

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАПОРНОГО УСТРОЙСТВА ВИХРЕВОГО ТИПА

Д.Ф. Хабарова, khabarovadf@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0251-0138>
А.Р. Исмагилов, ismagilovar@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6538-0727>
А.В. Подзерко, podzerkoav@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9079-3523>
И.И. Лазарев, ilya.iazarev@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0006-8129-9842>

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Современные технологии получения материалов включают химические реакции, протекающие при избыточном давлении и высоких температурах, сопровождающиеся фазовыми переходами. Такие процессы протекают в аппаратах сернокислотного производства, гетерогенного катализа и химического синтеза, в аппаратах для сушки, обжига и плавления сыпучих материалов и других печах. Рассматриваемые технологические процессы сопровождаются загрузкой сыпучего материала во внутреннюю полость аппарата – реактор. При этом окно загрузки материала герметизируется, как правило, механическим запорным устройством, которое открывается в стадии технологического процесса, сопровождающегося загрузкой сырья в реактор. При этом герметичность реактора нарушается и возможен выброс газов в окружающую среду, что несет угрозу здоровью рабочего персонала и экологии в целом.

Данная статья посвящена экспериментальному изучению газодинамических характеристик потока воздуха на срезе кольцевого сопла пневматического запорного устройства вихревого типа. В работе приведен анализ методов изучения газодинамических параметров вихревых течений с обоснованием выбора метода изучения, а также описание лабораторной установки и контрольно-измерительной аппаратуры для исследования. В результате исследований получены распределения полного давления от осевой составляющей скорости и проанализирована его структура. Также построены диаграммы распределения осевой составляющей скорости активного воздуха в исследуемом сечении и получено уточненное распределение скорости вдоль радиуса сопла. Полученные в ходе исследования результаты свидетельствуют о работоспособности аппарата, могут быть применены при физико-математическом описании рабочего процесса вихревого пневматического затвора, а также при разработке методики оптимального профилирования устройства.

Ключевые слова: агрессивные газы, запорное устройство, пневматический затвор, экспериментальные исследования

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20084, <https://rscf.ru/project/22-29-20084/>

Для цитирования: Экспериментальное исследование запорного устройства вихревого типа / Д.Ф. Хабарова, А.Р. Исмагилов, А.В. Подзерко, И.И. Лазарев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2023. Т. 23, № 4. С. 80–90. DOI: 10.14529/engin230407

EXPERIMENTAL STUDY OF A VORTEX-TYPE SHUT-OFF DEVICE

D.F. Khabarova, khabarovadf@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0251-0138>

A.R. Ismagilov, ismagilovar@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6538-0727>

A.V. Podzerko, podzerkoav@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9079-3523>

I.I. Lazarev, ilya.iazarev@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0006-8129-9842>

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Modern technologies for obtaining materials include chemical reactions occurring at excess pressure and high temperatures accompanied by phase transitions. Such processes take place in devices for sulfuric acid production, heterogeneous catalysis and chemical synthesis, in devices for drying, burning and melting bulk materials and other furnaces. The technological processes under consideration are accompanied by the loading of bulk material into the internal cavity of the apparatus – the reactor. In this case, the material loading window is sealed by a mechanical locking device which opens at the stage of the technological process, accompanied by loading of raw materials into the reactor. In this case, the air-tightness of the reactor is broken and gases can be released into the environment, which poses a threat to the health of the working staff and the environment as a whole.

The article focuses on an experimental study of the gas-dynamic characteristics of the air flow at the exit of the annular nozzle of a vortex-type pneumatic shut-off device. The paper analyzes the methods for studying hydro-gas-dynamic parameters of vortex flows with justification for the choice of the study method. It also describes the laboratory setup and instrumentation for the study. The results of the research include the distribution of total pressure from the axial component of velocity and its structure. We also constructed the diagrams of the distribution of the axial component of the active air velocity and obtained a refined velocity distribution along the nozzle radius. The results of the study indicate the operability of the device and can be used in the physical and mathematical description of the working process of a vortex pneumatic shut-off device, as well as in the development of methods for optimal profiling of the device.

Keywords: hazardous gases, shut-off device, pneumatic shut-off device, experimental study

Acknowledgments. The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-29-20084, <https://rscf.ru/project/22-29-20084/>

For citation: Khabarova D.F., Ismagilov A.R., Podzerko A.V., Lazarev I.I. Experimental study of a vortex-type shut-off device. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*. 2023;23(4):80–90. (In Russ.) DOI: 10.14529/engin230407

Введение

Цель и актуальность исследования. Технологические процессы химической отрасли промышленности, сопровождающиеся различными физико-химическими взаимодействиями, такими как тепло- и массоперенос, фазовые переходы, как правило, происходят в специальных аппаратах под избыточным давлением – реакторах [1, 2]. Загрузка сырья в рабочую полость связана с необходимостью разгерметизации реактора при открытии механического затвора канала загрузки. В этот период технологического процесса возможен выброс газов, являющихся продуктами реакции, из полости реактора в окружающую среду, что представляет угрозу здоровью рабочего персонала и окружающей среде в целом. Разгерметизация реактора непосредственно связана с принципом работы механических запорных устройств, имеющих два рабочих состояния: «закрыто», при котором обеспечивается герметичность реактора, и «открыто», при котором полость реактора сообщается с окружающей средой. Во избежание выброса агрессивных газов в процессе загрузки целесообразно применение газодинамических запорных устройств вихревого и эжекционного типа [3–6]. Данная статья посвящена исследованию газодинамики рабочего процесса запорного устройства вихревого типа, которое предотвращает выхлоп газов из реактора, создавая вихревые и циркуляционные течения непосредственно в области канала загрузки сыпучего материала.

Обзор литературы. В работе [5] описана конструкция вихревого пневматического затвора, позволяющего осуществлять запираение избыточного давления в полости реакторов аппаратов

химического и металлургического производства. Данная конструкция, как и затвор эжекторного типа [6], не имеет подвижных частей и поэтому является высоконадежной. Однако физико-математическое описание и анализ рабочего процесса и разработка методики оптимального профилирования аппарата вихревого типа требуют корректного определения распределения составляющих компонентов скорости и давления в сечениях аппаратов. Это связано со сложностью математического описания и прогноза гидрогазодинамической картины вихревых течений. Для решения этой задачи, как правило, проводят экспериментальные и численные исследования [7–20].

Так, в работе [7] авторы провели исследования гидродинамической картины вихревых потоков в гиперзвуковом прямооточном воздушно-реактивном двигателе для уточнения инженерных методик расчёта аппарата, а в статье [8] представлены исследования структуры течения в воздушно-вихревом биореакторе. Авторы обоих исследований для измерения скорости потока применяли метод PIV, а в работе [7] составляющие компоненты скорости находились при помощи PIV-метода. PIV-метод позволяет определить поля скоростей с высокой точностью, а также получить качественную визуализацию потока, однако является дорогостоящим. Поэтому в некоторых случаях целесообразным считается проведение численного моделирования вихревых потоков в аппаратах.

Средства вычислительной гидродинамики (CFD) широко применяются для моделирования работы аппаратов, основанных на вихревых эффектах [9–20]. Так, в статье [9] анализируется поле вихревого потока и производительность циклонного сепаратора твердой фракции и газа, а в работе [10] определяются характеристики аппарата для уменьшения эрозионного износа при транспортировке мелких частиц с использованием CFD. Однако применение средств вычислительной гидродинамики при изучении вихревых течений затруднено адекватным выбором параметров моделирования, а также необходимостью верифицировать выбранную расчетную модель [11].

Исходя из вышеизложенного следует, что экспериментальные методы исследования вихревых потоков проще методов применения вычислительной гидродинамики, которые в ряде случаев требуют верификации расчетной модели экспериментальным путем, но являются дорогостоящими. Однако использование PIV-метода для экспериментального изучения аппаратов, основанных на вихревых эффектах, не всегда оправдано, и возможно применение более простых инструментов для проведения эксперимента.

Постановка проблемы и формулирование гипотезы. Настоящее исследование направлено на изучение газодинамических параметров потока на срезе кольцевого сопла в пневматическом запорном устройстве вихревого типа при различной геометрии лопастного направляющего аппарата, а также влияния геометрии направляющего аппарата на характеристики затвора. Задачами работы являются анализ локализации очагов низкого давления относительно межлопаточного канала, то есть распределения давления по радиусу сопла, что характеризует запирающие свойства затвора, распределение осевой составляющей скорости, характеризующее эжекционные качества затвора в режиме загрузки, а также установление зависимости максимального запираемого давления в реакторе от давления активного воздуха при различном числе и угле установки лопаток направляющего аппарата. Для решения поставленных задач применен экспериментальный метод исследования.

Структура работы

В работе дается описание лабораторного стенда и контрольно-измерительной аппаратуры. Приводится описание методики проведения экспериментального исследования, которое состояло из двух этапов. Показаны результаты измерений полного давления и скорости газового потока на срезе сопла в виде пространственных и контурных диаграмм, а также в виде зависимостей максимального запираемого давления от давления активного воздуха при использовании направляющих аппаратов с числом лопаток $n = 4$ и $n = 14$. Приводится анализ полученных результатов.

Материалы и методы

Испытательный стенд показан на рис. 1, а его принципиальная схема – на рис. 2.

Центробежный компрессор К (см. рис. 2) с частотным регулированием служил для создания потока газа с минимальным уровнем пульсации давления, дополнительное выравнивание давления перед испытуемым пневматическим затвором обеспечивалось установкой ресивера Р. Давление в ресивере Р регистрировалось при помощи цифрового манометра МН1. Массовый расход активного воздуха вычислялся по перепаду давлений на кольцевом сопле запорного устройства.

Избыточное давление реактора имитировалось в рабочей камере КР при помощи дросселя ДР и регистрировалось манометром МН2. При критическом режиме (срыве режима запирания) воздух из системы сбрасывался через устройство выхлопа в составе пневматического запорного устройства ПЗ в атмосферу, имитируя выброс агрессивных газов из реактора. О наступлении критического режима работы ПЗ сигнализировал лепестковый индикатор, установленный на конце центральной трубки ПЗ.

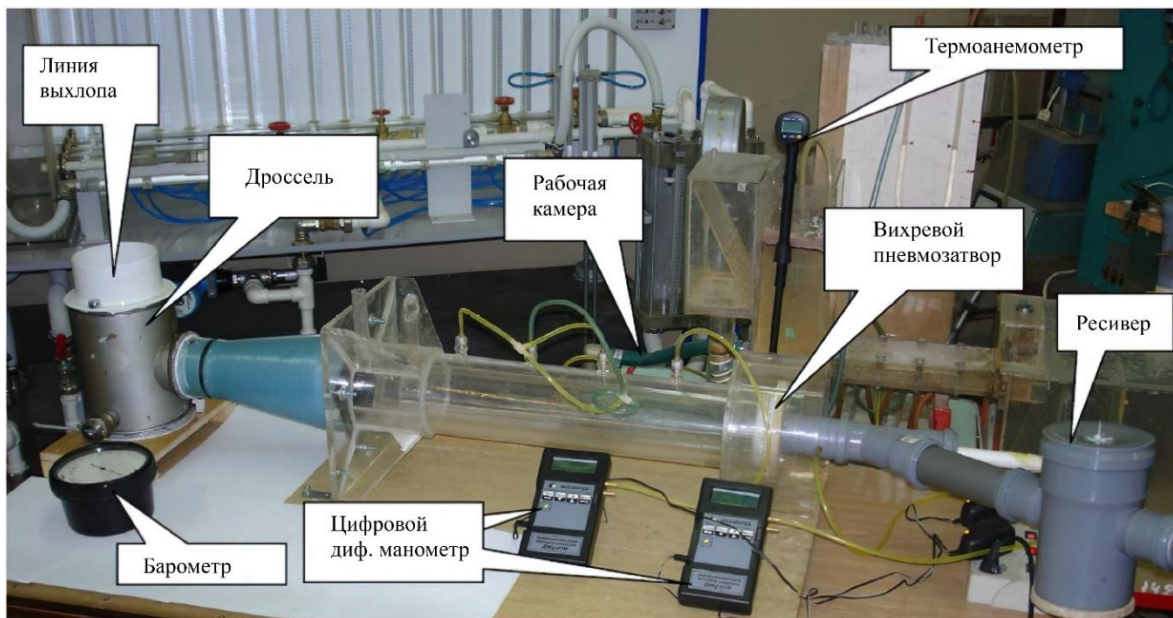


Рис. 1. Испытательный стенд
Fig. 1. Test bench

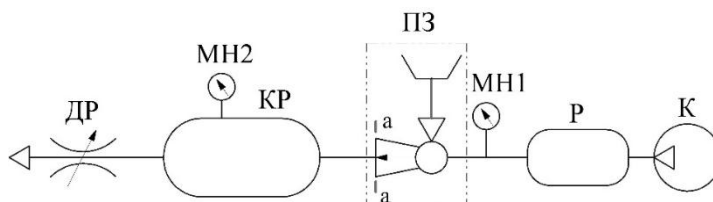


Рис. 2. Принципиальная схема испытательного стенда
Fig. 2. Schematic diagram of the test bench

В качестве контрольно-измерительной аппаратуры в испытательном стенде использовались следующие приборы:

- термометрический анемометр цифровой Testo 405-V1 (№ 0560.4051) с диапазоном измеряемых скоростей $(0..10) \pm 0,1$ м/с при температуре $(-20... +50)$ °С для измерения скорости газового потока на срезе сопла и температуры окружающей среды;
- барометр-анероид М67 (№ 164, 2011 г. в.) для контроля давления окружающей среды;
- дифференциальные цифровые манометры ДМЦ-01М (№ 03099, ПНО «ЭКО-ИНТЕХ», 2007 г. в.) для измерения давлений на характерных участках установки;
- цифровой фототахометр АТТ-6000 (№ АВ.73799, «АКТАКОМ», рег. № 27264-04) с диапазонами измеряемых частот $(5... 9,999) \pm (0,1... 1)$ об/мин для определения частоты вращения вала нагнетателя.

В момент срыва режима запирания регистрировались давление и температура активного воздуха и давление в КР. Для этого использовались цифровой термоанемометр Testo 405-V1 и трубка Пито, подключенная к дифференциальному цифровому манометру ДМЦ-01М. Трубка Пито перемещалась по вертикали и горизонтали при помощи двухкоординатного механизма зубчато-реечного типа с точностью позиционирования 0,1 мм.

Для проведения экспериментальных исследований использованы уже имеющиеся два пневматических затвора вихревого типа с числом и углом установки лопаток направляющего аппарата $n = 4$, $\alpha = 42^\circ$ и $n = 14$, $\alpha = 64^\circ$.

Исследование проводилось в два этапа. На первом этапе было получено распределение полного давления от осевой составляющей скорости в сечении $a-a$ на срезе кольцевого сопла (см. рис. 2). Для этого пневматический затвор изучался отдельно от реактора и устанавливался на собственной раме. Полное давление от осевой составляющей скорости измерялось при помощи трубки Пито, подключенной к цифровому дифференциальному манометру. Для регистрации распределения полного давления на срезе кольцевого сопла трубка Пито перемещалась посредством двухкоординатного механизма. Схема установки трубки Пито относительно кольцевого среза сопла испытываемого затвора показана на рис. 3.

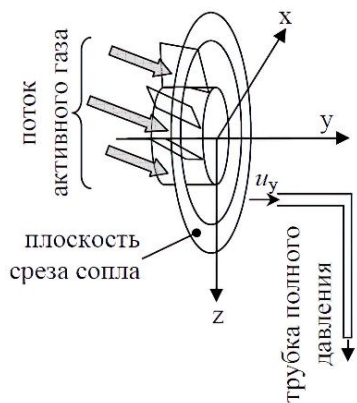


Рис. 3. Схема установки трубки Пито относительно среза кольцевого сопла
Fig. 3. Diagram of Pitot tube installation relative to the annular section of the nozzle

На втором этапе исследований определялись сочетания параметров для каждого из двух испытываемых пневматических затворов в момент наступления критического режима работы – срыва режима запирания, а также определялось требуемое давление активного газа в зависимости от противодавления в реакторе (рабочей камере). При этом исследование проводилось следующим образом. При полностью открытом дросселе ДР запускался компрессор К, требуемое давление перед кольцевым соплом p_1 достигалось путем частотного регулирования компрессора К, постепенным закрытием дросселя ДР увеличивалось давление в рабочей камере КР до момента отклонения лепесткового индикатора.

По результатам первого этапа экспериментальных исследований построены диаграммы, иллюстрирующие распределения на срезе кольцевого сопла полного давления от осевой составляющей скорости $p_{\text{полн}}$ и скорости активного газа u , показанные на рис. 4–7.

Результаты и обсуждения

По результатам первого этапа экспериментальных исследований построены диаграммы, иллюстрирующие распределения на срезе кольцевого сопла полного давления от осевой составляющей скорости $p_{\text{полн}}$ и скорости активного газа u , показанные на рис. 4–7.

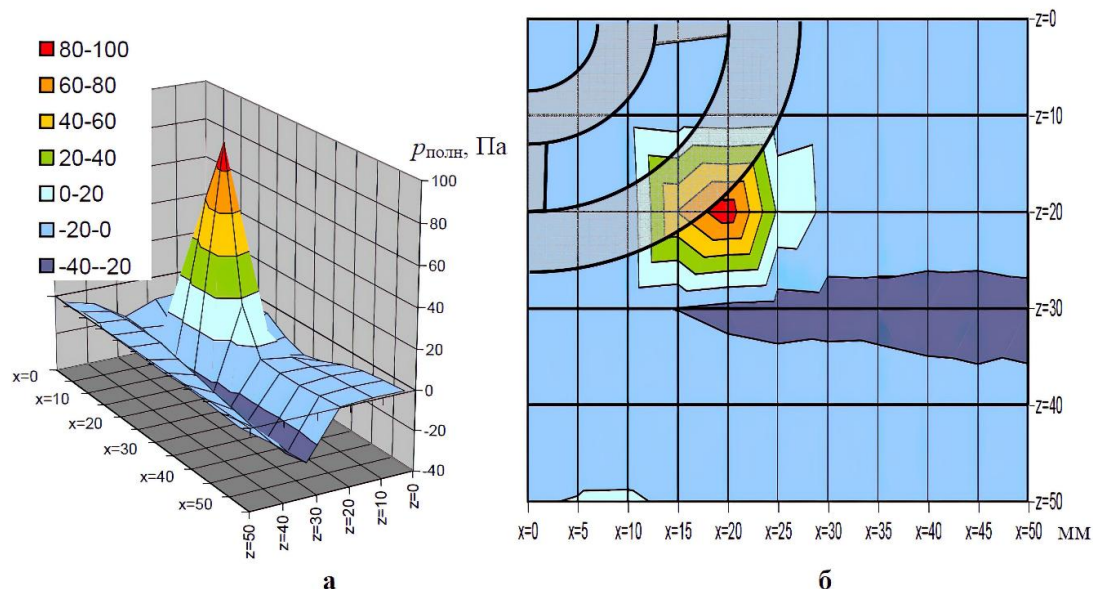


Рис. 4. Поле полного давления на срезе кольцевого сопла при $n = 4$
Fig. 4. Total pressure field at the exit of the annular nozzle at $n = 4$

На рис. 4, а показана поверхностная диаграмма распределения полного давления для пневматического затвора с количеством лопаток направляющего аппарата $n = 4$. Диаграмма имеет пиковую структуру в области межлопаточного канала, через который протекает поток активного

воздуха. Смещение пиков относительно среза сопла обусловлено тем, что измерение при помощи трубки Пито производилось на некотором удалении от среза. Также на рис. 4, а видно, что в зоне загрузочного канала присутствует зона пониженного давления, косвенно подтверждающая работоспособность затвора. На рис. 4, б показана контурная диаграмма распределения полного давления, которая в сущности представляет собой вид сверху пространственной диаграммы на рис. 4, а. Для удобства анализа на контурную диаграмму нанесена геометрия среза сопла. На рис. 4, б также видна зона разрежения в области загрузки.

Диаграммы поля полного давления, полученные при испытании пневматического затвора с направляющим аппаратом, имеющим число лопаток $n = 14$, показаны на рис. 5. Пространственная диаграмма имеет схожую пиковую структуру, при этом отсутствие четких контуров пиков объясняется низкой частотой измерений, производимых по площади среза сопла. Отсутствие смещения пика относительно сопла в данном случае может говорить о преобладании осевой составляющей скорости над тангенциальной и, следовательно, о лучших эжекционных свойствах направляющего аппарата в сравнении с предыдущим.

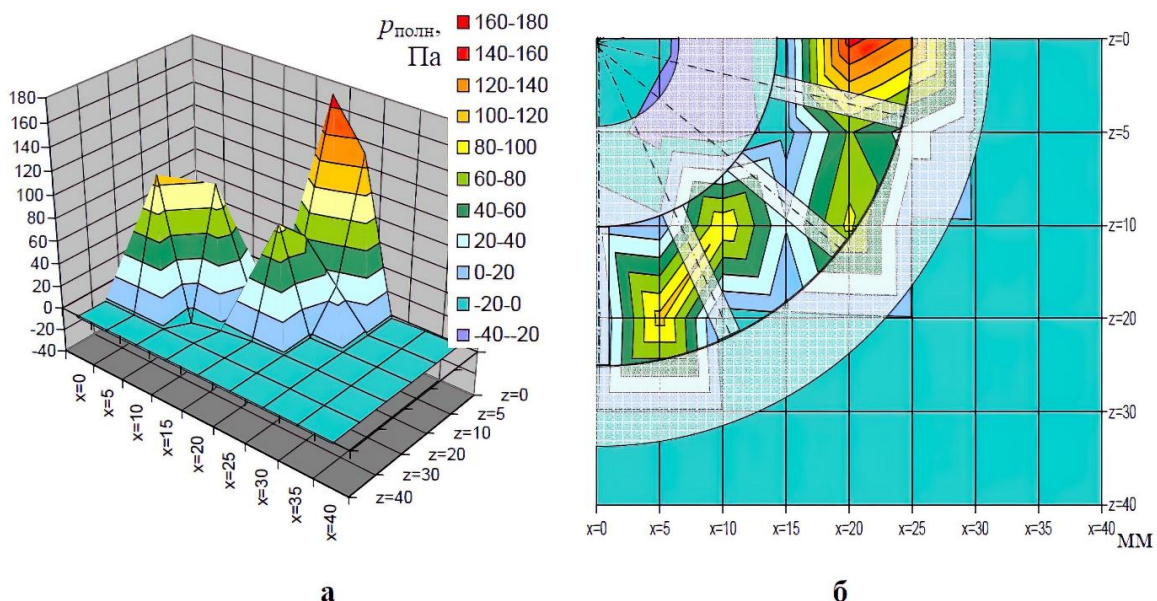


Рис. 5. Поле полного давления на срезе кольцевого сопла при $n = 14$
Fig. 5. Total pressure field at the exit of the annular nozzle at $n = 14$

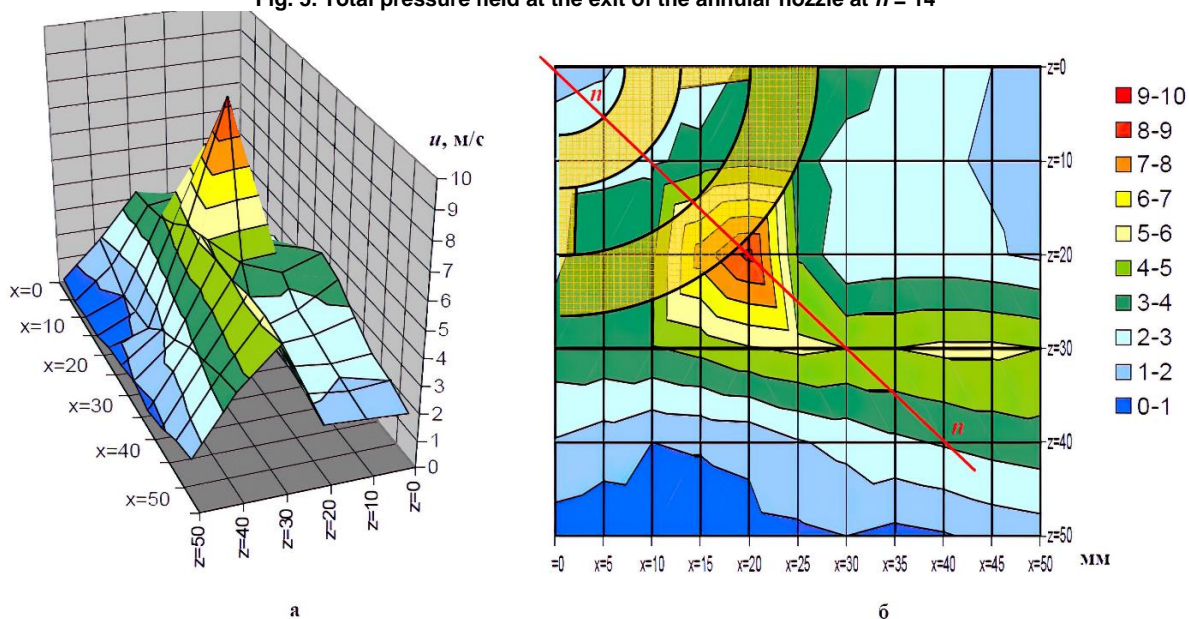


Рис. 6. Поле скорости на срезе кольцевого сопла при $n = 4$
Fig. 6. Velocity field at the exit of the annular nozzle at $n = 4$

На рис. 6 показаны пространственная и контурная диаграммы, иллюстрирующие поле осевой составляющей скорости газового потока на срезе кольцевого сопла. На рис. 7 изображено уточненное распределение скорости вдоль радиуса пневматического затвора в направлении нормали $n-n$, проведенной через геометрический центр сопла и пиковое значение скорости (см. рис. 6). Верхняя и нижняя кривые на рис. 7 построены по границам диапазона разброса проведенных измерений. Как видно по кривым на рис. 7, осевая составляющая скорости в пределах кольцевого сопла нарастает от центра к периферии. Кроме того, видно, что пиковое значение скорости достигается за пределами кольцевого сопла вблизи его внешней границы. При этом следует отметить, что незначительная величина скорости в зоне загрузки объясняется отсутствием имитации противодействия реактора при проведении первого этапа экспериментальных исследований – в таких условиях испытуемый затвор работает в режиме пневматического транспорта.

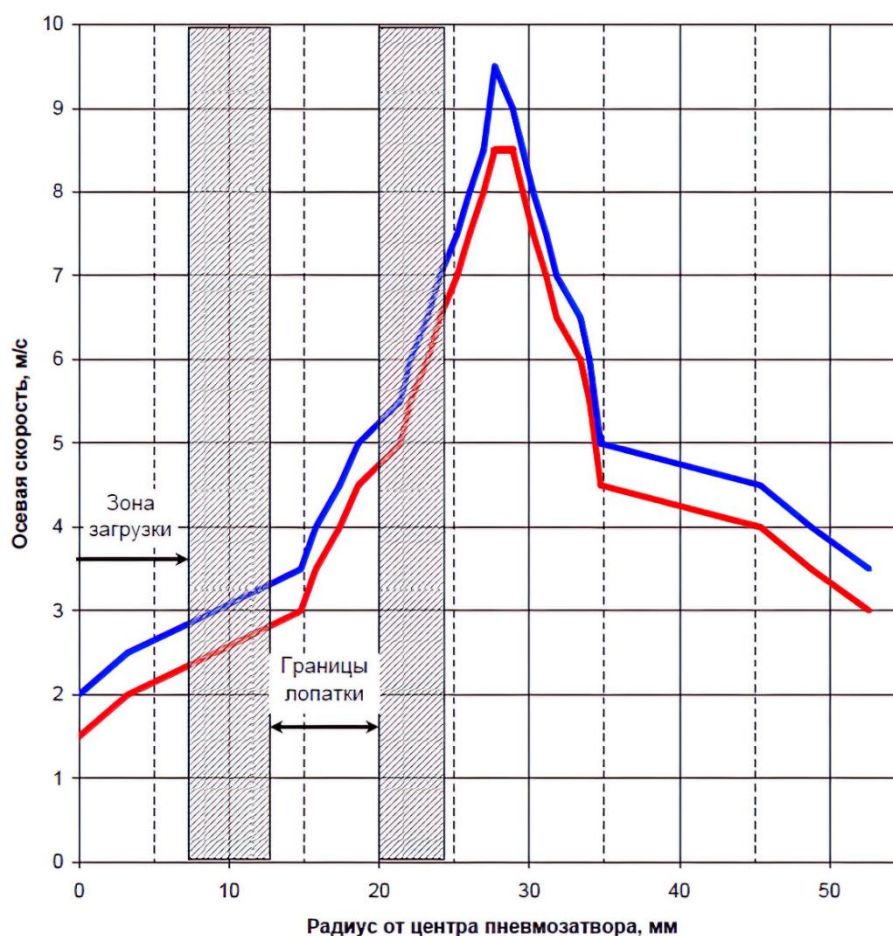


Рис. 7. Уточненное распределение скорости газа вдоль радиуса сопла при $n = 4$
Fig. 7. Refined gas velocity distribution along the nozzle radius at $n = 4$

В результате проведения второго этапа экспериментальных исследований получена зависимость максимального запираемого противодействия в рабочей камере, имитирующей реактор, от давления активного воздуха на срезе сопла при числе лопаток направляющего аппарата $n = 4$ и $n = 14$, показанная на рис. 8.

По кривым на рис. 8 видно, что направляющий аппарат с числом лопаток $n = 14$ и углом установки $\alpha = 64^\circ$ позволяет осуществлять запираение полости реактора с большим давлением, чем аппарата с $n = 4$ и $\alpha = 42^\circ$, что увеличивает надежность самого запираения. Также видно, что рост запираемого противодействия в реакторе с увеличением давления активного воздуха происходит интенсивнее для пневматического затвора с направляющим аппаратом, имеющим большее количество лопаток. При этом следует ожидать, что именно увеличение угла установки лопатки ока-

зывает ключевое влияние на улучшение характеристик, однако увеличение числа лопаток структурирует поток и делает вихрь более устойчивым.

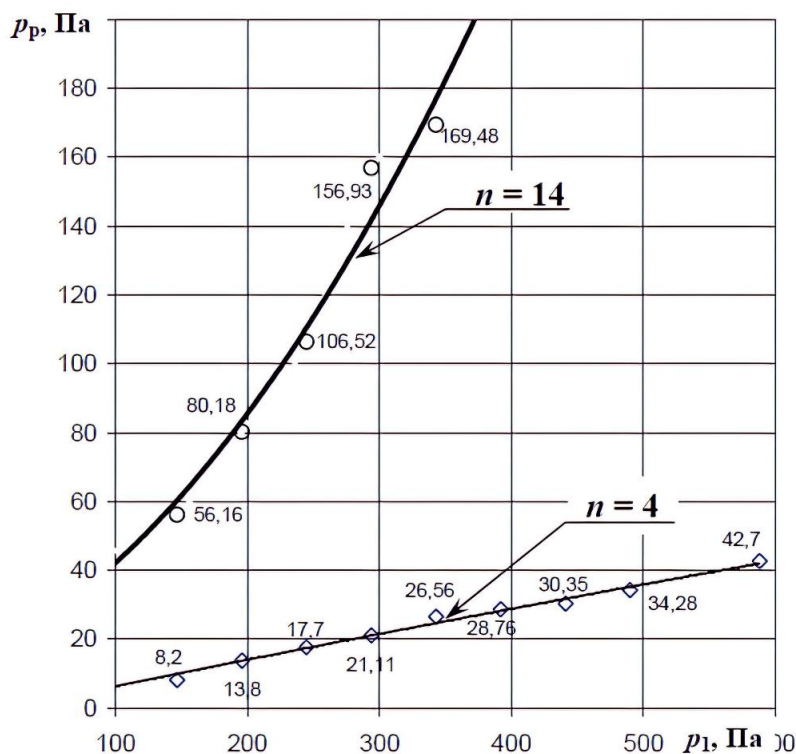


Рис. 8. Зависимость максимального запираемого противодавления в реакторе p_p от давления активного воздуха p_1 на срезе кольцевого сопла
Fig. 8. Dependence of the maximum locked back pressure in the reactor p_p on the active air pressure p_1 at the exit of the annular nozzle

Выводы

В результате экспериментальных исследований получены полные давления и осевые составляющие скорости потока газа в сечении среза кольцевого сопла. Установлено, что при числе лопаток направляющего аппарата $n = 4$, вихревой поток на выходе из пневматического затвора является достаточно устойчивым для запираения, что означает отсутствие необходимости усложнения геометрии направляющего аппарата при малых избыточных давлениях в реакторе. При этом увеличение числа и угла установки лопаток ведет к увеличению запирающей способности пневматического затвора, а также к улучшению его эжекционных свойств, что облегчает загрузку сыпучего материала с малой плотностью в реактор с избыточным давлением. Однако следует отметить, что для более точного определения влияния количества лопаток и угла их установки на характеристики аппарата необходимо провести дополнительное исследование более широкого ряда направляющих аппаратов. Также следует предположить, что зависимости максимального запираемого давления в реакторе от количества и угла установки лопаток направляющего аппарата имеют экстремумы, которым соответствуют оптимальные величины этих параметров. Поэтому полученные результаты могут служить основой для дальнейших исследований параметров пневматического затвора вихревого типа.

Список литературы

1. Основы металлургического производства / В.А. Бигеев, К.Н. Вдовин, В.М. Колокольцев и др. СПб.: Лань, 2017. 615 с.
2. 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.
3. Спиридонов Е.К., Гришина Е.А., Подзерко А.В. Характеристики и расчет эжекционного пневмозатвора // Инновация, экология и ресурсосберегающие технологии на предприятиях машиностроения, авиастроения, транспорта, сельского хозяйства: тр. IX Междунар. науч-техн. конф. Ростов н/Д: ИЦ ДГТУ, 2010. С. 784–790.

4. Гришина Е.А. Использование газодинамических эффектов для повышения надежности промышленных установок // Известия Самарского научного центра РАН, 2011. Т. 13, № 1-3. С. 674–677.

5. А.с. 1788414 А1 СССР, МКИ F 27 В 15/08. Устройство для загрузки сыпучих материалов в печь / Е.К. Спиридонов, О.В. Нохрин, А.А. Левинцов и др. № 4814847/33; заявл. 17.04.90; опубл. 15.1.93, бюл. № 2.

6. 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. DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-100-108

7. Measurements of mixing layers and vortex structures of the strut-induced flow in a scramjet combustor with PIV and POD / L. Tianxiong, W. Fei, W. Yingchun et al. // Experimental Thermal and Fluid Science, 2024, vol. 150, 111065. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2023.111065.

8. Topological flow transformations in a universal vortex bioreactor / I.V. Naumov, R.G. Gevorgiz, S.G. Skripkin et al. // Chemical Engineering and Processing – Process Intensification, 2023, vol. 191, 109467. DOI: 10.1016/j.cep.2023.109467.

9. Dehdarinejad E., Bayareh M. Analysis of the vortical flow in a cyclone using four vortex identification methods // Powder Technology, 2023, vol. 428, 118897. DOI: 10.1016/j.powtec.2023.118897.

10. CFD–DEM investigation of gas–solid flow and wall erosion of vortex elbows conveying coarse particles / F. Xiao, M. Luo, F. Huang et al. // Powder Technology, 2023, vol. 424, 118524. DOI: 10.1016/j.powtec.2023.118524.

11. A critical review on the flow structure studies of Ranque–Hilsch vortex tubes / X. Guo, B. Zhang, B. Liu, X. Xu // International Journal of Refrigeration. 2019. Vol. 104. P. 51–64. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2019.04.030.

12. A novel ANN–CFD model for simulating flow in a vortex mixer / S. Sourav, K.K. Singh, K.S. Kumar et al. // Chemical Engineering Science. 2022. Vol. 260, 117819. DOI: 10.1016/j.ces.2022.117819.

13. The effect of cylinder wall cooling and vortex finder (tapered in-out) geometry on temperature, heat rate, and flow field to increase cyclone performance using CFD / E. Yohana, M. Tauviqirrahman, R. Ismail et al. // Case Studies in Chemical and Environmental Engineering. 2023. Vol. 7, 100311. DOI: 10.1016/j.cscee.2023.100311.

14. Vortex Flow and Cavitation in Liquid Injection: A Comparison between High-Fidelity CFD Simulations and Experimental Visualizations on Transparent Nozzle Replicas / F. Piscaglia, F. Giussani, J. Hèlie et al. // International Journal of Multiphase Flow. 2021. Vol. 138, 103605. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2021.103605.

15. Gao X., Kong B., Vigil R.D. CFD investigation of bubble effects on Taylor–Couette flow patterns in the weakly turbulent vortex regime // Chemical Engineering Journal. 2015. Vol. 270. P. 508–518. DOI: 10.1016/j.ces.2015.02.061.

16. Rafiee S.E., Sadeghiazad M.M. Experimental and CFD analysis on thermal performance of Double-Circuit vortex tube (DCVT)-geometrical optimization, energy transfer and flow structural analysis // Applied Thermal Engineering. 2018. Vol. 128. P. 1223–1237. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.09.112.

17. Кепа А. Division of outlet flow in a cyclone vortex finder – The CFD calculations // Separation and Purification Technology. 2010. Vol. 75 (2). P. 127–131. DOI: 10.1016/j.seppur.2010.08.009.

18. Zeng Y., Liu X., Wang H. Prediction and experimental verification of vortex flow in draft tube of Francis turbine based on CFD // Procedia Engineering. 2012. Vol. 31. P. 196–205. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.01.1012.

19. CFD analysis on the spatial effect of vortex generators in concentric tube heat exchangers – A comparative study / R. Aridi, S. Ali, T. Lemenand et al. // International Journal of Thermofluids, 2022. Vol. 16, 100247. DOI: 10.1016/j.ijft.2022.100247.

20. Hydrodynamic CFD–DEM model validation in a gas–solid vortex unit / F. Wéry, L.A. Vandewalle, G.B. Marin et al. // Chemical Engineering Journal. 2023. Vol. 455, 140529. DOI: 10.1016/j.ces.2022.140529.

References

1. Bigeev V.A., Vdovin K.N., Kolokoltsev V.M. et al. *Osnovy metallurgicheskogo proizvodstv* [Fundamentals of metallurgical production]. St. Petersburg, 2017. 615 p.
2. 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.
3. Spiridonov E.K., Grishina E.A., Podzero A.V. [Characteristics and calculation of an ejection pneumatic shut-off device]. *Innovatsiya, ekologiya i resursosberegayushchiye tekhnologii na predpriyatiyakh mashinostroyeniya, aviastroyeniya, transporta, sel'skogo khozyaystva = Innovation, ecology and resource-saving technologies at enterprises of mechanical engineering, aircraft manufacturing, transport, agriculture*. Rostov-on-Don, 2010, pp. 784–790. (In Russ.)
4. Grishina E.A. [The use of gas-dynamic effects to increase the reliability of industrial installations]. *News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2011, vol. 13(1-3), pp. 674–677. (In Russ.)
5. Spiridonov E.K., Nokhrin O.V., Levintsov A.A. et al. *Ustroystvo dlya zagruzki sypuchikh materialov v pech'* [Device for loading bulk materials into a furnace]. A.s. 1788414 A1 USSR, MKI F 27 B 15/08 No. 4814847/33; application 04/17/90; publ. 15.1.93, bulletin. No. 2.
6. Spiridonov E.K., Ismagilov A.R., Khabarova D.F. [Research and development of an ejection-type pneumatic shut-off device to prevent the exhaust of aggressive gases]. *Bulletin of the Magnitogorsk State Technical University named after. G.I. Nosova*, 2023, vol. 21(1), pp. 100–108. DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-100-108. (In Russ.)
7. Tianxiong L., Fei W., Yingchun W., Botong W., Lei W., Jinxin G., Xuecheng W. Measurements of mixing layers and vortex structures of the strut-induced flow in a scramjet combustor with PIV and POD. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2024, vol. 150, Number article 111065. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2023.111065.
8. Naumov I.V., Gevorgiz R.G., Skripkin S.G., Tintulova M.V., Tsoy M.A., Sharifullin B.R. Topological flow transformations in a universal vortex bioreactor. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, 2023, vol. 191, Number article 109467. DOI: 10.1016/j.cep.2023.109467.
9. Dehdarnejad E., Bayareh M. Analysis of the vortical flow in a cyclone using four vortex identification methods. *Powder Technology*, 2023, vol. 428, Number article 118897. DOI: 10.1016/j.powtec.2023.118897.
10. Xiao F., Luo M., Huang F., Zhou M., An J., Kuang S., Yu A. CFD–DEM investigation of gas-solid flow and wall erosion of vortex elbows conveying coarse particles. *Powder Technology*, 2023, vol. 424, Number article 118524. DOI: 10.1016/j.powtec.2023.118524.
11. Guo X., Zhang B., Liu B., Xu X. A critical review on the flow structure studies of Ranque–Hilsch vortex tubes. *International Journal of Refrigeration*, 2019, vol. 104, pp. 51–64. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2019.04.030.
12. Sourav S., Singh K.K., Kumar K.S., Sreekumar G., Shenoy K.T. A novel ANN-CFD model for simulating flow in a vortex mixer. *Chemical Engineering Science*, 2022, vol. 260, Number article 117819. DOI: 10.1016/j.ces.2022.117819.
13. Yohana E., Tauviqirrahman M., Ismail R., Muliyanawan A., Carles H., Dwinanda M.F.H., Ariyanto H.D., Yulianto M.E., Choi K.-H. The effect of cylinder wall cooling and vortex finder (tapered in-out) geometry on temperature, heat rate, and flow field to increase cyclone performance using CFD. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2023, vol. 7, Number article 100311. DOI: 10.1016/j.cscee.2023.100311.
14. Piscaglia F., Giussani F., Hèlie J., Lamarque N., Aithal S.M. Vortex Flow and Cavitation in Liquid Injection: A Comparison between High-Fidelity CFD Simulations and Experimental Visualizations on Transparent Nozzle Replicas. *International Journal of Multiphase Flow*, 2021, vol. 138, Number article 103605. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2021.103605.
15. Gao X., Kong B., Vigil R.D. CFD investigation of bubble effects on Taylor–Couette flow patterns in the weakly turbulent vortex regime. *Chemical Engineering Journal*, 2015, vol. 270, pp. 508–518. DOI: 10.1016/j.cej.2015.02.061.
16. Rafiee S.E., Sadeghiyazad M.M. Experimental and CFD analysis on thermal performance of Double-Circuit vortex tube (DCVT)-geometrical optimization, energy transfer and flow structural analy-

sis. *Applied Thermal Engineering*, 2018, vol. 128, pp. 1223–1237. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.09.112.

17. Кепа А. Division of outlet flow in a cyclone vortex finder—The CFD calculations // *Separation and Purification Technology*, 2010, vol.75 (2), pp. 127–131. DOI: 10.1016/j.seppur.2010.08.009.

18. Zeng Y., Liu X., Wang H. Prediction and experimental verification of vortex flow in draft tube of Francis turbine based on CFD. *Procedia Engineering*, 2012, vol. 31, pp. 196–205. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.01.1012.

19. Aridi R., Ali S., Lemenand T., Faraj J., Khaled M. CFD analysis on the spatial effect of vortex generators in concentric tube heat exchangers – A comparative study. *International Journal of Thermofluids*, 2022, vol. 16, Number article 100247. DOI: 10.1016/j.ijft.2022.100247.

20. Wéry F., Vandewalle L.A., Marin G.B., Heynderickx G.J., Geem K.M.V. Hydrodynamic CFD-DEM model validation in a gas–solid vortex unit. *Chemical Engineering Journal*, 2023, vol. 455, Number article 140529. DOI: 10.1016/j.cej.2022.140529.

Информация об авторах

Хабарова Дарья Федоровна, доцент кафедры гидравлики и гидропневмосистем, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; khabarovadf@susu.ru.

Исмагилов Александр Рашидович, доцент кафедры гидравлики и гидропневмосистем, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; ismagilovar@susu.ru.

Подзерко Александр Викторович, доцент кафедры гидравлики и гидропневмосистем, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; podzerkoav@susu.ru.

Лазарев Илья Игоревич, аспирант кафедры гидравлики и гидропневмосистем, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; ilya.iazarev@bk.ru.

Information about the authors

Daria Fy Khabarova, Associate Professor, Department of Hydraulics and Hydraulic and Pneumatic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; khabarovadf@susu.ru.

Alexander Ryo Ismagilov, Associate Professor, Department of Hydraulics and Hydraulic and Pneumatic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; ismagilovar@susu.ru.

Alexander Vyo Podzerko, Associate Professor, Department of Hydraulics and Hydraulic and Pneumatic Systems South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; podzerkoav@susu.ru.

Ilya Iyo Lazarev, graduate student of the Department of Hydraulics and Hydraulic and Pneumatic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; ilya.iazarev@bk.ru.

Статья поступила в редакцию 30.10.2023; принята к публикации 31.10.2023.

The article was submitted 30.10.2023; accepted for publication 31.10.2023