

Расчет и конструирование

Calculation and design

Научная статья

УДК 621.694

DOI: 10.14529/engin250101

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ИСТЕЧЕНИЯ ЖИДКОГО СНАРЯДА ИЗ СОПЛА ИМПУЛЬСНОГО ЭЖЕКТОРА

М.А. Асфандияров, *asfandiarovma@susu.ru*

Д.Р. Исмагилов, *ismagilovdr@susu.ru*

А.Х.М. Али, *ahmadalhammory377@gmail.com*

С.Б. Школин, *shkolinsb@susu.ru*

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Статья посвящена струйным насосам, которые ввиду простоты их конструкции получили широкое распространение в энергетической, металлургической, химической, нефтяной и газовой промышленности. Большинство исследователей, занимающихся струйными аппаратами, утверждают, что применение струйных аппаратов с прерыванием струи более эффективно, чем классическая схема струйного аппарата. Рассмотрен рабочий процесс эжектора с прерывистой струей или импульсного эжектора, состоящий из фазы разгона и фазы торможения. В данной статье рассматривается только первая часть рабочего процесса – фаза разгона, которая проходит при открытии канала сопла. В фазе разгона жидкости передается энергия, необходимая для совершения работы. Исследование фазы разгона позволит рассчитывать оптимальное время истечения жидкости через сопло, что позволит улучшить экстремальные характеристики эжектора с прерывистой струей, снизить затраты энергии и увеличить КПД струйного аппарата. В статье описано уравнение энергии для нестационарного истечения жидкости через сопло в дифференциальном виде, получена аналитическая зависимость мгновенной скорости истечения жидкости через сопло в функции от перепада давления на сопле, плотности жидкости, инерционной длины сопла, коэффициента сопротивления сопла и времени истечения. Проиллюстрированы зависимости мгновенной скорости истечения от времени истечения для разных значений перепада давления и инерционной длины сопла. Исходя из полученных зависимостей, определено влияние времени истечения на мгновенную скорость и энергию жидкого снаряда. Разработана методика для определения оптимального времени истечения жидкости через сопло и приведен пример расчета этого времени.

Ключевые слова: жидкий снаряд, импульсный струйный насос, физико-математическая модель, сопло с задвижкой, оптимальное время истечения, трубопроводный транспорт

Для цитирования: Расчет оптимального времени истечения жидкого снаряда из сопла импульсного эжектора / М.А. Асфандияров, Д.Р. Исмагилов, А.Х.М. Али, С.Б. Школин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2025. Т. 25, № 1. С. 5–14. DOI: 10.14529/engin250101

CALCULATION OF THE OPTIMAL TIME OF LIQUID PROJECTILE OUTFLOW FROM THE NOZZLE OF A PULSE EJECTOR

M.A. Asfandiyarov, asfandiarovma@susu.ru

D.R. Ismagilov, ismagilovdr@susu.ru

A.H.M. Ali, ahmadalhammory377@gmail.com

S.B. Shkolin, shkolinsb@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. This article is devoted to jet pumps, due to the simplicity of their design, they are widely used in the energy, metallurgical, chemical, oil and gas industries. The majority of researchers involved in inkjet devices claim that the use of jet interrupting devices is more effective than the classical scheme of an inkjet device. The working process of an ejector with an intermittent jet or a pulsed ejector consisting of an acceleration phase and a deceleration phase is considered. This article discusses only the first part of the workflow – the acceleration phase, which occurs when the nozzle channel is opened. In the liquid acceleration phase, the energy required to perform the work is transferred. The study of the acceleration phase will allow calculating the optimal time for the liquid to flow through the nozzle, which will improve the extreme characteristics of the ejector with an intermittent jet, reduce energy costs and increase the efficiency of the jet device. The article describes the energy equation for the unsteady flow of liquid through the nozzle in a differential form, an analytical dependence of the instantaneous flow rate of liquid through the nozzle on the pressure drop at the nozzle, the density of the liquid, the inertial length of the nozzle, the nozzle resistance coefficient and the expiration time is obtained. The dependences of the instantaneous flow rate on the expiration time for different values of the pressure drop and the inertial length of the nozzle are illustrated. Based on the obtained dependencies, it is possible to see the effect of the expiration time on the instantaneous velocity and energy of a liquid projectile. A technique has been developed to determine the optimal time for the liquid to flow through the nozzle and an example of calculating this time is given.

Keywords: liquid projectile, pulse jet pump, physical and mathematical model, nozzle with valve, the optimal expiration time, pipeline transport

For citation: Asfandiyarov M.A., Ismagilov D.R., Ali A.P.M., Shkolin S.B. Calculation of the optimal time of liquid projectile outflow from the nozzle of a pulse ejector. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2025:25(1):5–14. (In Russ.) DOI: 10.14529/engin250101

Введение

Струйные насосы (эжекторы) широко распространены в энергетической, металлургической, химической, нефтяной и газовой промышленности в виде вакуумных насосов, компрессоров, смесителей [1–7]. Это обусловлено простотой конструкции, отсутствием подвижных частей и возможностями размещения в труднодоступных местах [8–10]. Однако разработка и внедрение струйных насосов часто сопряжены с необходимостью оптимизации схем использования, проведения комплексных расчетов геометрических и режимных параметров насоса и системы для исходных данных каждого конкретного проекта. Кроме того, для эжекторов, работающих непрерывно и с большим потреблением активной жидкости, энергоэффективность является одним из ключевых требований при проектировании. Одно из направлений исследований, посвященных повышению эффективности эжекторов, нацелено на изучение эффектов использования пульсации активного потока. Так, в работах [11, 12] в качестве сопла активной жидкости используется струйный триггер, обеспечивающий заданную частоту пульсации потока. Такая конфигурация соплового блока также позволяет добиться лучшего перемешивания активной и пассивной сред и лучшего диспергирования газовой фракции.

В статье [13] предлагается импульсный эжектор, показанный на рис. 1, пульсация активного потока в котором осуществляется при помощи прерывателя 1, установленного в сопловом блоке 2. Авторы установили, что при малых степенях сжатия импульсный эжектор имеет более высокий КПД, чем классический жидкостно-газовый эжектор. Режим работы импульсного эжектора является «снарядным», то есть в течение времени выдержки прерывателя открытый формируется жидкий снаряд, который отсекается прерывателем при закрытии. При этом рабочий процесс такого струйного насоса основан преимущественно на сжатии газа жидкими снарядами.

Эжектор с прерывистой струей (см. рис. 1) работает циклически. Клапан-прерыватель, открывая и закрывая канал сопла (активной жидкости), создает нестационарное движение воды и воздуха в рабочей камере. При этом изменение параметров потока может происходить не только в течение одного цикла, но и от цикла к циклу [14, 15].

Рабочий процесс эжектора с прерывистой струей может быть разделен на две части: 1 – истечение активной жидкости через сопло (фаза разгона снаряда), 2 – увлечение пассивного воздуха жидким снарядом, движущимся в рабочей камере (фаза торможения наряда). Первая фаза происходит при открытии канала подачи активной жидкости, вторая – при перекрытии этого канала прерывателем.

Продолжительность формирования жидких снарядов характеризуется коэффициентом прерывистости, который выражает отношение времени истечения через сопло t_0 ко времени цикла [13]:

$$\tau_p = \frac{t_0}{t_{\text{ц}}}. \quad (1)$$

Именно в первой фазе снаряду передается энергия, за счет которой происходит работа по сжатию откачиваемого газа. Следует ожидать, что сама работоспособность импульсного струйного насоса зависит также от абсолютного времени выдержки прерывателя в состоянии «открыто» ввиду того, что жидкий снаряд должен сохранять свою целостность на всем пути от соплового блока до конца камеры смешения. А определение минимально необходимой энергии, достаточной для осуществления данного рабочего процесса, то есть оптимального времени выдержки прерывателя открытым, позволяет улучшить энергоэффективность эжектора.

Исследований, направленных на определение оптимального времени выдержки прерывателя открытым, обнаружить не удалось.

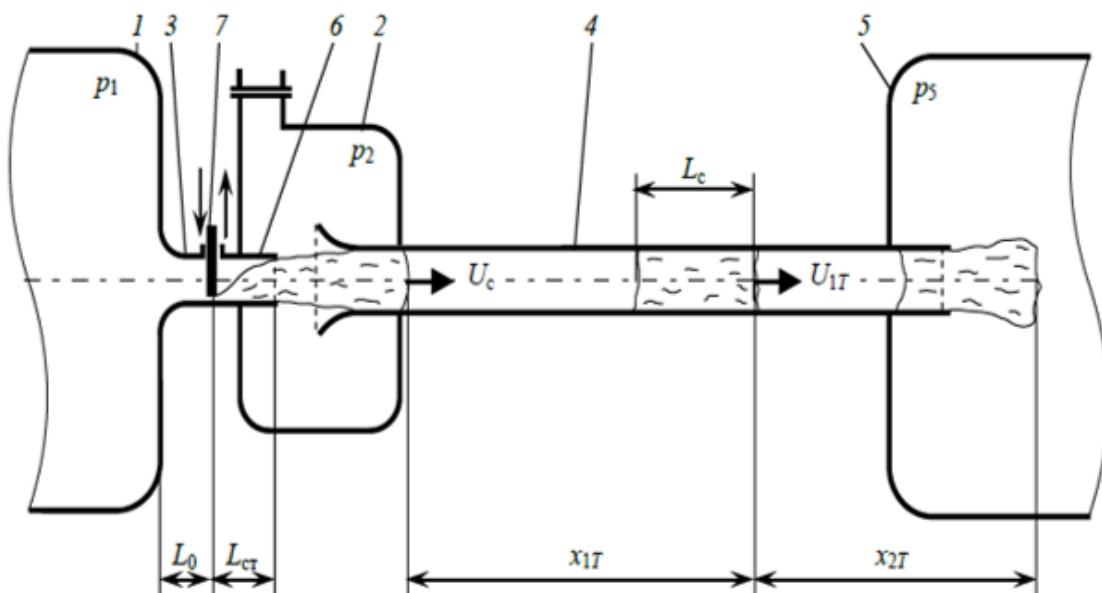


Рис. 1. Принципиальная схема струйного импульсного насоса
Fig. 1. Schematic diagram of a pulsed jet pump

Данная работа посвящена выявлению оптимального времени выдержки прерывателя активного потока струйного импульсного жидкостно-газового насоса в состоянии «открыто».

Для энергетического анализа жидкого снаряда рассматривается как несжимаемое тело, кинетическая энергия которого обеспечивает рабочий процесс импульсного эжектора. Кинетическая энергия жидкого снаряда пропорциональна квадрату его скорости, следовательно, для обеспечения наиболее эффективных режимов работы импульсного эжектора необходимо установить зависимость скорости снаряда от времени выдержки прерывателя в состоянии «открыто» [16].

Расчетная модель соплового блока

На рис. 2 показана расчетная схема соплового устройства импульсного эжектора с прерывателем [17]. При закрытом канале скорость истечения жидкости v_{cp} равна нулю. Сразу после открытия канала скорость начинает расти от нуля до величины, соответствующей стационарному режиму истечения жидкости, зависящему от перепада давления на сопле $p_1 - p_2$. В общем случае сопло может представлять собой цилиндрический насадок [18].

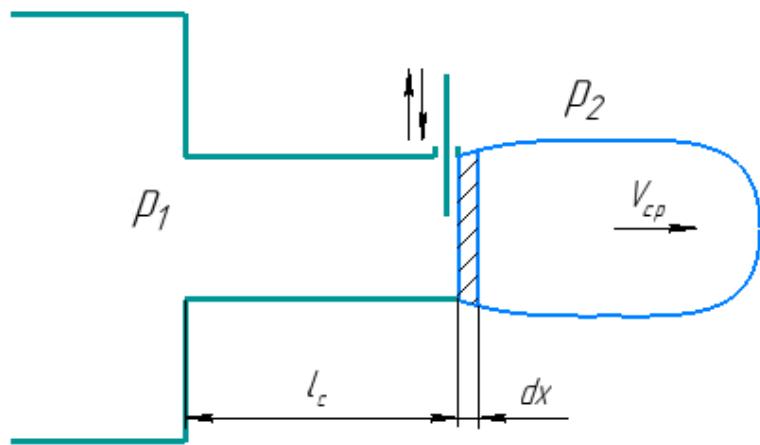


Рис. 2. Расчетная схема соплового устройства

Fig. 2. Design scheme of the nozzle device

Расчет величины скорости истечения жидкости через сопло, соответствующей стационарному режиму истечения, производится по уравнению Торричелли [19]:

$$V_{\infty} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_{12}}{(1 + \xi_c) \cdot \rho_{\text{ж}}}}, \quad (2)$$

где Δp_{12} – перепад давления на сопле; ξ_c – коэффициент сопротивления сопла; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность рабочей жидкости.

До достижения стационарной скорости истечения жидкости скорость истечения изменяется от 0 до V_{∞} . Закономерность изменения скорости на срезе сопла может быть установлена с помощью уравнения энергии, включающего следующие допущения: жидкость несжимаема, открытие канала происходит мгновенно [20]:

$$\Delta p_{12} = (1 + \xi_c) \cdot \frac{\rho_{\text{ж}} \cdot V^2}{2} + \rho_{\text{ж}} \cdot l_c \cdot \frac{dV}{dt}, \quad (3)$$

где V – скорость в выходном сечении сопла; l_c – длина разгона (инерционная длина сопла).

Таким образом, энергия перепада давления $\Delta p_{12} = p_1 - p_2$ затрачивается сначала на разгон жидкости, а потом на стационарное истечение.

Проинтегрировав уравнение (3), получаем аналитическую зависимость скорости от времени:

$$V = V_{\infty} \cdot \text{th} \left(\sqrt{\frac{\Delta p_{12} \cdot (1 + \xi_c)}{2 \cdot \rho_{\text{ж}}}} \cdot \frac{t}{l_c} \right) = V_{\infty} \cdot \text{th} \left(\frac{V_{\infty} \cdot (1 + \xi_c)}{2 \cdot l_c} \cdot t \right). \quad (4)$$

Полученная аналитическая зависимость мгновенной скорости потока при нестационарном течении от времени открытия задвижки позволяет рассчитать оптимальное время истечения жидкости через сопло.

Результаты и обсуждения

На рис. 3, 4 проиллюстрированы графические зависимости скорости истечения жидкости через сопло от времени выдержки прерывателя в состоянии «открыто» при значении коэффициента сопротивления сопла $\xi_c = 0,05$, перепадах давления 100; 200; 300 и 400 кПа и инерционных длинах 0,1; 0,3; 0,5 и 1 м.

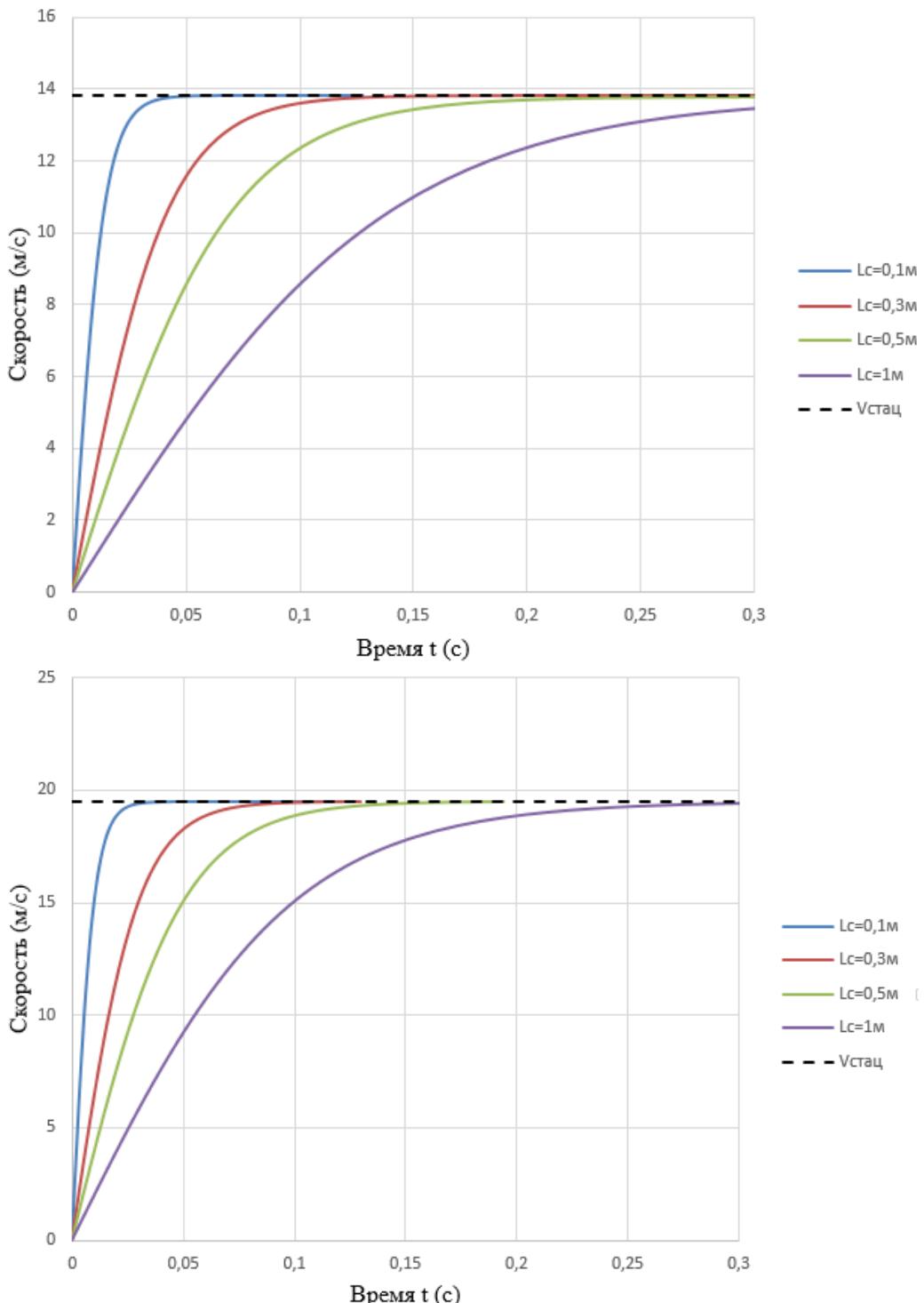


Рис. 3. График зависимости скорости от времени истечения жидкости
через сопло задвижки при 100 и 200 кПа

Fig. 3. Graph of the dependence of the velocity on the time of the liquid flow
through the valve nozzle at 100 and 200 kPa

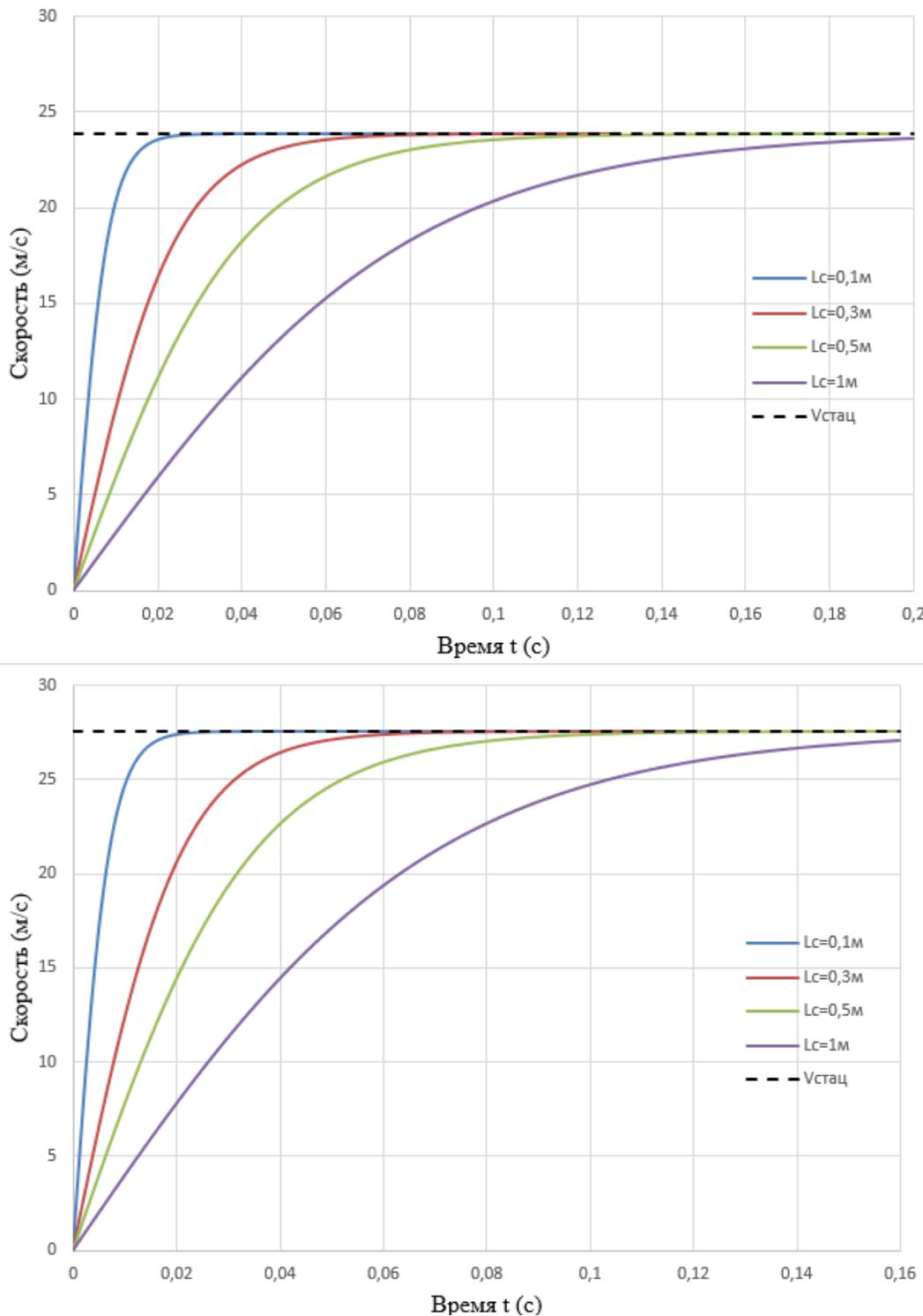


Рис. 4. График зависимости скорости от времени истечения жидкости через сопло задвижки при 300 и 400 кПа

Fig. 4. Graph of the dependence of the velocity on the time of the liquid flow through the valve nozzle at 300 and 400 kPa

Как видно из представленных графических зависимостей, при увеличении инерционной длины при одном и том же давлении время достижения стационарной скорости истечения жидкости снижается. Ранее [13] при исследовании импульсных эжекторов рассматривалось относительное время или коэффициент прерывистости, но не само время истечения жидкости через сопло. Од-

нако, как показывает данное исследование, определение времени истечения жидкости через сопло позволяет более детально анализировать рабочий процесс импульсного эжектора: например, если для инерционной длины $l_c = 1$ м время открытия задвижки принять 0,1 секунды, то мгновенная скорость жидкого снаряда составит 8,55 м/с вместо возможных 13,8 м/с при времени открытия 0,3 секунды (см. рис. 3 левая часть). Анализируя полученные графики, можно определить оптимальное значение времени открытия, при котором достигается максимальная стационарная скорость движения снаряда для разных исходных данных соплового устройства. При этом следует отметить, что максимально достижимая скорость истечения жидкости из сопла определяет начальную скорость движения снаряда в камере смешения, а следовательно, и длину камеры смешения или, в случае решения обратной задачи, давление питания активной жидкости p_1 .

Исходя из полученных результатов, можно сформулировать методику расчета выдержки прерывателя в состоянии «открыто».

Исходных данные для расчета: перепад давления на сопле – Δp_{12} ; коэффициент сопротивления сопла – ξ_c ; плотность активной жидкости $\rho_{ж}$ и инерционная длина сопла – l_c . В качестве примера примем следующие исходные данные: $\Delta p = 250$ кПа; $\xi_c = 0,05$; $\rho_{ж} = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $l_c = 0,5$ м. Алгоритм расчета следующий:

1) определяется стационарная скорость истечения по формуле (2):

$$V_\infty = \sqrt{\frac{2 \cdot 250 \cdot 10^3 \text{ Па}}{(1 + 0,05) \cdot 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}}} = 21,82 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

2) вычисляется время открытия, выраженное из уравнения (4) в явном виде:

$$t_0 = \frac{2 \cdot l_c \cdot \operatorname{cth}\left(\frac{V}{V_\infty}\right)}{V_\infty \cdot (1 + \xi_c)}; \quad (5)$$

3) рассчитывается необходимое время открытия для относительных скоростей движения жидких снарядов в некотором диапазоне с заданным шагом. Например, от 0,1 с до 1 с, с шагом 0,1. Результаты расчёта сведены в таблицу и проиллюстрированы на рис. 5.

Результаты расчета оптимального времени истечения жидкости через сопло
The results of calculating the optimal flow time of liquid through the nozzle

$\frac{V}{V_\infty}$	$t_0, \text{ с}$								
0,1	0,00438	0,3	0,0135	0,5	0,024	0,7	0,0379	0,9	0,0643
0,2	0,00885	0,4	0,0185	0,6	0,0303	0,8	0,048	0,999	0,1659

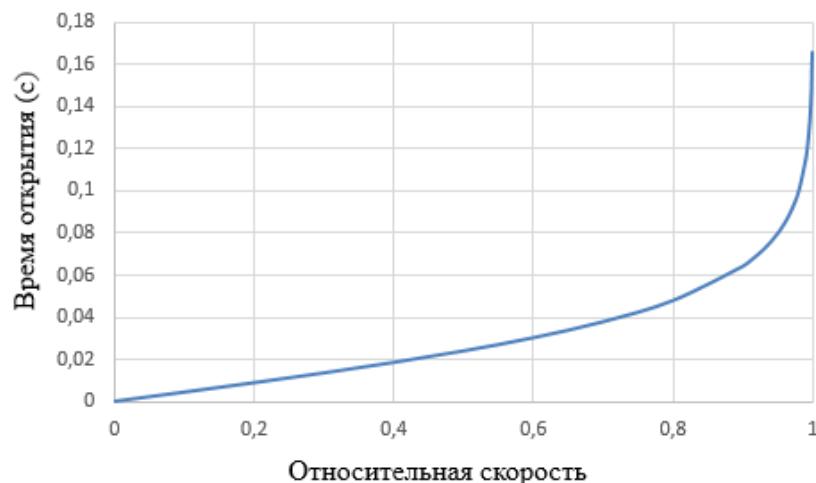


Рис. 5. Зависимость времени истечения жидкости через сопло от относительной скорости
Fig. 5. Dependence of the time of liquid flow through the nozzle on the relative velocity

В зависимости от того, какое значение скорости необходимо, выбирается оптимальное время истечения жидкости через сопло. Рис. 5 показывает, что после момента времени 0,9 с изменение скорости практически не происходит. При этом дальнейшее увеличение времени выдержки прерывателя в состоянии «открыто» приведет к уменьшению производительности импульсного струйного аппарата.

Заключение

1. Получена закономерность изменения скорости на срезе сопла импульсного эжектора с учетом введенных допущений (жидкость несжимаема, открытие канала происходит мгновенно). Показано, что удельная энергия перепада давления на сопле затрачивается сначала на разгон жидкости, а потом на стационарное истечение.

2. Получены зависимости скорости движения жидкого снаряда от времени открытия сопла, анализ графиков этих зависимостей позволяет определить оптимальное время открытия задвижки для получения максимально возможной скорости движения и, как следствие, энергии, передаваемой жидким снарядам.

3. Разработана методика для определения оптимального времени истечения жидкости через сопло.

Список литература

1. Chen J., Havitun H., Palm B. Parametric analysis of ejector working characteristics in the refrigeration system // Applied Thermal Engineering. 2014. Vol. 69. P. 130–142. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.04.047.
2. Elbel S., Lawrence N. Review of recent developments in advanced ejector technology // International Journal of Refrigeration. 2016. Vol. 62. P. 1–18. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2015.10.031.
3. Galanis N., Sorin M. Review of recent developments in advanced ejector technology // International Journal of Thermal Sciences. 2016. Vol. 104. P. 315–329. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2015.12.022.
4. Kong F.S., Jin Y.Z., Kim H.D. Analytical and computational studies on the vacuum performance of a chevron ejector // Shock Waves. 2016. Vol. 26. P. 771–788. DOI: 10.1007/s00193-015-0618-8.
5. Model optimization and mechanism analysis of two-stage ejector considering nonequilibrium condensation / Q. Han, H. Feng, H. Zhang, L. Wang, H. Xue, W. Sun, L. Jia // Energy, 2024, vol. 310, 133271. DOI: 10.1016/j.energy.2024.133271.
6. Numerical analysis of two-stage vacuum ejector performance considering the influence of phase transition and non-condensable gases / W. Sun, C. Liu, H. Zhang, W. Sun, H. Xue, L. Jia // Applied Thermal Engineering, 2022, vol. 269, 118730. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118730.
7. Performance analysis of a two-stage ejector in an ejector refrigeration system using computational fluid dynamics / N. Suvarnakuta, K. Pianthong, T. Sriveerakul, W. Seehanam // Engineering applications of computational fluid mechanics. 2020. Vol. 14, no. 1. P. 669–682. DOI: 10.1080/19942060.2020.1756913.
8. Tashtoush B.M., Al-Nim M.A., Khasawneh M.A. A comprehensive review of ejector design, performance, and applications // Applied Energy, 2019. Vol. 240. P. 138–172. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.01.185.
9. Битюцких С.Ю., Спиридовон Е.К. Исследование и расчет гидродинамики в струйном насосе // Вестник ЮУрГУ. Серия: Машиностроение. 2016. Т. 16, № 1. С. 5–15. DOI: 10.14529/engin160101.
10. Школьин С.Б. Исследование предельных режимов и разработка метода расчета жидкостно-газового эжектора: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.13. Челябинск, 2009. 159 с.
11. Bie H. Study on the bubble breakup and internal flow characteristics in the pulsed jet ejector / H. Bie, J. He, K. Chen, L. Xue, G. Liu, Z. Hao // Chemical Engineering and Processing - Process Intensification. 2024. Vol. 202. 109836. DOI: 10.1016/j.cep.2024.109836.
12. Modelling of breakage rate and bubble size distribution in bubble columns accounting for bubble shape variations / W. Shi, J. Yang, G. Li, X. Yang, Y. Zong, X. Cai // Chemical Engineering Science. 2018. Vol. 187. P. 391–405. DOI: 10.1016/j.ces.2018.05.013.

13. Spiridonov E.K., A.H. Ali Hydro-pulse compressor, working process and characteristics // 2020 International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM). 2020. P. 1–6. DOI: 10.1109/dvm49764.2020.9243908
14. Zhengyang An, Weiguo Liang. Research on Status and Development of Jet Pump. // International Conference on Mechatronics, Electronic, Industrial and Control Engineering (MEIC 2015). P. 1519–1522.
15. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. М.: Энергоатомиздат, 1989. 352 с.
16. Цегельский В.Г. Двухфазные струйные аппараты. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 408 с.
17. Пат. 110434 Российская Федерация, МПК7 F 04 F 5/00. Эжектор / П.Н. Манин. № 2011125820/06; заявл. 23.06.11; опубл. 20.11.11, Бюл. № 32.
18. Вулис Л.А., Михасенко Ю.И., Хитриков В.А. Об эффективном управлении распространением свободной турбулентной струи // Изв. АН СССР. МЖГ. 1966. № 6.
19. Васильев Ю.Н. Теория двухфазного газожидкостного эжектора с цилиндрической камерой смешения // Лопаточные машины и струйные аппараты. 1971. Вып. 5. С. 175–261.
20. Спиридовон Е.К. Формирование прерывистой струи // Динамика пневмогидравлических систем: тематич. сб. научн. тр. Челябинск: ЧПИ, 1983. С. 42–52.

References

1. Chen J., Havtun H., Palm B. Parametric analysis of ejector working characteristics in the refrigeration system. *Applied Thermal Engineering*, 2014, vol. 69, pp. 130–142. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.04.047.
2. Elbel S., Lawrence N. Review of recent developments in advanced ejector technology. *International Journal of Refrigeration*, 2016, vol. 62, pp. 1–18. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2015.10.031.
3. Galanis N., Sorin M. Review of recent developments in advanced ejector technology. *International Journal of Thermal Sciences*, 2016, vol. 104, pp. 315–329. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2015.12.022.
4. Kong F.S., Jin Y.Z., Kim H.D. Analytical and computational studies on the vacuum performance of a chevron ejector. *Shock Waves*, 2016, vol. 26, pp. 771–788. DOI: 10.1007/s00193-015-0618-8.
5. Han Q., Feng H., Zhang H., Wang L., Xue H., Sun W., Jia L. Model optimization and mechanism analysis of two-stage ejector considering nonequilibrium condensation. *Energy*, 2024, vol. 310, 133271. DOI: 10.1016/j.energy.2024.133271.
6. Sun W., Liu C., Zhang H., Sun W., Xue H., Jia L. Numerical analysis of two-stage vacuum ejector performance considering the influence of phase transition and non-condensable gases. *Applied Thermal Engineering*, 2022, vol. 269, 118730. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118730.
7. Suvarnakuta N., Pianthong K., Sriveerakul T., Seehanam W. Performance analysis of a two-stage ejector in an ejector refrigeration system using computational fluid dynamics. *Engineering applications of computational fluid mechanics*, 2020, vol. 14, no. 1, pp. 669–682. DOI: 10.1080/19942060.2020.1756913
8. Tashtoush B.M., Al-Nim M.A., Khasawneh M.A. A comprehensive review of ejector design, performance, and applications. *Applied Energy*, 2019, vol. 240, pp. 138–172. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.01.185.
9. Bityutskikh S.Yu., Spiridonov E.K. Research and Calculation of Fluid Dynamics in the Jet Pump. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 5–15. (In Russ.) DOI: 10.14529/engin160101
10. Shkolin S.B. *Issledovaniye predel'nykh rezhimov i razrabotka metoda rascheta zhidkostno-gazovogo ezhektora* [Study of limit modes and development of calculation method for liquid-gas ejector]. Cand. sci. diss., Chelyabinsk, 2009. 159 p.
11. Bie H., He J., Chen K., Xue L., Liu G., Hao Z. Study on the bubble breakup and internal flow characteristics in the pulsed jet ejector. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*. 2024, vol. 202, 109836. DOI: 10.1016/j.cep.2024.109836.
12. Shi W., Yang J., Li G., Yang X., Zong Y., Cai X. Modelling of breakage rate and bubble size distribution in bubble columns accounting for bubble shape variations. *Chemical Engineering Science*. 2018, vol. 187, pp. 391–405. DOI: 10.1016/j.ces.2018.05.013.

13. Spiridonov E.K., Ali A.H. Hydro-pulse compressor, working process and characteristics. 2020 *International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM)*. 2020, pp. 1–6. DOI: 10.1109/dvm49764.2020.9243908
14. Zhengyang An, Weiguo Liang. Research on Status and Development of Jet Pump. *International Conference on Mechatronics, Electronic, Industrial and Control Engineering (MEIC 2015)*, pp. 1519–1522.
15. Sokolov E.Y., Singer N.M. *Struynyye apparaty* [Jet devices]. Moscow, 1989. 352 p.
16. Tsegelsky V.G. *Dvukhfaznyye struynyye apparaty* [Two-phase inkjet devices]. Moscow, 2003. 408 p.
17. Manin P.N. *Ezhektor* [Ejector]. Patent. 110434 Russian Federation, IPC7 F 04 F 5/00. No. 2011125820/06; declared. 23.06.11; published. 20.11.11, Bulletin No. 32.
18. Vulis L.A., Mikhasenko Yu.I., Khitrikov V.A. On the effective control of the propagation of a free turbulent jet. *Izvestiya AN SSSR. MZhG*, 1966, no. 6. (In Russ.)
19. Vasiliev Yu.N. Theory of a two-phase gas-liquid ejector with a cylindrical mixing chamber. *Blade machines and jet devices*, 1971, iss. 5, pp. 175–261. (In Russ.)
20. Spiridonov E.K. Formation of an intermittent jet. *Dynamics of pneumohydraulic systems: Thematic collection of scientific papers*. Chelyabinsk, 1983, pp. 42–52. (In Russ.)

Информация об авторах

Асфандиаров Марат Андреевич, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Гидравлика и гидропневмосистемы», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; asfandiarovma@susu.ru

Исмагилов Денис Рашидович, старший преподаватель кафедры «Летательные аппараты», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; ismagilovdr@susu.ru

Али Ахмад Хасан Мустафа, аспирант кафедры «Гидравлика и гидропневмосистемы», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; ahmadalhammory377@gmail.com

Шкolin Сергей Борисович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Гидравлика и гидропневмосистемы», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; shkolin@susu.ru

Information about the authors

Marat A. Asfandiyarov, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department “Hydraulics and Hydropneumosystems”, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; asfandiarovma@susu.ru

Denis R. Ismagilov, Senior Lecturer of the Department “Aeronautical Engineering”, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; ismagilovdr@susu.ru

Ahmad Hassan Mustafa Ali, Postgraduate student of the Department of “Hydraulics and Hydropneumosystems”, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; ahmadalhammory377@gmail.com

Sergey B. Shkolin, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department “Hydraulics and Hydropneumosystems”, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; shkolin@susu.ru

Статья поступила в редакцию 06.02.2025; принята к публикации 07.02.2025.

The article was submitted 06.02.2025; accepted for publication 07.02.2025.