_0]$  по значениям  $d_r$  сопоставимо с возможной погрешностью результатов измерения  $(\rho w)_{кр}$ , достигающей  $\pm 4\%$ .

В настоящей статье исследовано также влияние угла раскрытия  $\alpha$  конического диффузора в диапазоне от  $3$  до  $180^\circ$ . Как показывают экспериментальные данные, представленные на рис. 6, влияние  $\alpha$  на  $(\rho w)_{кр}$  пренебрежимо мало, по крайней мере, в упомянутом диапазоне и при достаточно большой протяженности сопла ( $l_r/d_r \geq 1,5$ ).

**Заключение.** Проведено экспериментальное исследование зависимости критической массовой скорости горячей воды от ряда режимных и геометрических параметров. Наибольшее влияние на  $(\rho w)_{кр}$  оказывают давление и недогрев воды на входе в сопло. Так, например, увеличение  $p_0$  с 2 до 9 МПа при  $\Delta t_{s0} = 20^\circ\text{C}$  приводит к возрастанию  $(\rho w)_{кр}$  с 30 до  $55 \cdot 10^3$  кг/(м<sup>2</sup>·с), а изменение  $\Delta t_{s0}$  с 0 до  $60^\circ\text{C}$  при  $p_0 = 7$  МПа увеличивает значение  $(\rho w)_{кр}$  с 35 до  $74 \cdot 10^3$  кг/(м<sup>2</sup>·с).

Критическая массовая скорость истечения недогретой или насыщенной воды зависит также от длины цилиндрической горловины сопла. Установлено, что по мере возрастания  $l_r$  значения  $(\rho w)_{кр}$  снижаются. Однако этот эффект постепенно ослабляется с увеличением  $l_r$ . Чем выше недогрев воды на входе в сопло, тем раньше ослабляется влияние  $l_r$ . Исследование влияния диаметра горловины сопла показало, что увеличение  $d_r$  с 10 до 30 мм приводит к возрастанию  $(\rho w)_{кр}$  приблизительно на 5—8%. Влияние угла раскрытия диффузора оказалось пренебрежимо малым, по крайней мере, при  $3 \leq \alpha \leq 180^\circ$  и  $l_r/d_r \geq 1,5$ .

#### Условные обозначения

- $p_0$  — давление воды на входе в сопло, МПа  
 $\Delta t_{s0}$  — недогрев воды на входе в сопло,  $^\circ\text{C}$   
 $(\rho w)_{кр}$  — критическая массовая скорость, приведенная к узкому сечению, кг/(м<sup>2</sup>·с)  
 $(\Delta i/r)_0$  — безразмерное значение недогрева воды на входе в сопло  
 $l_r, d_r$  — длина и диаметр цилиндрической горловины сопла, мм  
 $\alpha$  — угол раскрытия конического диффузора, град

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Strochlen R. Патент ФРГ № 1155649, кл. 47 g, 49/02, 1964.
2. Piston J. Патент США № 3172819, кл. 176-31, 1965.
3. Зысин В. А. и др. Вскипающие адиабатные потоки. М., Атомиздат, 1976.
4. Циклаури Г. В., Данилин В. С., Селезнев Л. И. Адиабатные двухфазные течения. М., Атомиздат, 1973.
5. Парфенова Т. Н. Канд. дис., Л., 1971.
6. Карасев Э. К. и др. «Атомная энергия», 1977, т. 42, вып. 6, с. 478.
7. Шрок В., Штаркман Е., Браун Р. «Теплопередача», 1977, т. 99, № 2, с. 113.
8. Коронкевич М. А. Препринт ИТФ СО АН СССР 55-77. Новосибирск, 1977.
9. Мухачев Г. А., Павлов Б. М., Тонконог В. Г. В кн.: Труды Казанского авиационного ин-та, вып. 158, 1973.
10. Тонконог В. Г. Автореферат канд. дис., Казанский авиационный ин-т, 1975.
11. Кеворков Л. Р., Лутовинов С. З., Тихоненко Л. К. «Теплоэнергетика», 1977, № 7, с. 72.

Поступила в Редакцию 22.10.79

УДК 621.09.54:539.128.4.144:539.166.3

## Об определении некоторых характеристик отработавшего топлива ВВЭР с помощью альфа- и гамма-спектрометрии

ЗЕЛЕНКОВ А. Г., ПИРОЖКОВ С. В., РОДИОНОВ Ю. Ф., ШВЕЦОВ И. К.

В международной системе гарантий по нераспространению ядерного оружия большое внимание уделяется надзору за специальными ядерными материалами (СЯМ), который осуществляется с помощью методов физической защиты (охранных ме-

роприятий) и неструктивных методов регистрации ядерных излучений.

На заводах по переработке отработавшего ядерного топлива важным элементом надзора является идентификация СЯМ на всех этапах технологиче-