

В.М. Арсеньев, к.т.н., проф., С.О. Шарапов, аспирант, М.Г. Прокопов, научный сотрудник (Сумский государственный университет, г. Сумы, Украина)

Влияние масштабного фактора на эффективность жидкостно-парового струйного компрессора

Приведены результаты моделирования течения вскипающей жидкости в расширяющихся каналах. На основе данных о структуре потока, распределении давления, расходе, реактивном импульсе струи и материалов косвенного измерения параметров течения, полученных при исследовании сопел различных геометрических размеров и формы, оценено влияние масштабного фактора на показатели жидкостно-парового струйного компрессора, а именно на скоростной коэффициент, определяющий эффективность истечения как в самом сопле, так и в компрессоре в целом. Апробирован численный метод расчета осредненных параметров парокapельного потока и показателей эффективности истечения.

Ключевые слова: жидкостно-паровой струйный компрессор, вскипающая жидкость, адиабатное истечение, скоростной коэффициент.

Наведено результати моделювання течії закипаючої рідини у каналах, що розширюються. На основі даних про структуру потоку, розподіл тиску, витрату, реактивний імпульс струменя і матеріалів непрямого вимірювання параметрів течії, отриманих при дослідженні сопел різних геометричних розмірів і форми, оцінено вплив масштабного фактору на показники рідинно-парового струминного компресора, а саме на швидкісний коефіцієнт, який визначає ефективність течії як в самому соплі, так і в компресорі в цілому. Апробовано чисельний метод розрахунку усереднених параметрів парокapельного потоку і показників ефективності витікання.

Ключові слова: рідинно-паровий струминний компресор, закипаюча рідина, адиабатне витікання, швидкісний коефіцієнт.

Flow modeling results of boiling liquid in expanding channels are given. Based on the flow structure, pressure distribution, flow rate, jet pulse and data indirect measurement of the flow parameters obtained in the study of nozzles of different geometric shape and size, assessed the influence of scale factor on the performance of liquid-steam jet compressor, namely, the rate coefficient, determining the effectiveness of the end as in the nozzle and the compressor as a whole. Validated numerical method for calculating the averaged parameters of steam-drop flow and performance of expiration.

Keywords: liquid-steam jet compressor, boiling liquid, adiabatic expiration, rate coefficient.

Эффективность жидкостно-парового струйного компрессора в первую очередь определяется совершенством процессов истечения вскипающей жидкости и формирования рабочей струи влажного пара за выходным срезом активного сопла при минимальной диссипации механической энергии [1-3]. Для наиболее полного преобразования энергии недогретой до насыщения жидкости в кинетическую энергию вытекающей струи пара применяются расширяющиеся каналы, которые по форме близки к соплам Лавая. Известно большое количество экспериментальных и теоретических исследований, посвященных изучению течения вскипающих потоков в расширяющихся каналах в условиях отрицательных градиентов давления. Однако в связи с чрезвычайной сложностью течения, отличающегося неравновесной метастабильностью состояния фаз, неравномерностью распределения полей скорости и концентрации, структурной неоднородностью среды, межфазным тепло- и массообменом в условиях интенсивного турбулентного переноса, кризисными явлениями, а также из-за ограниченного диапазона режимных и геометрических

параметров проводимых экспериментальных исследований, еще не получено достаточно полного и физически обоснованного количественного описания этого процесса.

В работах [4,7] рассматривается процесс расширения парокapельного потока в основном участке канала сопла с целью моделирования характеристик дробления жидкой фазы, релаксационного парообразования, построения численного метода расчета параметров течения и прогнозирования показателей эффективности истечения. Предложенная теплофизическая модель пузырькового кипения в начальном участке структурной инверсии, основанная на реализации преимущественно динамической схемы парообразования, позволила согласовать теоретические представления с материалами экспериментальных исследований и апробировать численный метод расчета осредненных параметров в сечении перехода двухфазного пузырькового потока к потоку парокapельной мелкодисперсной структуры.

В статье рассматривается численное моделирование и экспериментальное исследование течения

вскипающей жидкости в расширяющихся каналах с учетом влияния масштабного фактора на показатели жидкостно-парового струйного компрессора, а именно на скоростной коэффициент, определяющий эффективность истечения как в самом сопле, так и в компрессоре в целом.

Анализ результатов эксперимента

Результаты литературного обзора показывают, что течение вскипающей жидкости в расширяющемся канале сопла характеризуется наличием трех критических сечений [3]. Первое критическое сечение определяет конечную величину начального метастабильного перегрева жидкости и расходные характеристики расширяющегося канала. Второе критическое сечение обуславливает завершение инверсии структуры потока и обеспечивает переход к парокапельной структуре. Третье критическое сечение свидетельствует об остаточном дроблении в парокапельном потоке мелкодисперсной структуры и переходе к сверхзвуковому течению.

Для получения более полной информации о процессе парообразования при истечении недогретой до насыщения жидкости необходимо было проведение эксперимента, который включал бы в себя исследование конических сопел с одинаковым плавным очерченным входным участком в широком диапазоне режимных и геометрических параметров для области недогревов $(1 - \varepsilon_{so}) \geq 0,5$. С этой целью были изготовлены и испытаны 12 сопел с различным углом раскрытия и длиной расширяющейся части. Диаметр горла сопла был выполнен одинаковым для всех сопел $d_f = 1,7$ мм [2]. Эксперимент включал в себя исследования по истечению вскипающей воды в атмосферу в широком интервале режимных ($p_0 = 2 + 10$ МПа, $t_0 = 160 + 205^\circ\text{C}$) и геометрических ($\alpha_x = 8 + 28^\circ\text{C}$, $f_a = 11,4 + 94,3$) параметров.

Зависимости между экспериментальными величинами (a) и соответствующими величинами, характеризующими идеализированную струю при

равновесном изэнтропном расширении (as) можно представить в следующем виде:

– величина импульса

$$i_a = \left(\frac{\omega_f^2}{v_0'} \right) \cdot \gamma_a + (p_a - p_{oc}) \cdot f_a \quad (1)$$

где ω_f – средняя скорость потока в расходном сечении, м/с; v_0' – удельный объем жидкости в состоянии насыщения, м³/кг; γ_a – относительная скорость истечения в выходном сечении сопла; p_a – давление потока в выходном сечении сопла, Па; p_{oc} – давление потока в сечении стабилизации распределения, Па; f_a – относительная площадь сопла в выходном сечении.

$$i_{as} = \left(\frac{R_{as}}{F_f} \right) = \mu_0^{-1} \cdot v_f^{-1} \cdot \left(\frac{\omega_f^2}{v_0'} \right) \cdot \gamma_{as}, \quad (2)$$

где F_f – площадь сопла в расходном сечении, м²; μ_0 – коэффициент расхода, Па·с; v_f – коэффициент метастабильности расхода; γ_{as} – относительная скорость истечения в выходном сечении сопла для идеализированной струи.

Коэффициент импульса (при условии отсутствия запыряния)

$$\varphi_i = \left(\frac{i_a}{i_{as}} \right) = \mu_0 \cdot v_f \cdot \varphi_a, \quad (3)$$

где v_f – удельный объем жидкости в расходном сечении сопла, м³/кг; φ_a – коэффициент скорости.

$$v_f = \left(\frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_{so}} \right), \quad (4)$$

где \dot{m}_f – массовый расход в расходном сечении сопла, кг/с; \dot{m}_{so} – массовый расход при равновесном изэнтропном расширении, кг/с.

Таблица. Результаты исследования сопла с $d_f = 4$ мм

τ , мин	P_0 , бар	P_2 , бар	t_0 , °C	R , кг	P_0 , бар	P_2 , бар	t_0 , °C	R , кг	P_0 , бар	P_2 , бар	t_0 , °C	R , кг
0	16,80	8,4	110	6,60	23,04	13,8	167	11,43	27,12	16,2	180	13,30
0,5	16,56	9,5	154	7,96	22,80	14,7	181	11,93	26,64	16,5	186	13,55
1,0	16,56	10,4	168	8,10	22,56	15,1	188	11,90	26,40	16,6	190	13,50
1,5	16,32	10,6	173	8,28	22,32	15,2	191	11,82	25,92	16,6	192	13,44
2,0	16,08	10,8	177	8,27	22,08	15,4	193	11,75	25,68	16,8	194	13,40
2,5	16,08	11,0	178	8,24	21,84	15,2	195	11,70	25,44	16,9	196	13,31
3,0	15,84	11,0	180	8,22	21,60	15,2	195	11,55	25,20	16,8	196,5	13,23
3,5	15,84	11,3	182	8,12	21,36	15,1	196	11,39	24,96	16,6	196	13,10
4,0	15,60	11,2	183	8,08	21,12	15,0	196	11,31	24,48	16,4	195	12,97
4,5	15,60	11,1	184	8,07	21,12	15,0	196	11,10	24,00	16,2	195	12,80
5,0	15,36	11,0	184	7,98	20,88	14,8	196	10,95	23,52	15,8	195	12,60
5,5	15,36	11,0	184,5	7,88	20,64	14,6	195	10,69	23,04	15,4	194	12,33
6,0	15,12	10,9	184	7,79	20,16	14,4	194	10,56	22,80	15,1	193	12,13
6,5	15,00	10,8	184	7,69	19,68	14,0	194	10,28	22,08	14,6	192	11,97
7,0	14,88	10,7	183	7,58	19,44	13,7	193	10,08	21,12	14,1	191	11,28

$$\varphi_a = \left(\frac{\omega_a}{\omega_{as}} \right) \quad (5)$$

где ω_a – средняя скорость потока в выходном сечении сопла, м/с; ω_{as} – скорость равновесного изоэнтропного истечения, м/с.

$$\omega_{as} = \sqrt{2 \cdot (h_0 - h_a' - (s_0 - s_a') \cdot T_a)} \quad (6)$$

где h_0 – энтальпия, Дж/кг; h_a' – энтальпия жидкости в выходном сечении сопла в состоянии насыщения, Дж/кг; s_0 – энтропия, Дж/кг; s_a' – энтропия жидкости в выходном сечении сопла в состоянии насыщения, Дж/кг; T_a – температура потока на выходе из сопла, К.

Результаты испытаний сопла позволили сделать вывод о том, что одним из факторов, влияющих на эффективность процесса истечения, является время, за которое вскипающая жидкость проходит от горла сопла до его среза. А время процесса зависит от размеров сопла.

Более полную релаксацию вскипающей жидкости получим при увеличении диаметра горла сопла и соответственно длины расширяющейся части. Для подтверждения этого было изготовлено и исследовано сопло

с увеличенным диаметром горла $d_f=4$ мм и соответствующими геометрическими размерами прямо пропорционально увеличению d_f . Результаты экспериментального исследования такого сопла приведены в таблице.

Экспериментальные данные по истечению недогретой до насыщения жидкости принято обобщать по относительному недогреву $(1 - \epsilon_{so})$. Зависимость коэффициента импульса φ_i , который определяет эффективность истечения, от недогрева представлена на рис. 1.

Экспериментально определялась реакция струи R_a , кг при помощи весов с тензодатчиком (рис. 2) и давление в горле активного сопла p_g , кПа (рис. 3).

Проанализировав полученные экспериментальные данные по исследованию сопла с увеличенным диаметром горла и сопоставив их с результатами авторов работ [1-3], приходим к выводу, что процесс истечения в расширяющемся канале сопла вскипающей жидкости зависит от многих режимных и геометрических характеристик. Одно из наиболее значительных влияний, определяющих достижение максимальных значений показателей эффективности φ_i и φ_a , имеет масштабный фактор. Поэтому для более детального описания данного процесса необходимо проведение дополнительного расчетного анализа экспериментальных данных.

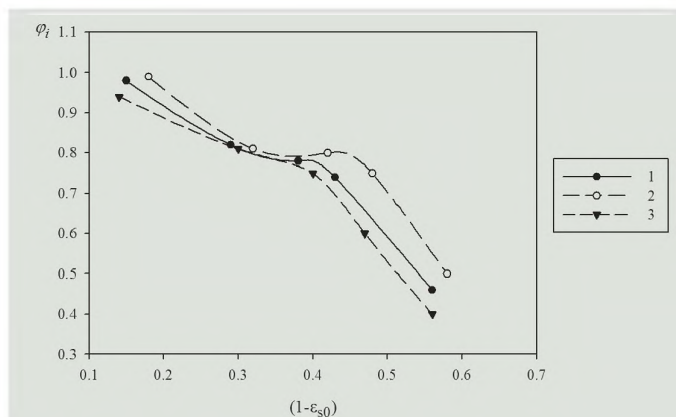


Рис. 1. Зависимость эффективности истечения от режимных параметров: 1 – $p_0=20,40$; 2 – $p_0=20,16$; 3 – $p_0=15,55$ кПа

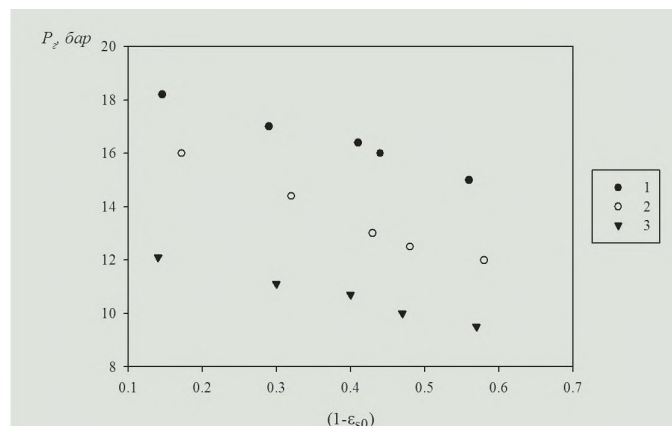


Рис. 3. Зависимость давления в горле сопла от недогрева при режимных параметрах: 1 – $p_0=20,40$; 2 – $p_0=20,16$; 3 – $p_0=15,55$ кПа

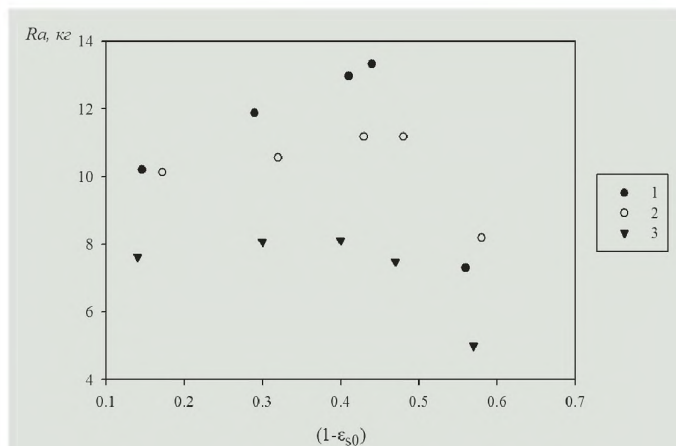


Рис. 2. Зависимость реакции струи от недогрева при режимных параметрах: 1 – $p_0=20,40$; 2 – $p_0=20,16$; 3 – $p_0=15,55$ кПа

Моделирование параметров течения

Анализ влияния масштабного фактора на эффективность жидкостно-парового струйного компрессора проводится на основе информации, полученной в результате обработки экспериментальных данных по расходу, реактивному импульсу и распределению статического давления [5, 6] путем численного решения системы уравнений сохранения [3].

Использование метода косвенных измерений при определении параметров парокапельного потока в сечении инверсии (i) дает возможность определить влияние изменения диаметра сопла в расходном сечении d_f и координаты z_v на достижимые показатели эффективности. Низкая чувствительность длины z_v к изменению геометрических параметров [1] объясняется характером течения вскипающей жидкости в устье

канала. Увеличение диаметра d_f , а следовательно и всех геометрических размеров сопла, ведет к уменьшению влияния коэффициента метастабильности вскипающей жидкости и повышению достижимых показателей сопла и компрессора в целом.

Оценка эффективности процесса

Масштабный фактор, характеризующий абсолютные геометрические размеры сопла, наряду с влиянием величины относительного недогрева жидкости и геометрической формы канала, является одним из основных показателей, определяющих эффективность процесса истечения. Проанализировав результаты численного моделирования параметров потока видно, что характерные размеры частиц жидкой фазы в полидисперсном спектре дробления не зависят от величины диаметра d_f . Это дает возможность сделать вывод о том, что при увеличении геометрических размеров сопла наблюдается существенное увеличение эффективности истечения.

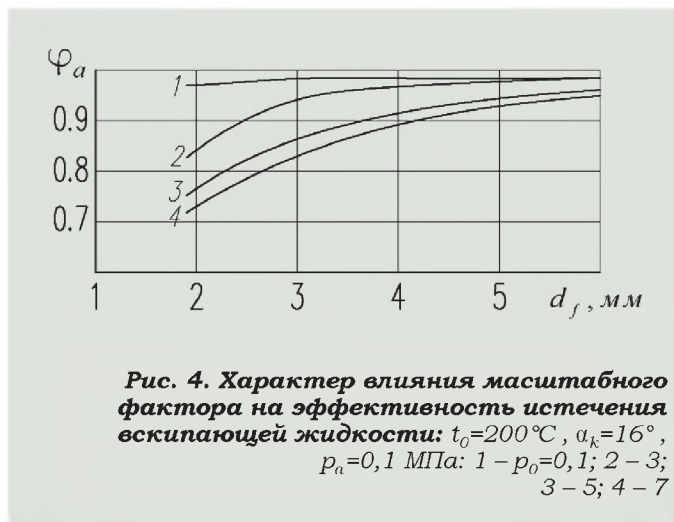


Рис. 4. Характер влияния масштабного фактора на эффективность истечения вскипающей жидкости: $t_0=200^\circ\text{C}$, $\alpha_k=16^\circ$, $p_a=0,1$ МПа: 1 — $p_0=0,1$; 2 — 3; 3 — 5; 4 — 7

При увеличении размеров канала эквивалентно увеличивается время релаксационного парообразования, что ведет к большей степени его завершенности ($(x_a/x_{as}) \rightarrow 1$) и снижению термической метастабильности ($\Delta t_{\text{жж}} \rightarrow 0$). Характер влияния масштабного фактора на эффективность истечения вскипающей жидкости показан на рис. 4.

Эффективность истечения определялась коэффициентом скорости φ_a и составила $0,85 \div 0,92$. Увеличение размеров сопла привело к более полной завершенности процесса парообразования и увеличению коэффициента скорости $\varphi_a=0,97 \div 0,98$, что видно из рис. 5.

Таким образом, влияние масштабного фактора на эффективность жидкостно-парового струйного компрессора проявляется, прежде всего, через изменение отношения времени релаксации парообразования к характерной продолжительности процесса.

Выводы

1. Экспериментально подтверждена и теоретически обоснована возможность достижения максимально высоких значений коэффициента скорости φ_a на уровне $0,97 \div 0,98$ при истечении вскипающей жидкости в

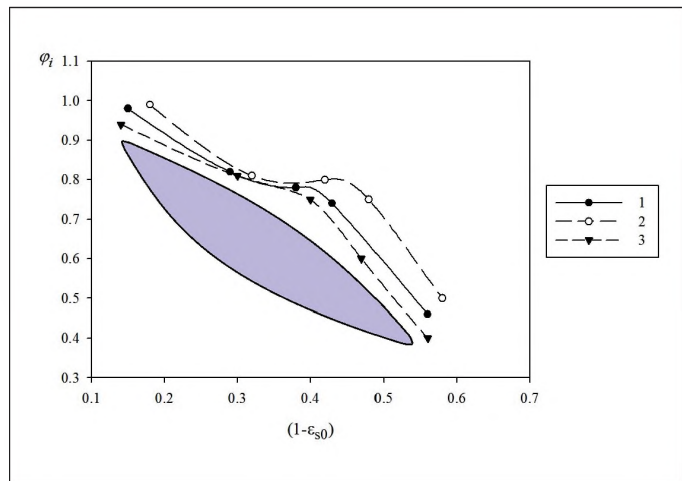


Рис. 5. Влияние масштабного фактора на коэффициент скорости φ_a : 1, 2, 3 — данные; полученные при исследовании сопла с диаметром горла $d_f=4$ мм; ■ — сопла с диаметром горла $d_f=1,7-1,8$ мм

расширяющихся соплах оптимальной геометрической формы.

2. Эффективность истечения прямопропорционально зависит от масштабного фактора, определяющего необходимую (максимальную) продолжительность процесса.

3. Уточнен численный метод расчета осредненных параметров потока вскипающей жидкости по длине канала и показателей эффективности сопла с учетом масштабного фактора процесса.

Список литературы:

1. Марченко В. Н., Жиленко Н. А. Струйная термокомпрессорная установка: назначение, принцип действия, термодинамическая модель и результаты расчетных исследований рабочего процесса // Вісник Сумського державного університету, 2004. — №13(72). — С. 50-60.
2. Марченко В. Н., Куценко С. Н., Жиленко Н. А. Экспериментальное исследование процесса формирования рабочей струи пара в термокомпрессоре // Вісник Сумського державного університету, 2005. — №12(84). — С. 48-57.
3. Марченко В. Н., Прокопов М. Г. Парообразование в адиабатных ускоряющихся потоках вскипающей жидкости // Компрессорное и энергетическое машиностроение, 2007. — №3(9). — С. 94-99.
4. Марченко В. Н., Прокопов М. Г. Расчет парообразования в ускоряющихся потоках вскипающей жидкости // Компрессорное и энергетическое машиностроение, 2007. — №4(10). — С. 98-105.
5. Тонконог В. Г., Гортышов Ю. Ф. Фазовые переходы в потоке жидкости // Труды Казанского гос. техн. университета им. А. Н. Туполева, 2004.
6. Циклаури Г. В., Данилин В. С., Селезнев Л. И. Адиабатные двухфазные течения. — М.: Атомиздат, 1973. — 448 с.
7. Дейч М. Е., Филиппов Г. А. Газодинамика двухфазных сред. — М.: Энергоиздат, 1981. — 472 с.