Оригинальная статья / Research article

УДК 621.928.93

https://doi.org/10.33380/2305-2066-2025-14-3-2019

Check for updates

CC BY 4.0

Экспериментальное и CFD-исследование новой конструкции прямоточного циклона

Е. В. Флисюк[1]✉, В. С. Топталов[2], О. М. Флисюк[2], И. Г. Лихачев[2], Ю. М. Коцур[1]

[1] Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный химико-фармацевтический университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации (ФГБОУ ВО СПХФУ Минздрава России). 197022, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 14, литера А

[2] Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)» [Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), СПбГТИ(ТУ)]. 190013, Россия, г. Санкт-Петербург, проспект Московский, д. 24–26/49, литера А

✉ **Контактное лицо:** Флисюк Елена Владимировна. **E-mail:** elena.flisyuk@pharminnotech.com

ORCID: Е. В. Флисюк – https://orcid.org/0000-0001-8077-2462;
В. С. Топталов – https://orcid.org/0009-0008-0215-7059;
О. М. Флисюк – https://orcid.org/0000-0003-0527-8725;
И. Г. Лихачев – https://orcid.org/ 0000-0002-7180-0270;
Ю. М. Коцур – https://orcid.org/ 0000-0001-9292-4240.

Статья поступила: 24.01.2025 **Статья принята в печать:** 16.06.2025 **Статья опубликована:** 20.06.2025

Резюме

Введение. Очистка газовых потоков является важной задачей многих отраслей промышленности в области инженерной защиты окружающей среды. При осуществления подобных мероприятий зачастую применяются циклоны – аппараты для очистки газовых потоков от мелкодисперсных частиц. В фармацевтической промышленности для решения таких задач требуется применение компактных высокоэффективных аппаратов, для разработки и исследования которых в последнее время все чаще применяются методы CFD-моделирования. В работе приводится сравнение результатов CFD-моделирования процесса очистки газа в прямоточном циклоне новой конструкции и эффективности улавливания в этом аппарате, полученной в результате экспериментальных исследований.

Цель. Сравнение результатов численного моделирования процесса очистки газа в двух конфигурациях прямоточного циклона новой конструкции с результатами эксперимента.

Материалы и методы. Для численного CFD-моделирования процесса разделения в исследуемом аппарате использовался программный комплекс FlowVision. Движение дискретной фазы – частиц – описывалось с помощью Lagrangian particle model. Для распределения частиц по размерам использовалось распределение Розина – Раммлера с минимальным диаметром 15 мкм, медианным 40 мкм и максимальным 120 мкм. Эксперименты проводились на экспериментальной установке, основной частью которой являлись прямоточный циклон, центробежный вентилятор и шнековый дозатор. В качестве модельного материала использовался тальк марки ТРПН, дисперсное распределение частиц которого было определено методом лазерной дифракции на анализаторе частиц SALD-2300 (Shimadzu, Япония).

Результаты и обсуждение. CFD-модель аппарата позволила определить поле скоростей газа, траектории потока и эффективность улавливания частиц в исследуемых конфигурациях прямоточного циклона. На основании информации о поле скорости газа и траекторий потока сделаны выводы о наиболее эффективных конструкторских решениях. Сравнение результатов численного моделирования и результатов эксперимента показало хорошую сходимость.

Заключение. Разработанная конструкция прямоточного циклона показала хорошую эффективность улавливания мелкодисперсных частиц. Численное CFD-моделирование позволило определить конструктивные особенности, негативно влияющие на эффективность, и оптимизировать конструкцию аппарата. Хорошая сходимость результатов модели и эксперимента подтверждает возможность использования CFD-программ для точного моделирования технологических процессов и определения их параметров.

Ключевые слова: прямоточный циклон, пылеулавливание, CFD, FlowVision, закрученный поток, численное моделирование

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

© Флисюк Е. В., Топталов В. С., Флисюк О. М., Лихачев И. Г., Коцур Ю. М., 2025
© Flisyuk E. V., Toptalov V. S., Flisyuk O. M., Likhachev I. G., Kotsur Yu. M., 2025

Вклад авторов. О. М. Флисюк и В. С. Топталов – концептуализация. И. Г. Лихачев – методология и проверка. Е. В. Флисюк, Ю. М. Коцур – формальный анализ. В. С. Топталов – исследования. В. С. Топталов – написание – первоначальная черновая подготовка. О. М. Флисюк, Е. В. Флисюк, Ю. М. Коцур – написание – рецензирование и редактирование. И. Г. Лихачев – надзор.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 21-79-30029).

Для цитирования: Флисюк Е. В., Топталов В. С., Флисюк О. М., Лихачев И. Г., Коцур Ю. М. Экспериментальное и CFD-исследование новой конструкции прямоточного циклона. *Разработка и регистрация лекарственных средств*. 2025;14(3). https://doi.org/10.33380/2305-2066-2025-14-3-2019

Experimental and CFD study of a new design of a direct-flow cyclone

Elena V. Flisyuk[1]✉, Valery S. Toptalov[2], Oleg M. Flisyuk[2], Ilya G. Likhachev[2], Yulia M. Kotsur[1]

[1] Saint-Petersburg State Chemical and Pharmaceutical University. 14A, Prof. Popova str., Saint-Petersburg, 197022, Russia
[2] Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University). 24–26/49A, prospect Moskovsky, Saint-Petersburg, 190013, Russia

✉ **Corresponding author:** Elena V. Flisyuk. **E-mail:** elena.flisyuk@pharminnotech.com

ORCID: Elena V. Flisyuk – https://orcid.org/0000-0001-8077-2462;
Valery S. Toptalov – https://orcid.org/0009-0008-0215-7059;
Oleg M. Flisyuk – https://orcid.org/0000-0003-0527-8725;
Ilya G. Likhachev – https://orcid.org/ 0000-0002-7180-0270;
Yulia M. Kotsur – https://orcid.org/ 0000-0001-9292-4240.

Received: 24.01.2025 **Accepted:** 16.06.2025 **Published:** 20.06.2025

Abstract

Introduction. Purification of gas streams plays an important role in many industries in the field of environmental engineering. When implementing such measures, cyclones are often used – devices for cleaning gas streams from fine particles. In the pharmaceutical industry solving such problems requires the use of compact, highly efficient devices, for the development and study of which CFD-modelling methods have recently been increasingly used. The paper presents a comparison of the results of CFD-modelling of the gas purification process in a direct-flow cyclone of a new design and the capture efficiency in this apparatus obtained as a result of experimental studies.

Aim. Comparison of the results of numerical modelling of the gas purification process in two configurations of a direct-flow cyclone of a new design with the experimental results.

Materials and methods. The FlowVision software package was used for numerical CFD-modelling of the separation process in the studied device. The motion of the discrete phase – particles – was described using the Lagrangian particle model. Rosin-Rummler distribution with a minimum diameter of 15 microns, a median of 40 microns, and a maximum of 120 microns was used to distribute the particles by size. The experiments were carried out on an experimental setup, the main part of which was a direct-flow cyclone, a centrifugal fan and a screw doser. Technical talc was used as a model material, the dispersed particle distribution of which was determined by laser diffraction on a SALD-2300 particle analyzer (Shimadzu, Japan).

Results and discussion. The CFD-model of the device allowed us to determine the gas velocity field, flow trajectories and particle capture efficiency in the studied configurations of a direct-flow cyclone. Based on the information about the gas velocity field and flow trajectories, conclusions were made about the most effective 4 design solutions. Comparison of the numerical simulation results and the experimental results showed good convergence.

Conclusion. The developed design of the direct-flow cyclone showed good efficiency of fine particle capture. Numerical CFD-modelling allowed us to determine design features that negatively affect the efficiency and to optimize the design of the device. Good convergence of the model and experimental results confirms the possibility of using CFD-programmes for accurate modelling of technological processes and determining their parameters.

Keywords: direct-flow cyclone, dust collection, CFD, FlowVision, swirling flow, numerical modeling

Conflict of interest. The authors declare that they have no obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Contribution of the authors. Oleg M. Flisyuk and Valery S. Toptalov – conceptualization. Ilya G. Likhachev – methodology and validation. Oleg M. Flisyuk – formal analysis. Valery S. Toptalov – investigation. Valery S. Toptalov – writing – original draft. Oleg M. Flisyuk and Elena M. Flisyuk – writing – review and editing. Ilya G. Likhachev – supervision.

Funding. The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project 21-79-30029).

For citation: Flisyuk E. V., Toptalov V. S., Flisyuk O. M., Likhachev I. G., Kotsur Yu. M. Experimental and CFD study of a new design of a direct-flow cyclone. *Drug development & registration*. 2025;14(3). (In Russ.) https://doi.org/10.33380/2305-2066-2025-14-3-2019

ВВЕДЕНИЕ

Циклоны представляют собой устройства, широко применяемые в химической, фармацевтической и перерабатывающей промышленности для очистки газов от твердых частиц. Улавливаемая мелкодисперсная твердая фаза в большинстве случаев представляет собой отходы производства. Сепарация таких материалов из выбрасываемых в атмосферу газов обеспечивает защиту окружающей среды от вредного воздействия на атмосферу.

Большинство известных на данный момент прямоточных циклонов, имеющих конкурентную эффективность очистки, обладают при этом и достаточно громоздкой конструкцией. Но в фармацевтической промышленности зачастую требуется использование компактного промышленного оборудования, которое при этом имеет и хорошие технико-технологические характеристики. При разработке такого оборудования целесообразно применять методы вычислительной гидродинамики (CFD), которые позволяют еще на этапе проектирования аппарата определить его эффективность и при необходимости оптимизировать конструкцию. В настоящее время исследованиям гидродинамики циклонов посвящено достаточно много работ [1–4].

Исследователи активно занимаются разработкой новых и совершенствованием имеющихся конструкций газоочистителей. Так, в работе *Jianfei Song* и др. [5] проведено экспериментальное и численное исследование циклонного сепаратора с тангенциальным подводом газа. *Lingzi Wang* и др. [6] описывают циклон с многослойным центральным каналом. Особенностью циклона является многоступенчатая и многократная закрутка входящего потока газа. *Ik-Hyun An* и др. разработали миниатюрный циклонный сепаратор [7], работающий при скорости потока менее 200 мл/мин.

Помимо работ по разработке новых конструкций аппаратов, можно отметить ряд статей, в которых изучается гидродинамика закрученных газовых потоков. Авторами в работах [8–9] приведен ряд математических моделей и численных исследований движения закрученных потоков в динамических газопромывателях и циклонах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования является прямоточный циклон, а именно две его компоновки, представленные на рисунке 1. Различие компоновок определяет только форма и диаметр стабилизатора завихрителя: в первом случае диаметр стабилизатора составляет 20 % от диаметра входного патрубка аппарата, во втором – 65 %. Аппарат предназначен для улавливания мелкодисперсных частиц – размером от 15 мкм – из газовых потоков. Компактная конструкция, состоящая из патрубков для входа и выхода газа, а также лопастного завихрителя с профилированными лопатками, уменьшающими турбулентность, позволяет встраивать циклон прямо в технологическую линию, в том месте, где это необходимо. На представленную конструкцию получен патент [10].

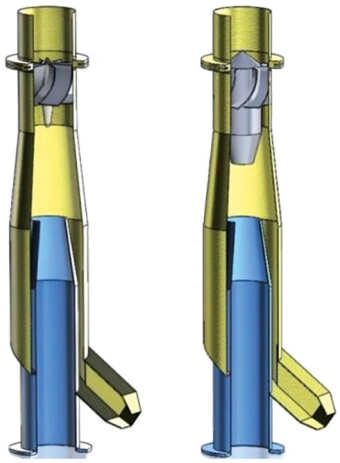

Рисунок 1. Компоновки исследуемого прямоточного циклона

Figure 1. Layouts of the investigated direct-flow cyclone

Процесс численного CFD-моделирования основывается на информации о поле скорости газа в аппарате. В настоящее время благодаря быстрому развитию вычислительной техники оказывается возможным осуществить расчеты течения газа при помощи численного решения уравнений гидродинамики.

Постановка задачи численного исследования циклона. Численное моделирование проводилось в программном комплексе FlowVision. Применяемый программный комплекс с высокой точностью позволяет моделировать различные технологические процессы, в том числе процессы тепло- и массообменна, а также строить расходонапорные характеристики насосного оборудования, определять кавитационный запас и т. д.

Так как при прохождении потока газа через аппарат образуется достаточно сложная гидродинамическая картина, основными особенностями которой являются обтекание лопастей и срыв потока газа с них, для моделирования процесса была выбрана модель турбулентности k-ω SST, которая наилучшим образом подходит для описания таких течений.

Для моделирования дисперсной фазы была выбрана Lagrangian particle model. Абсолютная плотность материала – 2,6 г/мл^3, приблизительно такая же, как у экспериментального материала – талька. Из-за небольшого размера форма частиц не оказывала никакого влияния на результат моделирования, поэтому было принято, что частицы имели форму

шара. Распределение Розина – Раммлера с минимальным диаметром 15 мкм, медианным 40 мкм и максимальным 120 мкм определяло их размер.

Описание экспериментальной установки. Эффективность улавливания рассматриваемого циклона определялась на установке, схема которой приведена на рисунке 2.

Установка работает следующим образом. Центробежный вентилятор 9 создает разряжение в циклоне 4, за счет чего в него всасывается воздух. Мелкодисперсный материал дозируется во входящий поток воздуха шнековым питателем 1. Поток воздуха с частицами проходит через завихритель и за счет возникшей центробежной силы частицы отбрасываются к стенкам циклона, затем они вместе с закрученным потоком воздуха попадают в камеру для сбора пыли. Расход воздуха регулируется шиберной заслонкой 7.

В качестве модельного материала для проведения экспериментов был выбран тальк молотый марки ТРПН. Дисперсный состав исходного материала был проанализирован методом лазерной дифракции на анализаторе частиц SALD-2300 (Shimadzu, Япония). Результаты анализа пробы приведены на рисунке 3.

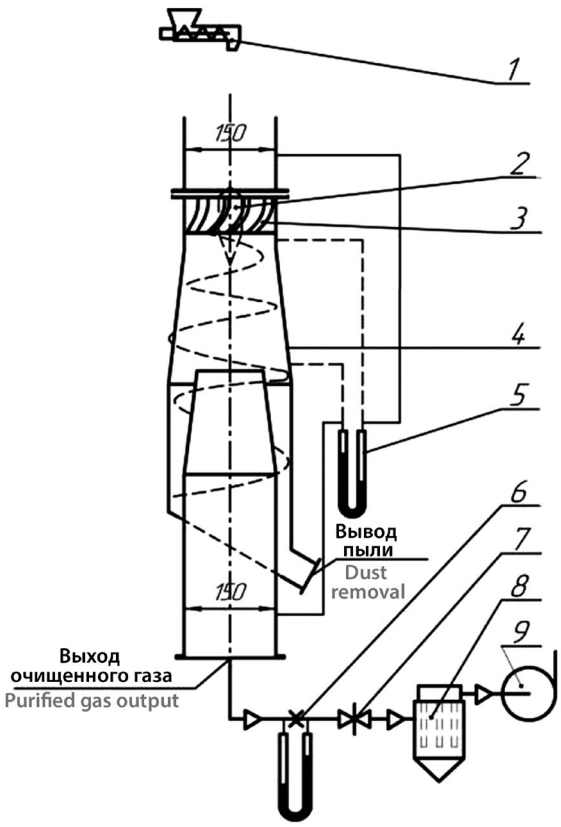

Рисунок 2. **Схема экспериментальной установки.**

1 – шнековый дозатор; 2 – завихритель; 3 – лопасть завихрителя; 4 – корпус прямоточного циклона; 5 – дифманометр; 6 – диафрагма с присоединенным к ней дифманометром; 7 – шиберная заслонка; 8 – рукавный фильтр; 9 – центробежный вентилятор

Figure 2. **The scheme of the experimental installation.**

1 – screw doser; 2 – swirler; 3 – swirler blade; 4 – direct-flow cyclone housing; 5 – differential manometer; 6 – diaphragm with a differential manometer attached to it; 7 – flip gate; 8 – bag filter; 9 – centrifugal blower

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В программном комплексе FlowVision были определены поля скоростей, траектории потока и эффективность обеих конфигураций циклона. На рисунке 4, А и 4, Б представлены результаты моделирования поля скорости в аппарате с обычным завихрителем и с завихрителем, у которого удлинен стабилизатор. При использовании обычного стабилизатора после завихрителя образуется турбулентный след, в который попадают твердые частицы из газового потока. В турбулентном следе они движутся хаотически и под действием всасывающей силы (в выходящем из циклона воздухе) уносятся в патрубок для выхода газа.

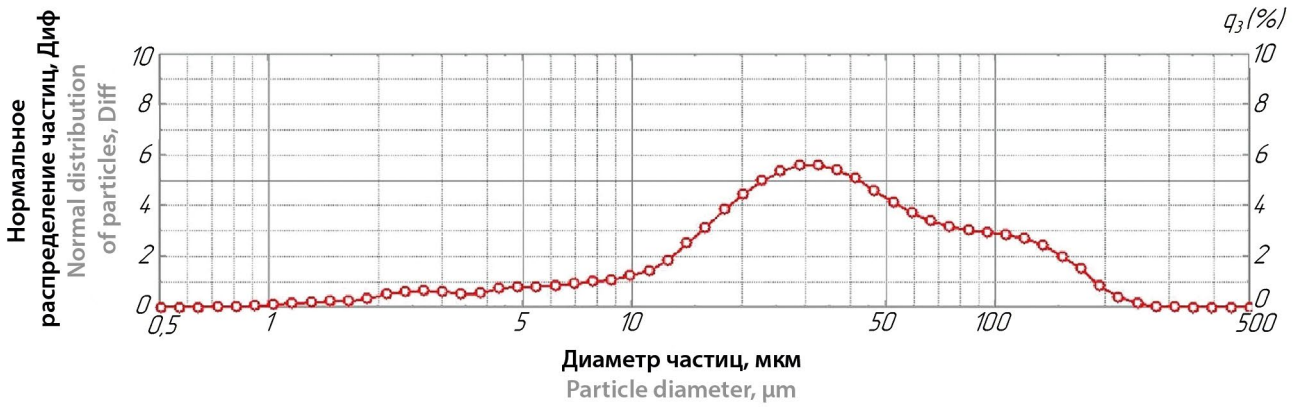

Рисунок 3. **Дисперсный состав исходного материала (талька)**

Figure 3. **The dispersed composition of the starting material (talc)**

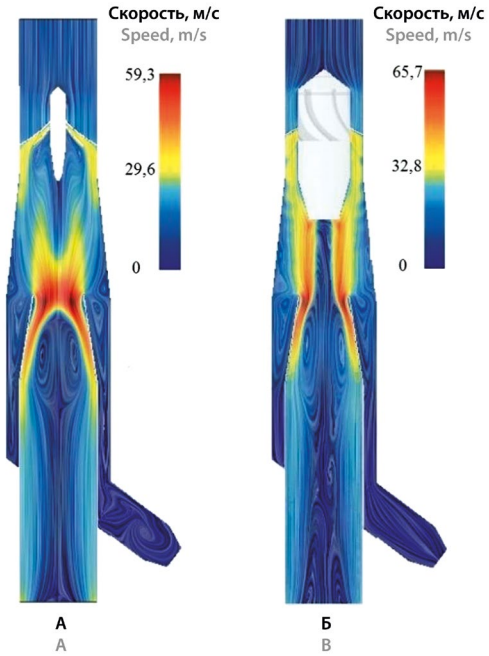

Рисунок 4. **Поле скорости газа в циклонах с различной геометрией стабилизатора**

Figure 4. **Gas velocity field in cyclones with different stabilizer geometry**

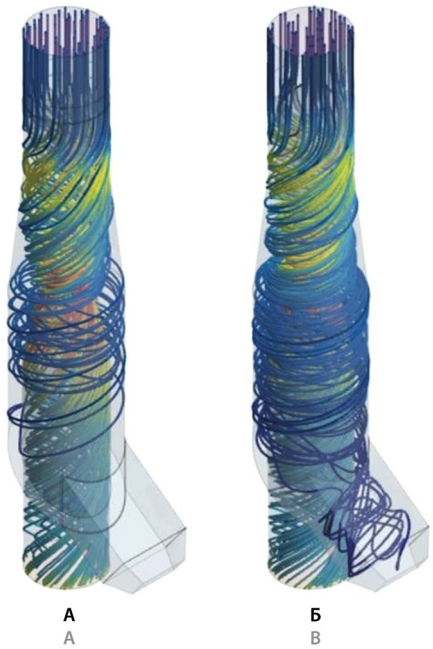

Рисунок 5. **Различие в структуре потока**

Figure 5. **Difference in flow structure**

В случае использования удлиненного стабилизатора турбулентный след образуется в патрубке для выхода газа. После стабилизатора завихрителя наблюдается только небольшой срыв потока, который не оказывает существенного влияния на процесс сепарации в циклоне.

Траектории потока на рисунке 5, А и 5, Б наглядно показывают, что использование удлиненного стабилизатора положительно сказывается на общей структуре потока газа в аппарате – при использовании такого стабилизатора значительная часть потока проходит через камеру для сбора частиц и лишь затем уходит в патрубок для выхода газа.

На рисунке 6, А и 6, Б показано распределение объемной концентрации частиц в меридиональной плоскости циклона. На рисунке 6, Б видно, как частицы, проходя завихритель, образуют достаточно плотный слой у стенок камеры разделения, впоследствии попадая в камеру для сбора. В то же время в случае использования стабилизатора обычной формы (рисунок 6, А) многие частицы, попадая в турбулентный след завихрителя, уносятся в патрубок для очищенного газа, что уменьшает эффективность работы аппарата.

Сопоставление расчетной и экспериментальной эффективности циклона. На рисунке 7 приведены расчетные и экспериментальные кривые зависимости эффективности улавливания от скорости газового потока, входящего в аппарат. При работе с достаточно мелкодисперсными частицами аппарат показал высокий КПД очистки – 91 %, а результаты моделирования и экспериментальные данные показали хорошую сходимость. Разница в эффективности между конфигурациями аппарата составила около 10 %. В ходе эксперимента было определено, что диапазон скорости воздуха для наиболее эффективного разделения составляет 12–14 м/с.

Рисунок 6. **Объемное распределение частиц в меридиональной плоскости циклона**

Figure 6. **Volume distribution of particles in the meridional plane of the cyclone**

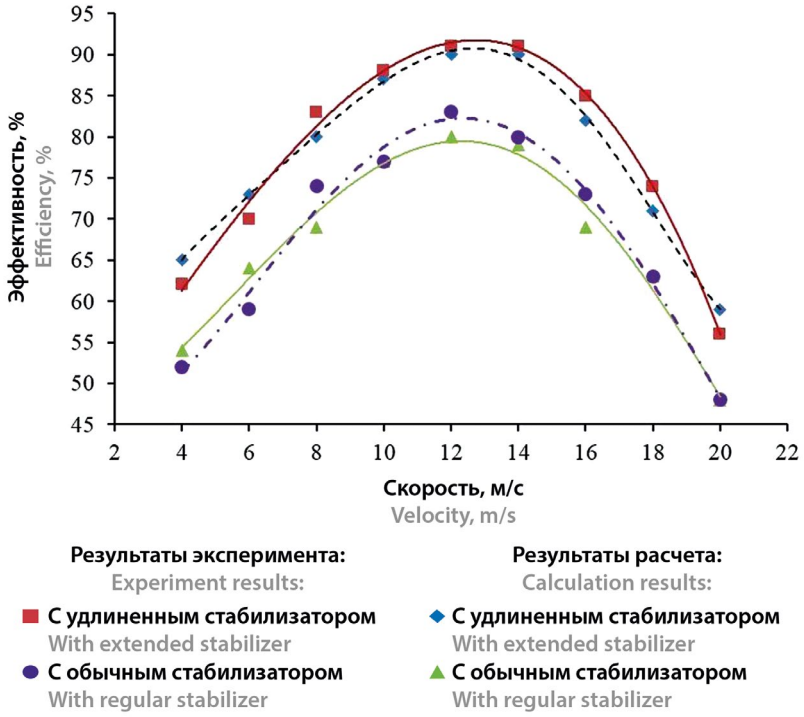

Рисунок 7. Экспериментальная и расчетная зависимость эффективности улавливания аппарата от скорости газового потока

Figure 7. Experimental and calculated dependence of the apparatus capture efficiency on the gas flow velocity

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало, что представленная конструкция циклона может успешно применяться в промышленности для улавливания из газовых потоков пылей различных материалов и составов, в том числе мелкодисперсных. Компактность конструкции при достаточно высокой степени разделения, в том числе для мелкодисперсных частиц, позволяет применять его в стесненных производственных помещениях.

Численное моделирование аппарата показало хорошую сходимость с экспериментальными данными. Это в очередной раз доказывает возможность применения CFD-моделирования для расчета технологических аппаратов и оптимизации их конструкции.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Yu G., Dong S., Yang L., Yan D., Dong K., Wei Y., Wang B. Experimental and numerical studies on a new double-stage tandem nesting cyclone. *Chemical Engineering Science*. 2021;236:116537. DOI: 10.1016/j.ces.2021.116537.
2. Safikhani H., Akhavan-Behabadi M. A., Shams M., Rahimyan M. H. Numerical simulation of flow field in three types of standard cyclone separator. *Advanced Powder Technology*. 2010;21(4):435–442. DOI: 10.1016/j.apt.2010.01.002.
3. Gimbun J., Chuah T. G., Choong T. S. Y., Fakhru'l-Razi A. A CFD study on the prediction of cyclone collection efficiency. *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*. 2005;6(3):161–168. DOI: 10.1080/15502280590923649.
4. You Y., Seibold F., Wang S., Weigand B., Gross U. URANS of turbulent flow and heat transfer in divergent swirl tubes using the k-ω SST turbulence model with curvature correction. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020;159:120088. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120088.
5. Song J., Wei Y., Sun G., Chen J. Experimental and CFD study of particle deposition on the outer surface of vortex finder of a cyclone separator. *Chemical Engineering Journal*. 2017;309:249–262. DOI: 10.1016/j.cej.2016.10.019.
6. Wang L., Liu B., Feng J., Peng X. Experimental study on the separation performance of a novel oil–gas cyclone separator. *Powder Technology*. 2023;415:118124. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.118124.
7. An I.-H., Lee C.-H., Lim J.-H., Lee H.-Y., Yook S.-J. Development of a miniature cyclone separator operating at low Reynolds numbers as a pre-separator for portable black carbon monitors. *Advanced Powder Technology*. 2021;32(12):4779–4787. DOI: 10.1016/j.apt.2021.10.027.
8. Narasimha M., Brennan M. S., Holtham P. N., Napier-Munn T. J. A comprehensive CFD model of dense medium cyclone performance. *Minerals Engineering*. 2007;20(4):414–426. DOI: 10.1016/j.mineng.2006.10.004.
9. Mousavi S. M., Ghadimi B., Kowsary F. Numerical study on the effects of multiple inlet slot configurations on swirl cooling of a gas turbine blade leading edge. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2018;90:34–43. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2017.10.012.
10. Flisyuk O. M., Toptalov V. S., Martsulevich N. A., Muratov O. V. Direct-flow cyclone. Patent RUS 195672U1 RU 2020.