

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА



УДК 621.928.93/ JEL code L94

DOI:10.30724/1998-9903-2023-25-3-105-116

СНИЖЕНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ИНЕРЦИОННО- ВАКУУМНОГО ЗОЛОУЛОВИТЕЛЯ

Мостовенко Л.В.¹, Белоглазов В.П.²

Нижевартовский государственный университет, г. Нижевартовск, Россия

¹ORCID*: <http://orcid.org/0000-0003-0675-0622>, tepliblv@mail.ru

²ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-7105-3263>, vpbn@mail.ru

Резюме: Актуальность темы исследования обусловлена существованием экологической проблемы, связанной с вредными выбросами в атмосферу. Наиболее высокоэффективными являются электрофильтры и тканевые фильтры (~90-99,5% улавливания). На фоне данных аппаратов инерционные отстают и по своей эффективности улавливания и по спектру улавливания гранулометрического состава золы. Исследования, проводимые в статье направлены на создание такого инерционного аппарата, который бы обладал как минимальным сопротивлением, так и высокой эффективностью.

ЦЕЛЬ. Рассмотреть возможность снижения аэродинамического сопротивления путем изменения конструкции аппарата, а именно, увеличением диаметра входного патрубка в инерционно-вакуумном золоуловителе. Рассмотреть ряд иных способов по дальнейшему снижению аэродинамического сопротивления аппарата. Выявить перспективность и оценку капитальных затрат на реконструкцию золоулавливающего аппарата. **МЕТОДЫ.** При решении поставленной задачи применялся метод расчета динамики дисперсного потока в инерционно-вакуумном золоуловителе, реализованный МКР. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В статье описана актуальность темы, рассмотрены результаты численного расчета. Произведен расчет влияния граничных условий, в число которых входит скорость потока на входе, тепловые и гидравлические параметры потока уходящих газов на входе в золоуловитель, по отношению к искомому перепаду давлений на аппарате, а также эффективности улавливания. В данной статье описан процесс, вследствие которого происходит изменение гидравлических характеристик вдоль проточной части ИВЗ. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Изменение конструкции аппарата ведет к уменьшению сопротивления ИВЗ, при этом данные изменения крайне чувствительны к влиянию на степень очистки. Расчеты показали, что данный способ оправдывает себя с точки зрения снижения сопротивления. Перепад давления колеблется в диапазоне 279,8-1273 мм. вод. ст. Сходимость итерационного расчета, с учетом качества сетки, обеспечивают гибкость, достигается меньшим количеством итераций, однако временные затраты на расчет меньше не становятся.

Ключевые слова: инерционно-вакуумный золоуловитель; снижение сопротивления; аэродинамическое сопротивление; аэродисперсный поток; высокая степень очистки; запыленный поток; численное моделирование.

Для цитирования: Мостовенко Л.В., Белоглазов В.П. Снижение аэродинамического сопротивления инерционно-вакуумного золоуловителя // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. №. С. 105-116. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-105-116.

REDUCTION OF AERODYNAMIC RESISTANCE OF INERTIAL-VACUUM ASH COLLECTOR

Mostovenko LV.¹, Beloglazov VP.²

Nizhnevartov State University, Nizhnevartovsk, Russia

¹ORCID*: <http://orcid.org/0000-0003-0675-0622>, tepliblv@mail.ru

²ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-7105-3263>, vpbn@mail.ru

Abstract: THE RELEVANCE of the research topic is due to the existence of an environmental problem associated with harmful emissions into the atmosphere. The most highly efficient are electrostatic precipitators and fabric filters (~90-99.5% capture). Against the background of these devices, inertial one's lag behind both in terms of their catching efficiency and the catching spectrum of the ash particle size distribution. The research carried out in the article is aimed at creating such an inertial apparatus that would have both minimal resistance and high efficiency.

PURPOSE. Consider the possibility of reducing aerodynamic resistance by changing the design of the device, namely, by increasing the diameter of the inlet pipe in the inertial-vacuum ash collector. Consider a number of other ways to further reduce the aerodynamic drag of the apparatus. To identify the prospects and assessment of capital costs for the reconstruction of the ash collector. **METHODS.** When solving the problem, the method for calculating the dynamics of a dispersed flow in an inertial-vacuum ash collector, implemented by the MFD, was used. **RESULTS.** The article describes the relevance of the topic, considers the results of a numerical calculation. The calculation of the influence of boundary conditions, which include the flow rate at the inlet, thermal and hydraulic parameters of the flow of exhaust gases at the inlet to the ash catcher, in relation to the desired pressure drop across the apparatus, as well as the collection efficiency, was made. This article describes the process that results in a change in the hydraulic characteristics along the flow part of the IVAC. **CONCLUSION.** A change in the design of the apparatus leads to a decrease in the resistance of the IVAC, while these changes are extremely sensitive to the effect on the degree of purification. Calculations have shown that this method justifies itself in terms of reducing resistance. The pressure drops ranges from 279.8-1273 mm. water. pr. The convergence of the iterative calculation, taking into account the quality of the grid, provides flexibility, is achieved by fewer iterations, but the time spent on the calculation does not decrease.

Keywords: inertial vacuum ash collector; resistance reduction; aerodynamic drag; aerodisperse flow; high degree of purification; laden flow; numerical simulation.

For citation: Mostovenko LV., Beloglazov VP. Development of algorithm for determination of location of cable line damage using its amplitude-phase coordinate characteristics. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25(3):105-116. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-105-116.

Введение

Данная проблема впервые возникла при проведении натурного эксперимента на ТЭЦ-4 города Омска. Аппарат вследствие наличия большого сопротивления не мог пропускать проектное количество расхода газов. Исходя из проведенной хоз. договорной работы на одном из этапов было принято усовершенствовать установку до аппарата с максимальным приемлемым сопротивлением для качественной работы тягодутьевых устройств по трактам. Параметры сопротивления аппарата, расхода уходящих газов и эффективности аппарата в инерционных аппаратах сильно взаимосвязаны. Все ученые по-разному подходят к решению данной проблемы при разработке проточной части своих аппаратов. В большинстве своем помогает проведение предварительного гидравлического расчета, который позволяет оценить все линейные и местные сопротивления. В ИВЗ крайне сложно произвести расчет по причине отсутствия точных коэффициентов сопротивлений, так как многие из них не табулированы и экспериментально не выведены. Ориентируясь на данные [4,5], было из натурного эксперимента получено полное сопротивление устройства, которое суммируется из всех сопротивлений по проточной части аппарата. Решение данной проблемы позволило бы снижать сопротивление и в других гидравлических, теплообменных аппаратах подобным способом. И задумываться об этом можно было бы на этапе предварительного конструктивного расчета.

Ранее проведенные исследования [4, 5] по данному аппарату показали, что невозможно снизить сопротивление аппарата только за счет конусности угла на проточной части ИВЗ, приходится также перфорировать поверхность рассекателя, данный способ позволяет снизить сопротивление устройства на 3000 Па, если при этом будет сделано 24 отверстия. Изменения конфузальной зоны позволили уменьшить сопротивление на 10000 Па. И тем не менее, вопрос его снижения остается актуальным,

так как проектное значение – 660 Па, при этом на реально действующей установке тем временем сопротивление в ~13000 Па.

Данная работа является продолжением исследования [4, 5] и рассматривает вопрос снижения сопротивления установки за счет изменения диаметра входного патрубка [13, 15]. Особенность исследования в том, чтобы получить чистую убыль перепада давления на аппарате исследуется изначальная конструкция без дополнительных изменений (перфорированных отверстий, дополнительные особенности конфузорного участка). При данных изменениях геометрия выходного патрубка никоим образом не модифицировалась, чтобы не вносить незапланированных изменений.

На сегодняшний день разница теоретических и практических результатов сведена к минимуму. Математическая модель расчета с помощью МКР апробирована с точки зрения граничных условий и подбираемой под расчет сетки и последующие результаты можно смело применять при разработке и внедрении конструкции золоулавливающего устройства в промышленность.

Литературный обзор

В [6] вопрос снижения аэродинамического сопротивления решается тем, что изначально конструкция золоуловителя не представляет собой сложную проточную часть, принцип улавливания – преимущественно гравитационный. Частицы диаметром свыше 5-10 мкм улавливаются со степенью очистки 100%, ниже – 50%. Также сопротивление увеличивается при изменении концентрации частиц в потоке в большую сторону. А также часть сопротивления аппарата устраняет включенный в систему наддув, который позволяет увлекать за собой часть потока. В [11] теми же авторами экспериментально приводится для уменьшения сопротивления – тангенциальный раскручиватель потока (снижение сопротивления на 15%), так как энергию закрутки можно перевести в энергию осевого движения, а если встречные закрученные потоки, то сопротивление и вовсе снижается на 17,2-23,6%. В [12] подобный факт подтвержден другими учеными.

В публикациях [2,7,8] авторами рассматривается усовершенствованная установка циклона-фильтра и сопротивление пористых фильтров. В [2] крайне сложно, хотя бы по причине того, что фильтр сложно поддается физическому моделированию. Аппарат может уловить частицы диаметром 0,5-20 мкм. Процесс удержания пыли на волокнах зависит от межмолекулярного взаимодействия их поверхностных элементов – ситовый эффект, отсев, касание. Расчеты осаждения имеют особое значение для проектирования и эксплуатации систем очистки производственных выбросов с радионуклидами, бактериологически активными и подобными загрязнителями. В [7] изначально планировалось разработка аппарата с низким гидравлическим сопротивлением для улавливания тонкой фракции частиц (двойное осаждение включает в себя фильтр из ткани Пермякова, фильтрующая вставка, стенки циклона).

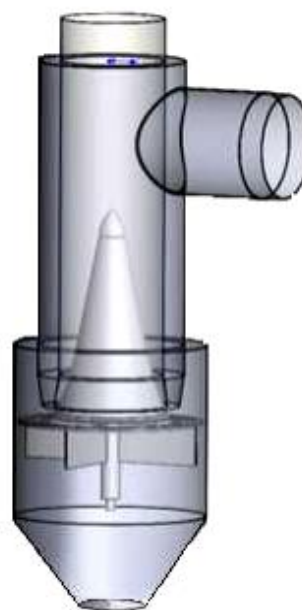
В [1,14] предложена установка концентрических направляющих, радиальные размеры которых на входе в короткий диффузор определяются с учетом профиля поля скоростей в воздуховоде перед диффузором. В результате в выходном сечении диффузора отсутствуют ярко выраженные локальные скорости газового потока, а также уменьшаются вихреобразования. Анализ результатов численных исследований показал, что установка концентрических направляющих в проточной части короткого диффузора позволяет уменьшить неравномерность профиля поля скоростей на выходе из него и снизить аэродинамическое сопротивление фильтра в целом по сравнению с вариантом диффузора без направляющих.

На рисунке 1 а) приведено изображение расположения ИВЗ на ТЭЦ-4 города Омска. На рисунке 1 б) схема испытуемой установки, а на в) изображен ход движения потока уходящих газов. На рисунке 1 г) же показано максимально увеличенное изображение диаметра входного патрубка со сдвигом внешней части корпуса.

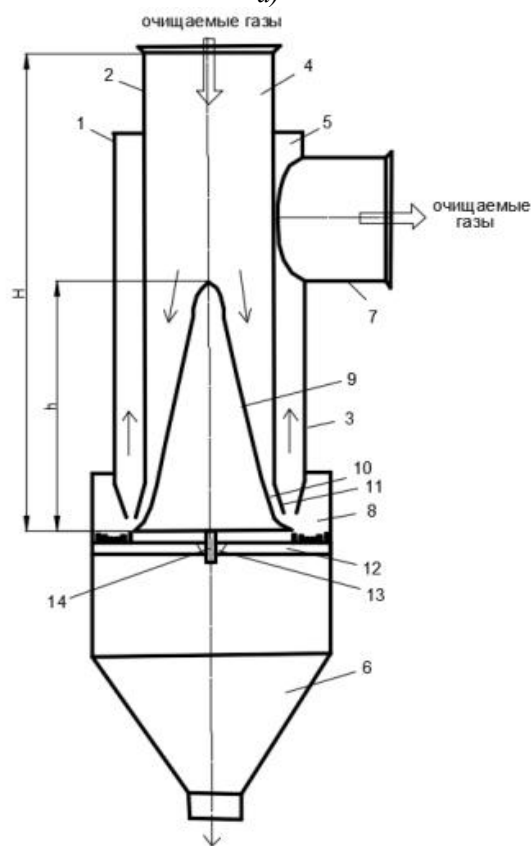
Трудности, возникающие в разработке темы связаны с тем, что каждый ученый рассматривает вопрос снижения сопротивления с точки зрения своего разрабатываемого оборудования. Сложно вырвать из контекста смысл применения определенной модификации к своей аэродинамической конструкции. Несмотря на то, что вычислительные средств почти у всех ученых одинаковые.



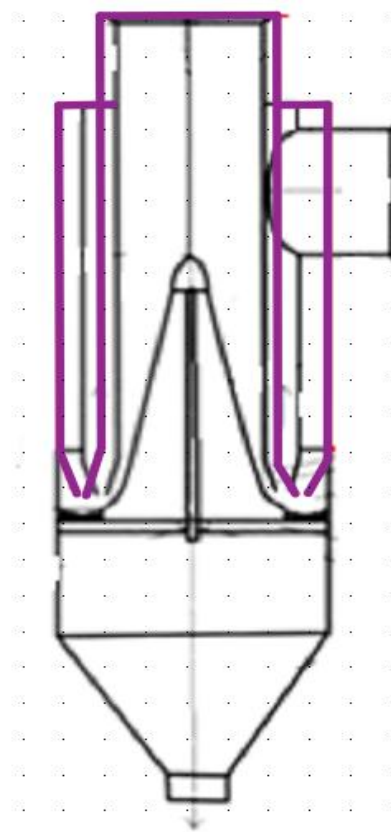
а)



б)



в)



г)

Рис. 1. Инерционно-вакуумный золоуловитель. 1 – корпус, 2, 3 – цилиндрические обечайки, 4 – входной патрубок, 5 – канал для очищенных дымовых газов, 6 – золоприемная камера (ЗПК), 7 – выходной патрубок, 8 – поворотная камера ПК, 9 – расщепитель, 10 – конфузорное выходное сопло, 11 – входной диффузорный участок, 12 – кольца, 13 – удерживающая кольца крестовина, 14 – ось.

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Fig. 1. Inertial-vacuum ash catcher. 1 - housing, 2, 3 - cylindrical shells, 4 - inlet pipe, 5 - channel for purified flue gases, 6 - ash receiving chamber (ARC), 7 - outlet pipe, 8 - PK rotary chamber, 9 - divider, 10 - confuser outlet nozzle, 11 - inlet diffuser section, 12 - rings, 13 - ring retaining cross, 14 - axis.

Материалы и методы

Для численных расчетов использовался CFD-модуль на основе метода конечных разностей (ANSYS CFX). Для сведения к минимуму погрешности вычисления сетка формировалась с выдерживанием таких критериев как:

- orthogonality angle (ортогональность),
- expansion factor (коэффициент расширения),
- aspect ratio (отношение площадей соседних ячеек).

Важно при моделировании зайти в приемлемые диапазоны по данным значениям: orthogonality angle > 20°, expansion factor < 20, aspect ratio < 100, тогда сетка и проведенный эксперимент считаются выполненными с минимальными показателями погрешности.

Математическая модель гомогенного потока приведена ниже.

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0.$$

Уравнения движения:

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_M.$$

Уравнения k - ε модели:

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j k) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon + P_{kb}; \\ \frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \varepsilon) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon + C_{\varepsilon 1} P_{kb}). \end{aligned}$$

Уравнение для эффективной и суммарной вязкости:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t, \quad \mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}.$$

Смещение частицы рассчитывается с использованием прямого интегрирования Эйлера скорости частицы по временному шагу, δt . Таким образом, $(dx_p/dt) = U_p$, перемещение частицы записывается как

$$x_p^n = x_p^0 + U_p^0 \delta t.$$

Расчет массы частиц на входе и на выходе оценивается как $m = \rho_d \frac{\pi d^2}{6}$, где ρ_d – плотность частицы, а d – ее диаметр. Аналитическое решение уравнения импульса частицы:

$$m_p \frac{dw_p}{dt} = F_D + F_B + F_R + F_{VM} + F_p + F_{BA},$$

где m_p – масса частицы, а F_{ali} принимается как сумма всех сил, влияющих на частицу, F_D – сила аэродинамического сопротивления; F_B – сила тяжести; F_R – сила, обусловленная вращательным движением; F_{VM} – сила, обусловленная ускорением частицы относительно газа; F_p – сила, обусловленная градиентом давления; F_{BA} – сила Бассе.

Основная сила, оказывающая влияние на улавливание частиц золы в ИВЗ второго поколения, это аэродинамическая сила.

Аэродинамическая сила сопротивления частицы пропорциональна скорости скольжения U_S между частицей и скоростью жидкости:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_F A_F |U_S| U_S = \frac{1}{2} \frac{24}{Re} (1 + 0,15 Re^{0,687}) \rho_p A_p |U_F - U_p| (U_F - U_p),$$

C_D – поправочный коэффициент сопротивления; ρ_F – плотность газовой составляющей потока, кг/м³; A_F – площадь, занимаемая частицей, м²; U_S – скорость скольжения, разность скорости потока U_F по отношению к скорости частицы U_p , м/с; Re – число Рейнольдса; ρ_p – плотность частицы, кг/м³.

Аэродинамическая сила F_D пропорциональна значению числа Рейнольдса. Значение

силы тяжести F_B не учитывается, т. к. поток частиц мелкодисперсен. Скорость оседания частиц из-за силы тяжести $< 0,1$ м/с. Сила Кориолиса, возникающая при вращении частицы F_R , оказывает значительное влияние только при создании крупномасштабных вихрей. Сила градиента давления F_p , виртуальная массовая сила F_{VM} , сила Бассэ F_{BA} не учитываются по причине несущественности из-за отсутствия двухфазности газового потока.

Основным показателем, характеризующим работу аппаратов очистки воздуха от пыли, является степень очистки (эффективность обеспыливания), %:

$$\eta = \frac{m_{ул}}{m_{вх}} \cdot 100.$$

$m_{ул}$ – массовый расход уловленных частиц, кг/с, $m_{вх}$ – массовый расход частиц на входе в установку, кг/с.

К-ε модель взята в расчет, так как является самой распространенной в вычислительной гидродинамике, и результаты расчетов с ней апробированы в ходе натурного эксперимента на аппарате ИВЗ промышленной версии. Также подобная модель может быть применима для потоков, в которых важно учет зон рециркуляции и подключение y^+ и производить учет влияния пристеночного слоя на аэродинамические характеристики потока. В следствие изучения и обобщения были получены следующие результаты. Отклонение результатов от данных, полученных в промышленном эксперименте до 5%, это связано с ошибками вычислительного аппарата при проработке мелкосеточной модели.

В процессе математического моделирования аппарата были созданы средствами CAD различные вариации установки с шагом увеличения диаметра на 40 мм. Далее при граничных условиях: скорость на входе (менялась в зависимости от диаметра установки 14-23 м/с при сохранении расходной характеристики потока), гранулометрический состав частиц 1-40 мкм, разрежение между входом и выходом установки, теплофизические свойства потока (вязкость потока, плотность газовой составляющей, плотность частиц). Расходная характеристика потока не менялась. Взаимосвязь потока с частицами отражалась функцией – One-way coupling (поток слабозапыленный, т.к. концентрация частиц 70 г/м³).

Результаты

В ходе проведения численных экспериментов были получены результаты расчета, сведенные в таблицу 1. Особенность данного исследования в том, что подобный способ моделирования связан с естественным снижением давления за счет расширения входного сечения.

Таблица 1

Общие данные полученные в ходе численных экспериментов
General data obtained in the course of numerical experiments

Диаметр входного патрубка d , мм	1500	1540	1580	1620	1660	1700	1740	1780	1840	1900	1960	2020	2080
Перепад давления на аппарате, dp , мм. вод. ст.	1273	863,9	570,1	495,7	490	468,9	430,2	395,8	315,6	279,8	307,8	285,9	289
Перепад давления на аппарате, dp , Па	12730	8639	5701	4957	4900	4689	4302	3958	3156	2798	3078	2859	2890
Значение максимальной скорости w_{max} , м/с	125	105	83	82,6	87,5	78	70,8	78,7	75	75	59,95	57	58
Степень эффективности очистки η , %	77,63	94,58	83,1	86,7	81,34	92,88	95,78	95,44	97,63	94,37	77	49,2	63
Максимальная скорость (развивается до/после поворота)	до	до	до	после	после	после	после	после	после	после	после	после	после

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Увеличение диаметра патрубка привело к уменьшению перепада давления на 9932 Па. Максимальная скорость развивается исключительно после разворота потока в сторону выходной части корпуса. Приемлемая степень эффективности была достигнута при 1840 мм входного диаметра, где значение перепада давлений на установке составило 315,6 Па, что на 9574 Па меньше сопротивления при изначальном диаметре.

Обсуждение

Исходя из цветовых градиентов по анализу рисунка 2 скорости доходят до 125 м/с

при этом перепад давлений 12730 Па. Максимальная скорость развивается вдоль раскателя по входному патрубку вблизи к месту до поворота потока газов. На верхней части раскателя образуется зона нулевых скоростей потока, связано это с изначально большими скоростями на входе, поток столкнулся с торцевой частью и затормозился, это также могло вызвать дополнительное сопротивление на участке. Интересная особенность – появление зоны с тем же давлением после выхода из входного патрубка. Это может быть связано с тем, что в бункере поддерживается статическое давление, которое может вытеснять поток из зоны бункера. Тем временем пылевого потока это не касается. Набранной на раскателе кинетической энергии хватает на преодоление этого барьера.

Винтовой канал и раскручивающее устройство [3] в проточной части ИВЗ выполнять неудобно. Целесообразно его располагать на выходе, но любое дополнительное вмешательство по изменению геометрии приведет к добавленному сопротивлению в полное давление на аппарате [5].

На рисунке 2 представлено распределение скоростей и давлений по проточной части установки при конструктивных данных по запатентованной установке.

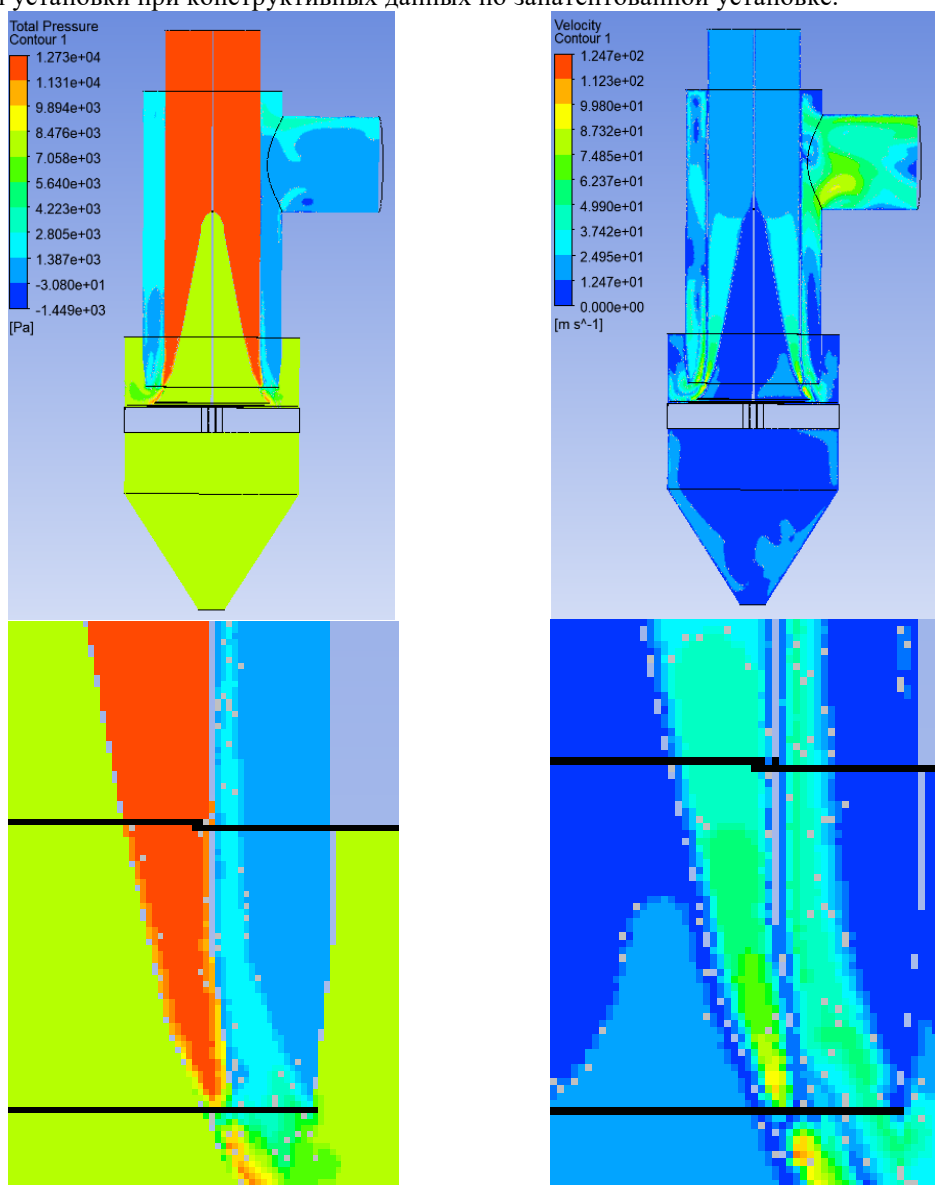


Рис. 2. Начальные параметры установки по изменению скорости и давления в проточной части установки

Fig. 2. Initial parameters of the installation for changing the speed and pressure in the flow path of the installation

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

На рисунке 3 вариант с самым большим диаметром входного патрубка. Геометрия раскателя при всех опытах оставалась неизменной.

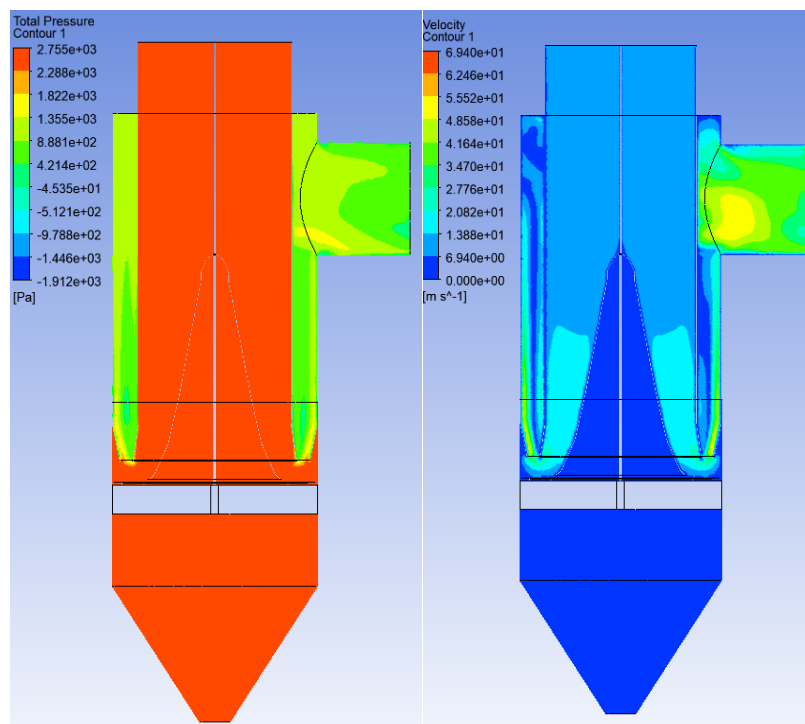


Рис. 3. Максимальный входной диаметр (2080 мм) по расчетам с плоскостью с разверкой давления и скорости по сечению

Fig. 3. Maximum inlet diameter according to calculations with a plane with a pressure and velocity scan over the section

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

На рисунке 4 и 5 приведены исследуемые зависимости. Есть оптимальные значения диаметров, при которых достигается максимальная эффективность улавливания. При диаметрах 1700-1900 мм эффективность улавливания свыше 92%, сопротивление аппарата при этом падает на 8000-10000 Па от изначального.

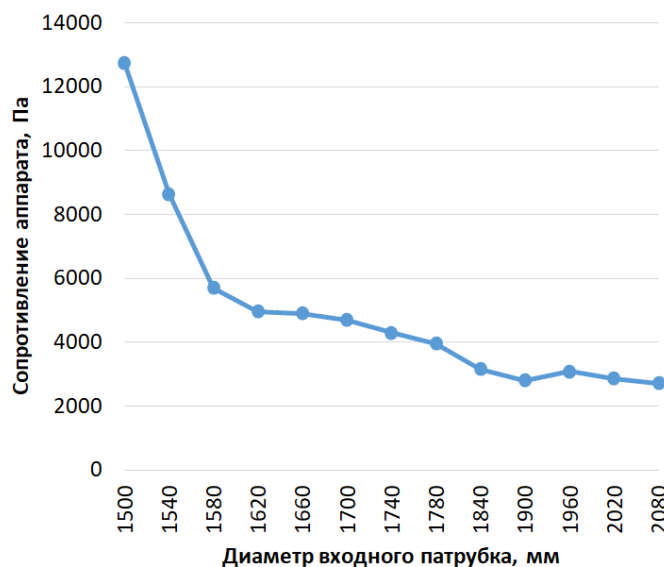


Рис. 4. Зависимость изменения перепада давления на аппарате от увеличения диаметра входного патрубка

Fig. 4. Dependence of the change in the pressure drop on the apparatus on the increase in the diameter of the inlet pipe

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Из рисунка 5 видно, что при снижении сопротивления аппарата до 184-307,8 мм.вод.ст. наблюдается снижение эффективности аппарата, что связано с соответствующими им большим диаметрам (1970-2080 мм), в конфузормом участке не достигается необходимой для разделения потока скорости (60 м/с и более). Качественное сепарирование частиц от газового потока ранее было зафиксировано именно при таких скоростях.

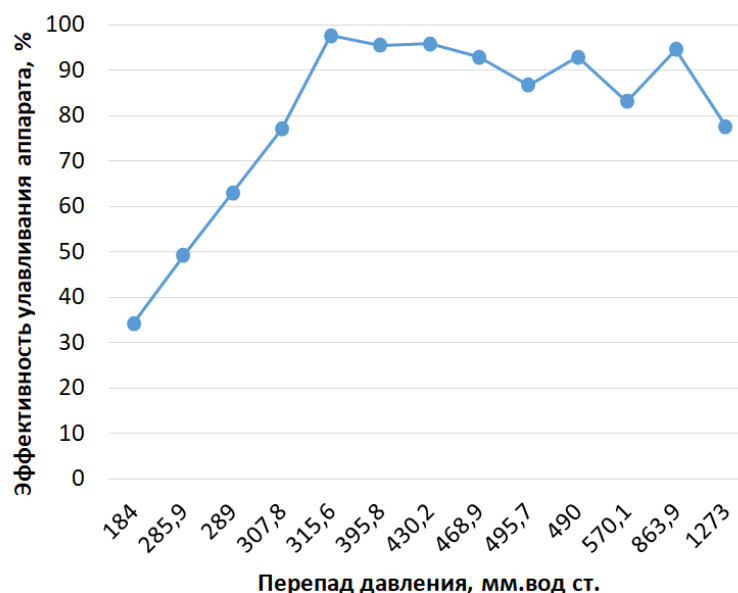


Рис. 5. Зависимость изменения эффективности на аппарате от изменения перепада давления

Fig. 5. Dependence of efficiency on the change in pressure drop across the apparatus

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Рисунок 6 иллюстрирует сложности, возникающие при очистке потока при максимальном диаметре. Степень улавливания – 50%. Это связано с:

- 1) Уменьшением скорости в конфузорном проходном сечении;
- 2) Уносом золы из бункера.

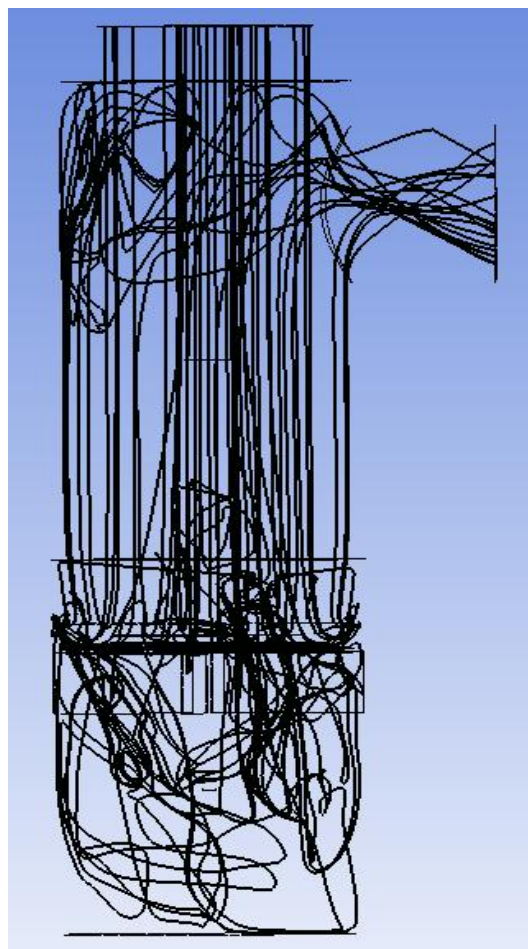


Рис. 6. Распределение концентрации запыленности потока по мере интенсивности улавливания золы.

Fig. 6. Distribution of the dust concentration of the flux as the ash is captured

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Заключение

Исходя из полученных данных можно отметить, что результаты расчетов, связанные с увеличенными размерами входных сечений, позволяют провести дополнительные исследования. Эти исследования будут связаны с уже полученными результатами расчетов, проведенными ранее для различных внутренних изменений аппарата, что позволяет надеяться на получение достаточно надежных расчетных данных при увеличенных входных размерах и эффективном золоулавливании.

Литература

1. Yusha V. L., Fil'kin N. Yu. Numerical analysis of gas dynamic efficiency of short diffusers with internal guiding blades // Chemical and Petroleum Engineering. 2016. Vol. 52, Issue 7. P. 484–487.
2. Дмитриев, А. Н. Взаимодействия при касании препятствия взвешенной в потоке частицей / А. Н. Дмитриев, М. Г. Зиганшин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2008. – № 3-4. – С. 58-63.
3. Злочевский, В. Л. Аэродинамическое сопротивление винтового канала в циклоне-сепараторе / В. Л. Злочевский, К. А. Мухопад // Техника и технология пищевых производств. – 2017. – № 3(46). – С. 102-107.
4. Мостовенко, Л. В. Модернизация инерционно-вакуумного золоуловителя / Л. В. Мостовенко, В. П. Белоглазов // Надежность и безопасность энергетики. – 2022. – Т. 15. – № 2. – С. 120-125.
5. Мостовенко ЛВ. Флуктуации запыленного потока и их влияние на сопротивление золоулавливающего аппарата / ЛВ. Мостовенко, ВП. Белоглазов // Актуальные вопросы энергетики. 2022. Т. 4. № 1. С. 11-19. doi 10.25206/2686-6935-2022-4-1-11-19.
6. Dust emissions' reduction into the atmosphere by environmental-engineering systems of smallsize devices with counter-swirling flows (CSF) / N. M. Sergina, A. A. Sakharova, V. N. Azarov [et al.] // E3S Web of Conferences: International Scientific Conference "Construction and Architecture: Theory and Practice for the Innovation Development", CATPID 2019, Kislovodsk, 01–05 октября 2019 года. – Kislovodsk: EDP Sciences, 2019. – P. 01037. – DOI 10.1051/e3sconf/201913801037.
7. Замалиева, А. Т. Усовершенствованная установка фильтрации газа для подготовки топлива энергетических систем / А. Т. Замалиева, М. Г. Зиганшин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2019. – Т. 21. – № 5. – С. 124-131. – DOI 10.30724/1998-9903-2019-21-5-124-131.
8. Belyaeva, G. I. Experimental and calculated testing of the efficiency of cyclone filtering devices / G. I. Belyaeva, A. T. Zamalieva, M. G. Ziganshin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 5, 19 Mira Street, Ekaterinburg, 21–22 мая 2019 года. – 19 Mira Street, Ekaterinburg, 2020. – P. 012067. – DOI 10.1088/1757-899X/972/1/012067.
9. Fassani, F. L. A study of the effect of high inlet solids loading on a cyclone separator pressure drop and collection efficiency / F. L. Fassani, L. Goldstein // Powder Technology. – 2000. – Vol. 107. – No 1-2. – P. 60-65. – DOI 10.1016/S0032-5910(99)00091-1.
10. L. Sun, Z. Ye, R. Cui, X. Huang, and C. Wu, "Eliminating isomorphism identification method for synthesizing nonfractionated kinematic chains based on graph similarity," Mechanism and Machine Theory, vol. 167, p. 104500, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2021.104500.
11. К вопросу о снижении энергозатрат в системах обеспыливания выбросов в атмосферный воздух / Н. М. Сергина, А. В. Курасов, В. М. Зотов, М. С. Соломахин // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2022. – № 3(88). – С. 165-171.
12. Чичиров, К. О. Экспериментальные исследования характеристик первичного ввода пылеуловителя на встречных закрученных потоках / К. О. Чичиров, М. К. Бочаров, Т. Т. Фахриев // Проблемы энергосбережения в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах : сборник статей XXI Международной научно-практической конференции, Пенза, 28–29 апреля 2020 года / Под редакцией Т.И. Королевой. – Пенза: Автономная некоммерческая научно-образовательная организация «Приволжский Дом знаний», 2020. – С. 183-188.
13. Луканин, Д. В. Основные параметры, влияющие на пылеулавливание и структуру потоков в аппаратах ВЗП / Д. В. Луканин, В. И. Милохова // Теоретический и практический потенциал современной науки : Сборник научных статей / Научный редактор Д.В. Фурсова. – Москва : Издательство "Перо", 2019. – С. 87-89.

14. Филькин, Н. Ю. Повышение газодинамической эффективности фильтров с коротким диффузором при работе в завихренном потоке / Н. Ю. Филькин, В. Л. Юша, А. А. Капелюховская // Омский научный вестник. Серия Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. – 2018. – Т. 2. – № 1. – С. 72-79. – DOI 10.25206/2588-0373-2018-2-1-72-79.

15. Wood, R. M. Aerodynamic drag and drag reduction: Energy and energy savings / R. M. Wood // 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, 06–09 января 2003 года. – Reno, NV: Без издательства, 2003.

Авторы публикации

Мостовенко Любовь Владимировна – канд. техн. наук, доцент кафедры энергетики, Нижневартковский государственный университет.

Белоглазов Владимир Петрович – канд. техн. наук, доцент кафедры энергетики, Нижневартковский государственный университет.

References

1. Yusha VL, Fil'kin NYu. Numerical analysis of gas dynamic efficiency of short diffusers with internal guiding blades. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2016;52(7):484–487.
2. Dmitriev AN, Ziganshin MG. Vzaimodeistviya pri kasanii prepyatstviya vzveshennoi v potoke chastitse. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2008;(3-4): 58-63.
3. Zlochevskii VL, Mukhopad KA. Aerodinamicheskoe soprotivlenie vintovogo kanala v tsiklone-separatore. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv*. 2017;3(46):102-107.
4. Mostovenko LV, Beloglazov VP. Modernizatsiya inertsiionno-vakuumnogo zoloulavitelya. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki*. 2022;15(2):120-125.
5. Mostovenko LV, Beloglazov VP. Fluktuatsii zapylennogo potoka i ikh vliyanie na soprotivlenie zoloulavlivayushchego apparata. *Aktual'nye voprosy energetiki*. 2022. 4(1): 11-19.
6. Sergina NM, Sakharova AA, Azarov VN. *Dust emissions' reduction into the atmosphere by environmental-engineering systems of smallsize devices with counter-swirling flows* (CSF). E3S Web of Conferences: International Scientific Conference «Construction and Architecture: Theory and Practice for the Innovation Development», CATPID 2019. 2019: 01037.
7. Zamalieva AT, Ziganshin MG. Usovershenstvovannaya ustanovka fil'tratsii gaza dlya podgotovki topliva energeticheskikh system. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2019;21(5):124-131.
8. Belyaeva GI, Zamalieva AT, Ziganshin MG. *Experimental and calculated testing of the efficiency of cyclone filtering devices*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020;012067.
9. Fassani FL, Goldstein L. A study of the effect of high inlet solids loading on a cyclone separator pressure drop and collection. *Powder Technology*. 2000; 107(1-2): 60-65.
10. Sun L, Ye Z, Cui R, et al. Eliminating isomorphism identification method for synthesizing nonfractionated kinematic chains based on graph similarity. *Mechanism and Machine Theory*. 2021; (167): 104500.
11. Sergina NM, Kurasov AV, Zotov VM, et al. K voprosu o snizhenii energozatrat v sistemakh obespylivaniya vybrosov v atmosferyni vozdukh. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura. 2022. 3(88): 165-171.
12. Chichirov KO, Bocharov MK, Fakhriev TT. *Eksperimental'nye issledovaniya kharakteristik pervichnogo vvoda pyleulovitelya na vstrechnykh zakruchennykh potokakh. Problemy energosberezheniya v promyshlennom i zhilishchno-kommunal'nom kompleksakh* : sbornik statei XXI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Penza, 28–29 aprelya 2020 goda. 2020: 183-188.
13. Lukanin DV, Milokhova VI. Osnovnye parametry, vliyayushchie na pyleulavlivanie i strukturu potokov v apparatakh VZP. *Teoreticheskii i prakticheskii potentsial sovremennoi nauki* : Sbornik nauchnykh statei. 2019:87-89.
14. Fil'kin NYu, Yusha VL, Kapelyukhovskaya AA. Povyshenie gazodinamicheskoi effektivnosti fil'trov s korotkim diffuzorom pri rabote v zavikhrennom potoke. *Omskii nauchnyi*

vestnik. Seriya Aviatsionno-raketnoe i energeticheskoe mashinostroyeniye. 2018. 2 (1): 72-79.

15. Wood RM. Aerodynamic drag and drag reduction: *Energy and energy savings*. 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno. 2003.

Authors of the publication

Lyubov V. Mostovenko – Nizhnevartov State University, Nizhnevartovsk, Russia.

Vladimir P. Beloglazov – Nizhnevartov State University Nizhnevartovsk, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено 15.12.2022 г.

Отредактировано 03.05.2023 г.

Принято 15.06.2023 г.