

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

NEW TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.527
DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-100-108



ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ЗАПОРНОГО УСТРОЙСТВА ЭЖЕКЦИОННОГО ТИПА ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ВЫХЛОПА АГРЕССИВНЫХ ГАЗОВ

Спиридонов Е.К., Исмагилов А.Р., Хабарова Д.Ф.

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Челябинская область изобилует промышленными предприятиями, на которых используются различные теплообменные аппараты – реакторы, входящие в состав фьюминг-печей, конвертеров, печей для выплавки стали погружным факелом, барботажных колонн, аппаратов гетерогенного катализа и химического синтеза и др. В таких аппаратах протекают химические реакции под давлением при высоких температурах, сопровождающиеся фазовыми переходами. Продукты реакции в них составляют существенную долю вредных выхлопов в окружающую среду во время загрузки сыпучего материала во внутреннюю полость реактора. При загрузке запорное механическое устройство открыто. Химические реакции протекают под давлением выше атмосферного, что приводит к выхлопу агрессивных газов через загрузочное отверстие. Вместе с тем работа механических запорных устройств сопровождается частыми выходами из строя. В качестве альтернативы механическому запорному устройству предлагается установка пневматического запорного устройства эжекционного типа, не содержащего подвижных механических частей. Предотвращение выброса вредных газов осуществляется противоточной высокоскоростной струей воздуха, истекающей из сопла запорного устройства в загрузочную трубу, являющуюся смесительной камерой эжектора. Это существенно снижает загрязнение окружающей среды. Вместе с тем нагнетание в реактор через эжекторное устройство дополнительного количества воздуха интенсифицирует химические процессы в реакторе. В пневматическом запорном устройстве протекает сложный газодинамический процесс смешения активного и пассивного потоков газа или смеси. На сегодняшний день отсутствует теория расчета пневматических запорных аппаратов эжекционного типа. В данной статье предложены математическая модель рабочего процесса и методика расчета и проектирования пневматического запорного устройства эжекционного типа, позволяющая разрабатывать пневматические затворы с минимальным потребным расходом воздуха.

Ключевые слова: выхлоп, агрессивные газы, запорное устройство, эжектор, пневматический затвор, математическая модель, характеристики, методика расчета

Работа поддержана грантом РФФИ 22-29-20084.

© **Спиридонов Е.К.**, Исмагилов А.Р., Хабарова Д.Ф., 2023

Для цитирования

Спиридонов Е.К., Исмагилов А.Р., Хабарова Д.Ф. Исследование и разработка пневматического запорного устройства эжекционного типа для предотвращения выхлопа агрессивных газов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №1. С. 100-108. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-100-108>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF A PNEUMATIC SHUT-OFF DEVICE OF AN EJECTION TYPE TO PREVENT THE EXHAUST OF HAZARDOUS GASES

Spiridonov E.K., Ismagilov A.R., Khabarova D.F.

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The Chelyabinsk Region is home to many industrial companies, applying various heat and mass transfer facilities, namely reactors of fuming furnaces, basic oxygen furnaces, bubble columns, heterogeneous catalysis and chemical synthesis facilities, etc. The said facilities operate with chemical reactions at pressure and high temperatures accompanied by phase transitions. The products of these reactions make up a significant share of hazardous environmental emissions during the charging of bulk material into the internal chamber of the reactor. A mechanical shut-off device is open when charging. The chemical reactions take place at excessive pressure, which leads to the exhaust of hazardous gases through the charging opening. At the same time, the operation of mechanical shut-off devices is associated with relatively frequent failures. The paper presents a pneumatic ejection-type shut-off device that does not contain moving mechanical parts as an alternative to a mechanical shut-off device. Hazardous emissions are prevented by a countercurrent high-speed air jet from the nozzle of the shut-off device into the charging tube, which is also a mixing chamber of the ejector. This significantly reduces environmental pollution. Moreover, injection of additional air into the reactor through the ejector device intensifies the chemical processes in the reactor. A complex gas-dynamic process of mixing active and passive gas or mixture flows takes place in such pneumatic shut-off device. There is no available theory for calculating ejection-type pneumatic shut-off devices. This paper presents a mathematical model of the operating process and a calculation method for designing an ejection-type pneumatic shut-off device, which allows developing pneumatic gates with minimum required air consumption.

Keywords: exhaust, hazardous gases, shut-off device, ejector, pneumatic gates, mathematical model, characteristics, calculation method

The research was funded by the grant from the Russian Science Foundation, No. 22-29-20084.

For citation

Spiridonov E.K., Ismagilov A.R., Khabarova D.F. Research and Development of a Pneumatic Shut-Off Device of an Ejection Type to Prevent the Exhaust of Hazardous Gases. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 1, pp. 100-108. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-100-108>

Введение

Многие технологические процессы на промышленных предприятиях Челябинской области (металлургическая, химическая промышленности и смежные отрасли) сопровождаются выхлопами агрессивных газов, ухудшающих экологическую обстановку окружающей среды. Рассматриваемые технологические процессы сопровождаются загрузкой сыпучего материала во внутреннюю полость реактора (рис. 1). При загрузке запорное механическое устройство открыто. Химические реакции протекают под давлением выше атмосферного, что приводит к выхлопу агрессивных газов через загрузочное устройство. Вместе с тем работа механических запорных устройств сопровождается частыми выходами из строя [1].

Эжектор является динамической гидромашиной трения, работающей, как правило, в непрерывном режиме [2-5]. Данный аппарат не со-

держит подвижных частей, а значит, его конструкция является высоконадёжной [6-9]. Установка пневматического запорного устройства эжекторного типа (рис. 2) предотвратит выхлоп агрессивных газов противотоком газа или смеси газов под давлением, равным или превышающим давление в реакторе.

Расчётная модель пневматического запорного устройства

Процесс загрузки реактора сыпучим материалом сопровождается повышенным противодавлением p_5 . В реакторе происходят непрерывные химические процессы с выделением продуктов сгорания в твёрдой и газовой фазовых состояниях. Далее продукты сгорания покидают аппарат через верхний канал (см. рис. 1). При загрузке материала эжектирование обновлённого газа прекращается и дальнейшее перемещение сыпучего материала осуществляется под действием

силы тяжести в направлении увеличения давления (осевой градиент давления является положительным). Таким образом, расчёт аппарата рассматривается при максимальном перепаде давлений между полостью реактора и входом в пневматическое запорное устройство.

На сегодняшний день недостаточно изучены явления обратных токов в струйных течениях с положительным осевым градиентом давления и

отсутствует законченная теория расчета пневматических аппаратов эжекционного типа.

Для расчета пневматического запорного устройства эжекционного типа применена схема газового эжектора со сверхзвуковым соплом (см. рис. 2) [10, 11]. Его работа сопровождается сложным гидромеханическим процессом энергообмена активной и пассивной среды при их смешении в проточной части аппарата.

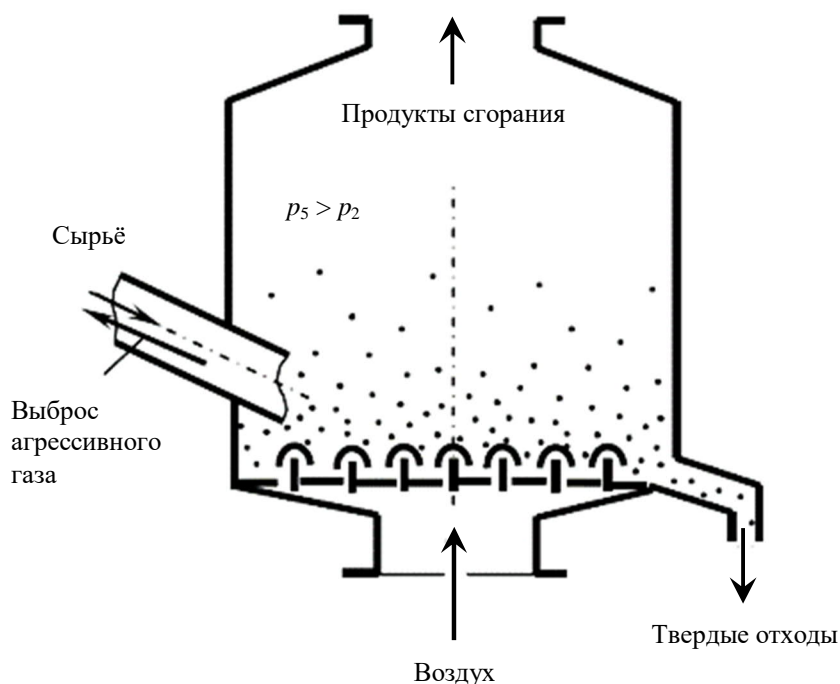


Рис. 1. Реактор с противодействием
Fig. 1. A back-pressure reactor

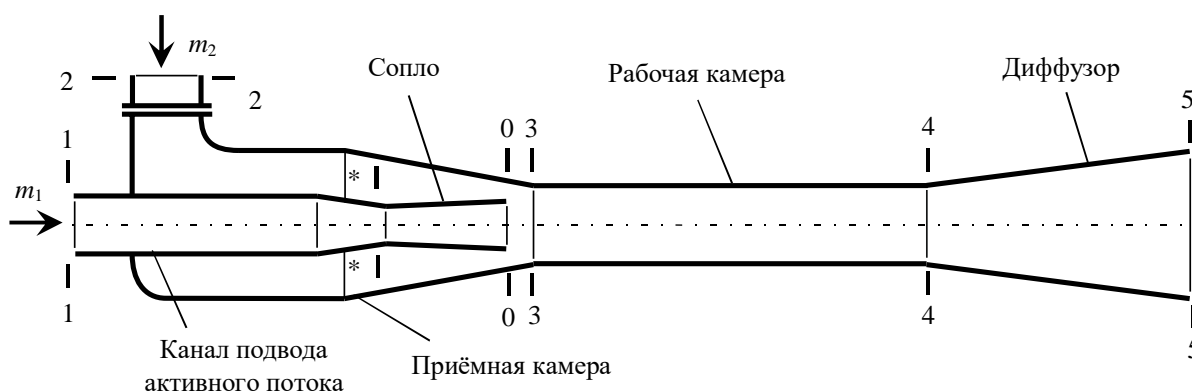


Рис. 2. Расчетная схема пневматического запорного устройства эжекционного типа
Fig. 2. Calculation diagram of an ejection-type pneumatic shut-off device

Физико-математическая модель

Разработана физико-математическая модель на основе уравнений состояния, сохранения массы, количества движения и энергии в канале загрузки, рабочей камере и канале выхлопа:

$$\frac{p_5 - p_2}{p_2} = k \cdot \Pi_{кр} \cdot \frac{d_{кр}^2}{d_3^2} \cdot \frac{p_1}{p_2} \times \left[\psi \cdot \lambda_0 - \varepsilon_{кр} \cdot (\varphi - 0,5) \cdot \frac{d_{кр}^2}{d_3^2} \cdot \frac{v_5}{v_1} \right]; \quad (1)$$

$$\frac{m_1}{S_3} = \frac{k \cdot \Pi_{кр}}{u_{кр}} \cdot \frac{d_{кр}^2}{d_3^2} \cdot p_1, \quad (2)$$

где p_i – давление потоков в i -м сечении; k – постоянная адиабаты (для воздуха $k = 1,4$); $\Pi_{кр}$ и $\varepsilon_{кр}$ – газодинамические функции (для воздуха $\Pi_{кр} = 0,528$; $\varepsilon_{кр} = 0,634$); $d_{кр}$, d_3 – диаметры сечения горловины соплового устройства и загрузочного трубопровода; $\psi = 0,831$; $\varphi = 1,143$ – безразмерные параметры, учитывающие потери удельной энергии потока в проточной части запорного устройства. Соответствуют внутреннему профилю элементов проточной части, обтекание которых средой происходит с минимальными потерями энергии; $\lambda_0 = u_0 / u_{кр}$ – приведенная скорость потока в выходном сечении сопла, равная отношению скорости потока к критической скорости; $v_i = 1 / \rho_i$ – удельный объём газа в i -м сечении; m_1 – массовый расход активного потока; S_3 – площадь сечения рабочей камеры; $u_{кр}$ – критическая скорость газового потока,

$$u_{кр} = \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot R \cdot T_1}{k + 1}}; \quad (3)$$

R – газовая постоянная (для воздуха $R = 287$ Дж/(кг·К)).

Решая систему уравнений (1)-(3), рассматривая модель совершенного газа, получаем

$$0,615 \cdot \frac{d_{кр}^2}{d_3^2} \cdot \lambda_0 \cdot \frac{p_1}{p_2} - 0,344 \times \frac{d_{кр}^2}{d_3^2} \cdot \frac{p_1^2}{p_2 \cdot p_5} \cdot \frac{T_5}{T_1} - \frac{p_5 - p_2}{p_2} = 0; \quad (4)$$

$$m_1 = 0,01 \cdot \frac{\pi \cdot d_{кр}^2 \cdot p_1}{\sqrt{T_1}}. \quad (5)$$

Полученные выражения позволили установить взаимосвязь между ключевыми режимными и геометрическими параметрами:

- давлением питания p_1 ;
- массовым расходом активного потока газа m_1 ;
- давлением в реакторе p_5 ;
- давлением в приёмной камере p_2 ;
- абсолютными температурами активного потока T_1 и среды в реакторе T_5 ;
- соотношением площадей сечения горловины соплового устройства $S_{кр}$ и загрузочного трубопровода S_3 :

$$\frac{S_{кр}}{S_3} = \frac{d_{кр}^2}{d_3^2}. \quad (6)$$

Полученные результаты и их обсуждение

На графике **рис. 3** представлены результаты расчётов, показывающие влияние увеличения температуры активного потока T_1 , поступающего в реактор, на его массовый расход m_1 при различных диаметрах горловины соплового устройства: $d_{кр} = 60; 65; 70; 75; 80$ мм. Рассматривалось устройство с диаметром камеры смешения $d_3 = 300$ мм, работающим в следующих условиях: абсолютное давление в приёмной камере (загрузочная ёмкость) $p_2 = 100$ кПа, противодавление в выходном сечении запорного устройства (внутренняя полость реактора) $p_5 = 115$ кПа. Принимая во внимание, что осуществляется рекуперация тепловой энергии путём направления её с реактора на вход запорного устройства, температуры активного потока T_1 и в реакторе T_5 равны.

Из графика на **рис. 3** видно, что увеличение температуры активного потока газа T_1 уменьшает его массовый расход m_1 и энергозатраты на работу пневматического затвора эжекционного типа. Установка устройства в реакторе позволит использовать тепловую энергию, так как рабочие процессы в нём протекают при повышенных температурах, достигающих 1000°C и выше [1]. Более того, через пневматическое запорное устройство эжекционного типа возможен подвод нового воздуха, в котором содержащийся кислород ускорит химические реакции в печи.

Предлагаемая конструкция представлена на **рис. 4**. Здесь подвод нагретого газа осуществляется из полости, сопряженной с реактором, через зазор в форме кольца в поперечном сечении.

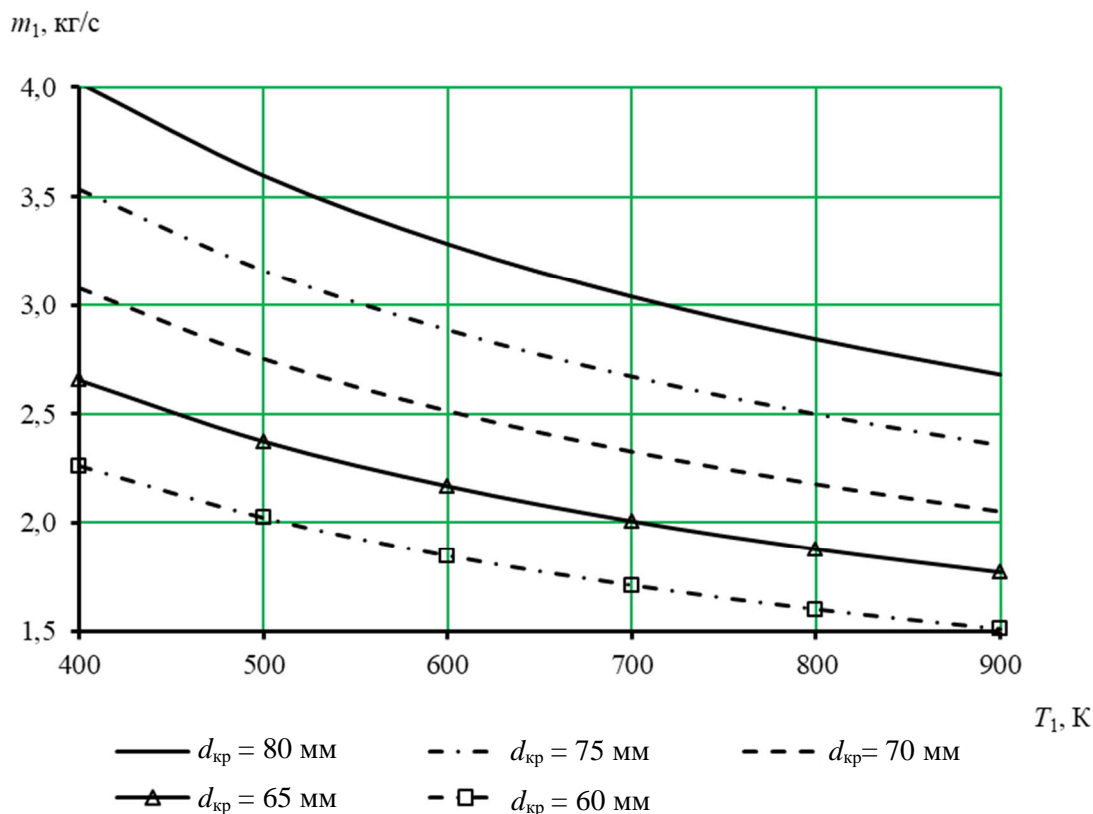


Рис. 3. Влияние температуры и диаметра горловины соплового устройства на массовый расход при условиях $p_1 = 400$ кПа, $p_2 = 100$ кПа, $p_5 = 115$ кПа, $d_3 = 300$ мм
 Fig. 3. Influence of temperature and nozzle throat diameter on mass flow at $p_1 = 400$ kPa, $p_2 = 100$ kPa, $p_5 = 115$ kPa, $d_3 = 300$ mm

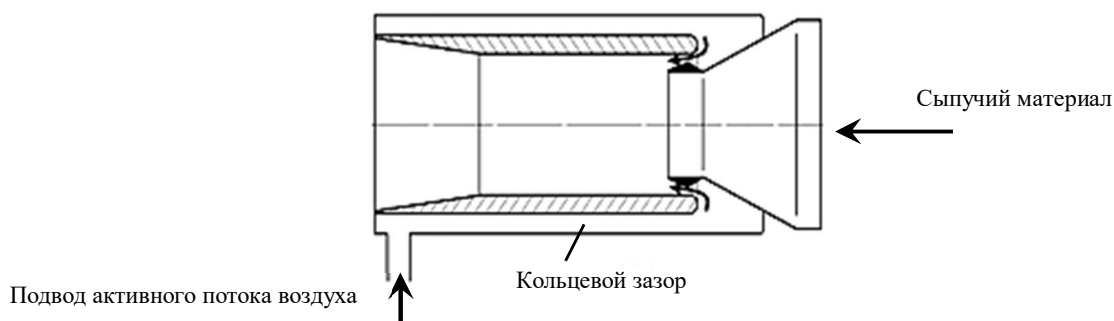


Рис. 4. Конструкция пневматического запорного устройства эжекционного типа
 Fig. 4. Design of an ejection-type pneumatic shut-off device

Для получения результатов, которые могут быть использованы в качестве универсальных рекомендаций при проектировании устройства рассмотрим характеристику с соотношениями одноимённых величин (рис. 5): степень расширения потока p_1/p_2 , степень сжатия газа p_5/p_2 , соотношение температур в реакторе и во входном канале T_5/T_1 . Данные соотношения физических параметров сопоставлены с соотношением площадей сечения горловины соплового устройства и загрузочного трубопровода $S_{кр} / S_3$.

График на рис. 5 показывает взаимосвязь между геометрическими и физическими параметрами, а именно между соотношением площадей сечения горловины соплового устройства и загрузочного трубопровода $S_{кр} / S_3$ и степени расширения потока p_1/p_2 при нескольких значениях степени сжатия газа p_5/p_2 , равных 1,05; 1,10; 1,15; 1,20. Расчёты проводились для воздуха ($k = 1,4$; $R = 287$ Дж/(кг·К)) при равных температурах активного потока газа T_1 и среды в реакторе T_5 , то есть соотношении $T_5/T_1 = 1$.

На графике (см. **рис. 5**) видно, что кривые являются убывающими, то есть с увеличением степени расширения потока p_1/p_2 потребное соотношение площадей $S_{кр}/S_3$ уменьшается. При увеличении степени сжатия газа p_5/p_2 кривые располагаются выше, то есть при постоянных входных затратах энергии на формирование активного газового потока ($T_1 = \text{const}$, $p_1 = \text{const}$) и увеличении противодействия p_5 потребный диаметр горловины соплового устройства $d_{кр}$ увеличивается.

Для нескольких соотношений температуры активного потока газа и среды в реакторе $T_5/T_1 = 1; 2; 3$ на **рис. 6** представлены характеристики, выражающие зависимость соотношения площадей проходных сечений соплового устройства и загрузочной трубы $S_{кр}/S_3$ от степе-

ни расширения потока p_1/p_2 . Семейства кривых изображены для степеней сжатия газа $p_5/p_2 = 1,1; 1,2$. Видно, что с увеличением соотношения T_5/T_1 кривая располагается выше, то есть потребная площадь горловины соплового устройства увеличивается. Как было показано на **рис. 3**, уменьшение температуры активного потока T_1 приводит к увеличению его потребного расхода m_1 . Увеличенному потребному расходу активного потока m_1 , в свою очередь, соответствует увеличенная пропускная способность соплового устройства путём увеличения диаметра горловины $d_{кр}$. Для одного и того же устройства ($S_{кр}/S_3 = \text{const}$) при увеличении температуры T_5 в реакторе потребуется увеличение давления питания активного потока газа p_1 .

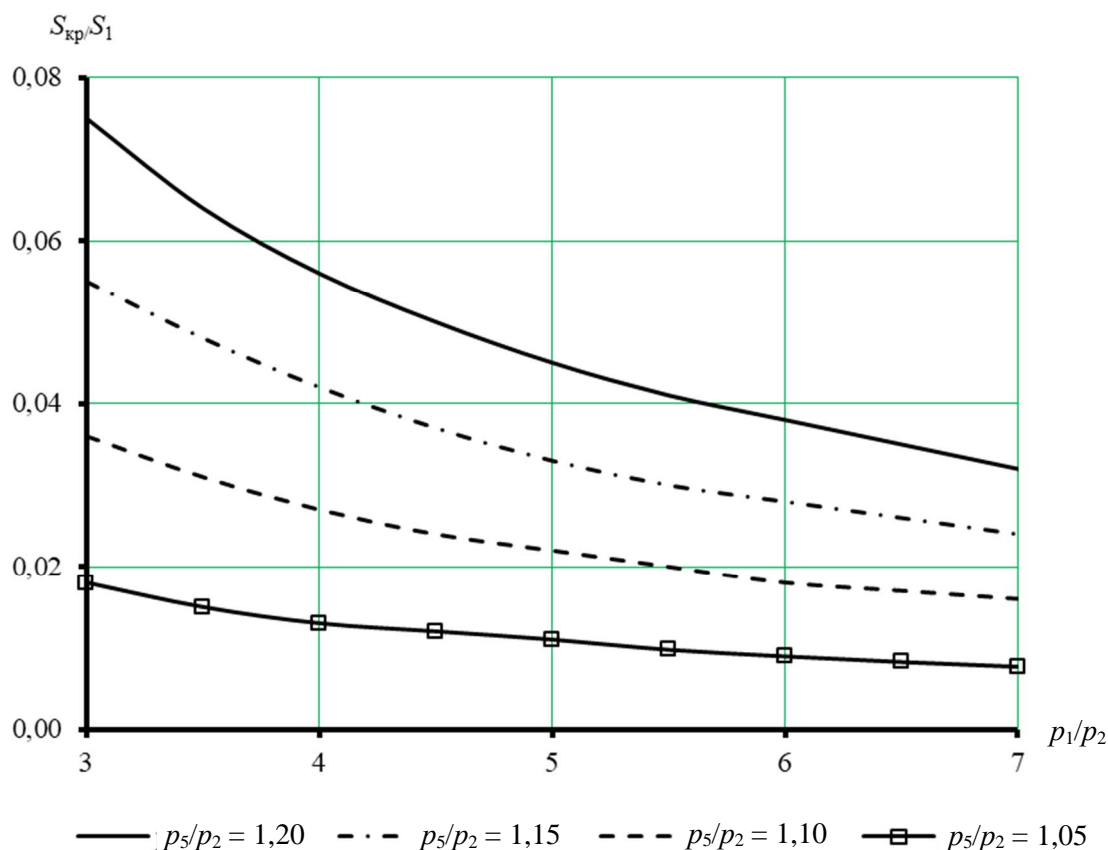


Рис. 5. Зависимость площадей сечения горловины соплового устройства и загрузочного трубопровода от степени расширения струи активного потока при условиях $T_5 = T_1$, $k = 1,4$, $R = 287$ кДж/(кг·К)

Fig. 5. Dependence between the nozzle throat and charging tube cross-section areas and the active flow jet expansion ratio at $T_5 = T_1$, $k = 1,4$, $R = 287$ kJ/(kg·K)

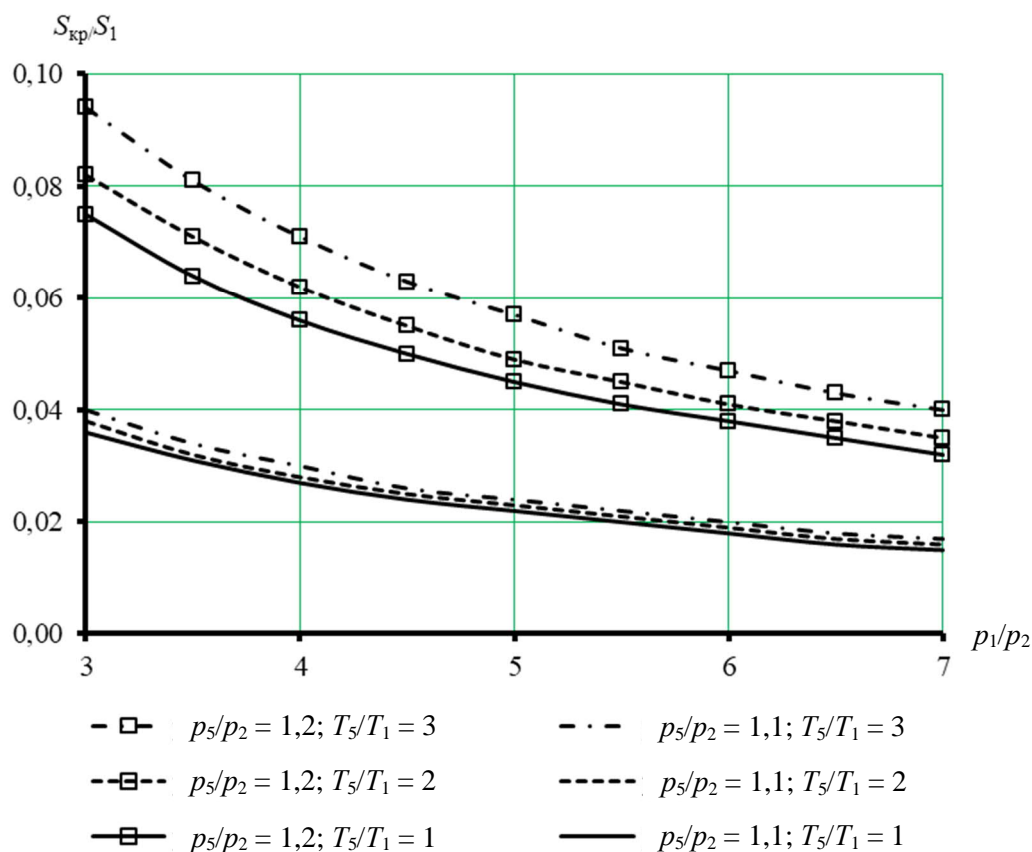


Рис. 6. Влияние степени расширения струи активного потока на соотношение площадей сечения горловины соплового устройства и загрузочного трубопровода для нескольких p_5/p_2 при $k = 1,4, R = 287$ кДж/(кг·К)
 Fig. 6. Influence of the active flow jet expansion ratio on the ratio of the cross-sectional areas of the nozzle throat and the charging tube for several values of p_5/p_2 at $k = 1,4, R = 287$ kJ/(kg·K)

Методика расчёта

Представленные расчётные зависимости (3)-(6) и графики (см. рис. 4, 5), а также рекомендации в литературе [2, 4] позволяют рассчитать основные технические показатели работы пневматического запорного устройства эжекционно-го типа (m_1, m_2, p_2) и спрофилировать геометрию проточной части ($d_{кр}, d_0, d_3$, осевые размеры). Для этого при известных параметрах в канале питания p_1, T_1 и в выходной ёмкости (реакторе) p_5, T_5 рассчитывают давление в приёмной камере p_2 и соотношение площадей сечения горловины соплового устройства и загрузочного трубопровода $S_{кр} / S_3$. Диаметр рабочей камеры d_3 принимают равным, исходя из размеров существующего загрузочного устройства печи. Отсюда находят диаметр горловины $d_{кр}$ соплового устройства. Далее с помощью газодинамических функций рассчитывается массовый расход активного потока газа m_1 и диаметр выходного сечения сопла d_0 .

Пример результата расчёта устройства

Рассмотрим результаты расчёта для запорного устройства с диаметром рабочей камеры $d_3 = 400$ мм, работающем при давлениях питания p_1 , равных 300, 400, 500, 600, 700 кПа, абсолютных температурах активного потока T_1 , равных 773, 873, 973 К, абсолютном давлении в печи $p_5 = 110$ кПа. При этом давление в приёмной камере приравняем к давлению в помещении цеха $p_2 = 100$ кПа. В таблице представлены результаты расчётов массового расхода активного потока m_1 и соответствующие им диаметры критического сечения сопла $d_{кр}$.

Из таблицы видно, что с увеличением давления питания газа перед соплом p_1 снижается величина требуемого диаметра горловины соплового устройства. При этом массовые расходы активного потока газа m_1 практически не меняются. Однако с увеличением температуры T_1 достигается уменьшение расхода m_1 . Таким образом, рекуперация тепловой энергии путём её передачи от реактора к активному потоку газа позволит получить экономию затрат энергии.

Таблица. Результаты расчёта массового расхода воздуха перед соплом пневматического запорного устройства эжекционного типа

Table. Calculation of the mass air flow rate in front of the ejection-type pneumatic shut-off device

Давление питания p_1 , кПа	Диаметр критического сечения сопла $d_{кр}$, мм	Температура активного потока газа T_1 , К	Массовый расход воздуха m_1 , кг/с
300	76	773	1,958
400	66	773	1,969
500	59	773	1,967
600	54	773	1,977
700	50	773	1,977
700	50	873	1,861
700	50	973	1,763

Заключение

Предложено запираение загрузочного устройства реактора осуществлять пневматическим запорным устройством эжекционного типа взамен механического аналога. Описана физико-математическая модель рабочего процесса устройства, устанавливающая взаимосвязь между физическими режимными параметрами с основными геометрическими размерами. Представлены характеристики, показывающие влияние увеличения температуры активного потока газа на снижение его массового расхода. Предложена конструкция, позволяющая организовать подачу активного потока газа для эжектирования выхлопных агрессивных газов. Описана методика расчёта запорного устройства и представлены её результаты.

Таким образом, результаты могут быть применены в качестве рекомендаций для эксплуатации устройств на промышленных предприятиях в зависимости от физических условий, геометрических размеров системы, условий монтажа.

Список источников

1. Основы металлургического производства / В.А. Бигеев, К.Н. Вдовин, В.М. Колокольцев и др. СПб.: Лань, 2017. 615 с.
2. Александров В.Ю., Климовский К.К. Оптимальные эжекторы (теория и расчёт). М.: Машиностроение, 2012. 136 с.: ил.
3. Zucker R.D., Biblarz O. Fundamentals of Gas Dynamics, 3rd Edition. Wiley, 2019. 560 p.
4. Аркадов Ю.К., Зернов В.Р., Шмуклер Б.Ю. Эжекторные системы газонаполнения аварийных плотов и трапов гражданских самолетов // Ученые записки ЦАГИ. 1992. Т. 23. № 3. С. 54-59.
5. Guerrero A.P., Paredes G.E. Linear and Non-linear Stability Analysis in Boiling Water Reactors. The Design of Real-Time Stability Monitors. Woodhead Publishing Series in Energy, 2019. 465 p.

6. Liquid-Gas Jet Pump: A Review / H. Zhang, D. Zou, X. Yang, J. Mou, Q. Zhou, M. Xu // Energies. 2022, vol. 15, no. 19. Article 6978.
7. Hydraulic characteristics of liquid-gas ejector pump with a coherent liquid jet / J. Haidl, K. Mařík, T. Moucha, F.J. Rejl, L. Valenz, M. Zednikova // Chemical Engineering Research and Design. 2021, vol. 168, pp. 435-442.
8. Bhatkar V.W., Sur A. An experimental analysis of liquid air jet pump // Frontiers in Heat and Mass Transfer. 2021, vol. 17. Article 12.
9. Research on performance optimization of gas-liquid ejector in multiphase mixed transportation device / J. Zhao, X. Wei, J. Zou, Y. Zhang, J. Sun, Z. Liu // Journal of Mechanics. 2022, vol. 38, pp. 22-31.
10. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. 3-е изд., перераб. М.: Энергоатомиздат, 1989. 352 с.
11. Бачурин А.Б., Русак А.М., Целищев В.А. Экспериментальные и теоретические исследования особенностей течения в регулируемых соплах с центральным телом // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2010. Т. 14. № 5 (40). С. 52-61.

References

1. Bigeev V.A., Vdovin K.N., Kolokoltsev V.M. *Osnovy metallurgicheskogo proizvodstva* [Fundamentals of metallurgical production]. Saint Petersburg: Lan; 2017. 615 p. (In Russ.)
2. Alexandrov V.Yu., Klimovsky K.K. *Optimalnye ezhektory (teoriya i raschet)* [Optimal ejectors (theory and calculation)]. Moscow: Mashinostroenie; 2012. 136 p. (In Russ.)
3. Zucker R.D., Biblarz O. Fundamentals of gas dynamics. 3rd Edition. Wiley; 2019. 560 p.
4. Arkadov Yu.K., Zernov V.R., Shmukler B.Yu. Ejector gas filling systems for emergency rafts and evacuation slides of civil aircraft. *Uchenye zapiski TsAGI* [TsAGI (Central Aerohydrodynamic Institute) Science Journal]. 1992;23(3):54-59. (In Russ.)
5. Guerrero A.P., Paredes G.E. Linear and non-linear stability analysis in boiling water reactors. The Design of Real-Time Stability Monitors. Woodhead Publishing Series in Energy; 2019. 465 p.

6. Zhang H., Zou D., Yang X., Mou J., Zhou Q., Xu M. Liquid-gas jet pump: A review. *Energies*. 2022;15(19):6978.
7. Haidl J., Mařík K., Moucha T., Rejl F.J., Valenz L., Zednikova M. Hydraulic characteristics of liquid-gas ejector pump with a coherent liquid jet. *Chemical Engineering Research and Design*. 2021;168:435-442.
8. Bhatkar V.W., Sur A. An experimental analysis of liquid air jet pump. *Frontiers in Heat and Mass Transfer*. 2021;17:12.
9. Zhao J., Wei X., Zou J., Zhang Y., Sun J., Liu Z. Research on performance optimization of gas-liquid ejector in multiphase mixed transportation device. *Journal of Mechanics*. 2022;38:22-31.
10. Sokolov E.Ya., Zinger N.M. *Struinye apparaty* [Jet devices]. Moscow: Energoatomizdat; 1989. 352 p. (In Russ.)
11. Bachurin A.B., Rusak A.M., Tselishchev V.A. Experimental and theoretical studies of flow features in adjustable nozzles with a central body. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Ufa State Aviation Technical University]. 2010;14(5(40)):52-61. (In Russ.)

Поступила 05.12.2022; принята к публикации 28.01.2023; опубликована 27.03.2023
Submitted 05/12/2022; revised 28/01/2023; published 27/03/2023

Спиридонов Евгений Константинович – доктор технических наук, заведующий кафедрой гидравлики и гидропневмосистем, старший научный сотрудник, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: spiridonovek@susu.ru. ORCID 0000-0001-5268-6292

Исмагилов Александр Рашидович – кандидат технических наук, доцент, научный сотрудник, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: ismagilovar@susu.ru. ORCID 0000-0001-6538-0727

Хабарова Дарья Федоровна – кандидат технических наук, доцент, научный сотрудник, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: khabarovadf@susu.ru. ORCID 0000-0003-0251-0138

Evgeniy K. Spiridonov – DrSc (Eng.), Head of the Department of Hydraulics and Hydraulic and Pneumatic Systems, Senior Researcher, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: spiridonovek@susu.ru. ORCID 0000-0001-5268-6292

Aleksandr R. Ismagilov – PhD (Eng.), Associate Professor, Researcher, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: ismagilovar@susu.ru. ORCID 0000-0001-6538-0727

Darya F. Khabarova – PhD (Eng.), Associate Professor, Researcher, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: khabarovadf@susu.ru. ORCID 0000-0003-0251-0138