

МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

УДК 517.9:66.021.1

Дмитрий Сергеевич Процко

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», инструктор практического обучения, Россия, Воронеж, e-mail: protsko_dmitriy@mail.ru

Сергей Юрьевич Панов

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», доктор технических наук, профессор кафедры математики, Россия, Воронеж, e-mail: su-panov@yandex.ru

Анатолий Анатольевич Хвостов

ФГБОУВО «Воронежский государственный технический университет», доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики и механики, Россия, Воронеж, e-mail: Khvtol1974@yandex.ru

Елена Алексеевна Шипилова

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», кандидат технических наук, доцент кафедры математики, Россия, Воронеж, e-mail: elen_ship@list.ru@rambler.ru

Разработка математической модели тангенциальной регенерации фильтровальных перегородок малогабаритных пылеулавливающих аппаратов энергетических установок

Авторское резюме

Состояние вопроса. Вектор развития энергетики в настоящее время направлен на расширение используемых возобновляемых видов топлива. Одним из наиболее существенных последствий, связанных с сжиганием топлива, является поступление в атмосферу загрязняющих веществ. Особенно это актуально для малых энергетических установок, подведомственных Управлению коммунального хозяйства Министерства обороны РФ. Важным звеном решения проблемы, наряду с модернизацией действующего оборудования, является создание принципиально нового газоочистного оборудования, сочетающего такие характеристики, как высокая эффективность очистки, сниженное гидравлическое сопротивление и уменьшенные габариты установки. Совокупность этих вопросов обуславливает актуальность построения математических моделей функционирования фильтровальной аппаратуры.

Материалы и методы. Для решения поставленной задачи используется метод математического моделирования на основе математического аппарата аэрогидромеханики с применением $k-\varepsilon$ модели турбулентности. Изучение влияния параметров на протекание процесса выполнено численными методами в программной среде вычислительной гидродинамики.

Результаты. Предложена математическая модель, позволяющая определять и строить поля давлений и скоростей в зазоре между корпусом фильтра и фильтрующим элементом при различных скоростях входного газового потока и дающая возможность оперативно оценивать степень засорения фильтра по динамике изменения давления на выходном патрубке фильтра. Полученные в ходе численного эксперимента результаты подтверждены лабораторными исследованиями.

Выводы. Разработанная математическая модель процесса тангенциальной регенерации фильтровальных перегородок позволяет оценить поля давлений и скоростей в зазоре, способствующие уносу частиц пыли, и тем самым прогнозировать эффективность фильтра в зависимости от удельной газовой нагрузки и ширины зазора. Результаты численных экспериментов согласуются с физическими представлениями о процессе и доказывают перспективность метода создания тангенциального потока для удаления осевших частиц дисперсной фазы с поверхности фильтровального элемента. Предложенная модель может быть использована в инженерной практике проектирования фильтров и управления процессом фильтрования.

Ключевые слова: математическое моделирование, численные методы, комплексы программ, тангенциальное фильтрование, поле давлений, поле скоростей

Dmitriy Sergeevich Protsko,

Military Education and Scientific Center of the Air Force “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin”, Practical Training Instructor, Russia, Voronezh, e-mail: protsko_dmitriy@mail.ru

Sergey Yuryevich Panov,

Military Education and Scientific Center of the Air Force “Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin”, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Mathematics Department, Russia, Voronezh, e-mail: su-panov@yandex.ru

Anatoly Anatolyevich Khvostov,

Voronezh State Technical University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Applied Mathematics and Mechanics Department, Russia, Voronezh, e-mail: Khvtol1974@yandex.ru

Elena Alekseevna Shipilova

Military Education and Scientific Center of the Air Force “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin”, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Mathematics Department, Russia, Voronezh, e-mail: elen_ship@list.ru@rambler.ru

Development of mathematical model of tangential regeneration of filter partitions of small-sized dust collecting devices of power plants

Abstract

Background. The energy development vector is currently aimed at increasing application of renewable fuels. Air pollution is one of the most significant consequences of fuel combustion. The issue is of current importance for small power plants subordinate to the Department of Public Utilities of the Ministry of Defense of the Russian Federation. To solve the problem, it is necessary to both update the existing equipment and to develop fundamentally new gas cleaning equipment that have high cleaning efficiency, reduced hydraulic resistance and smaller size. Thus, these issues determine the relevance of development of mathematical models of filtering equipment operation.

Materials and methods. To solve the problem, the method of mathematical modeling is used. The model uses the mathematical apparatus of aerohydraulics using the $k-\varepsilon$ turbulence model. The study of the influence of parameters on the flow of the process has been carried out by numerical methods in the computational fluid dynamics software environment.

Results. A mathematical model is proposed that allows us to determine and design pressure and velocity fields in the gap between the filter housing and the filter element at different speeds of the inlet gas flow. It makes possible to quickly assess the degree of clogging of the filter according to the dynamics of pressure changes at the outlet pipe of the filter. The results of the numerical experiment have been confirmed by laboratory studies.

Conclusions. The developed mathematical model of the process of tangential regeneration of filter baffles makes it possible to estimate the pressure and velocity fields in the gap that influence on the entrainment of dust particles. Thereby one can predict the efficiency of the filter depending on the specific gas load and the width of the gap. The results of numerical experiments are consistent with the physical concepts of the process. They prove the prospects of the method to create a tangential flow to remove the settled particles of the dispersed phase from the surface of the filter element. The developed model can be used in the engineering practice of designing filters and controlling the filtration process.

Key words: mathematical modeling, numerical methods, software packages, tangential filtering, pressure field, velocity field

DOI: 10.17588/2072-2672.2022.1.064-072

Введение. В современных условиях ужесточения экологического законодательства в области охраны атмосферы в промышленной энергетике актуальной является задача создания новых аппаратов очистки отходящих газов, удовлетворяющих выдвигаемым требованиям [1]. Особенно остро эта проблема стоит в энергетическом хозяйстве Министерства обороны РФ, где используются малые локальные энергетические установки, работающие зачастую на местных видах топлива (уголь, торф, мазут, древесина и т.п.) и выделяющие при горении загрязняющие вещества [2]. Для энергетических установок малой мощности необходима разработка малогабаритных высокоэффективных энергосберегающих газоочистных аппаратов, работающих при комбинации различных методов очистки.

Фильтры с пористыми перегородками имеют ряд преимуществ над другими аппаратами очистки газов (скрубберов, циклонов, электрофильтров), в особенности в более высокой степени очистки, меньшей зависимости характеристик работы аппарата от изменений параметров пылегазовых потоков [3]. Они могли бы частично решить проблему выбросов, однако сдерживающими факторами широкого применения данных устройств являются необходимость периодической очистки фильтровальной поверхности от накопившейся пыли и конструктивная сложность систем регенерации [4].

Одним из перспективных направлений в области разработки аппаратов очистки газов от механических примесей может стать сочетание фильтрации с силовым воздействием на поток, создающее дополнительное поле массовых сил, позволяющее улучшить условия очистки и восстановить пропускную способность фильтра самоочисткой фильтровальной перегородки от накопленного осадка. К таким устройствам относятся гидродинамические фильтры, реализующие принцип тангенциального фильтрации [5]. От традиционного фильтрации тангенциальное отличается тем, что очищаемая среда имеет касательную к

фильтровальной поверхности компоненту скорости v_k [6].

Основные результаты. Рассматривается комбинированный аппарат очистки (рис. 1), состоящий из цилиндрического корпуса 1, тангенциального патрубка подачи в аппарат пылегазового потока 5, конического днища 2 со штуцером удаления уловленной пыли 3, выходного патрубка 8. Выходной патрубок напрямую соединен с цилиндрическим фильтровальным элементом 4, изготовленным из пористого материала со связанной структурой слоя (керамика, металлокерамика, перфорированная фольга, металлические или полимерные жесткие сетки и т.п.).

На выходном патрубке крепится лопастное устройство по типу ветряного колеса, а патрубок с соединенным фильтровальным элементом имеет возможность вращения вокруг своей оси в подшипникоуплотнительном устройстве 7. Лопасти 6 ветряного колеса располагаются напротив тангенциального патрубка таким образом, чтобы поступающий через патрубок пылегазовый поток воздействовал на лопасти, заставляя вращаться фильтр-элемент.

Фильтровальный элемент, в свою очередь, концентрично помещен внутри неподвижно установленной в корпусе обечайки в виде эллиптического цилиндра 10 с зазором S , величина которого зависит от требуемой степени очистки фильтрующей поверхности.

Величина зазора подбирается из следующих соображений: чем больше слой осадка на фильтрующей поверхности, тем выше эффективность улавливания частиц, но и больше гидравлическое сопротивление; при незначительном слое осадка степень очистки низкая, как и гидравлическое сопротивление. Экспериментально или путем расчета подбирается величина зазора, которая при непрерывной регенерации фильтрующей поверхности обеспечивала бы сохранение на поверхности слоя осадка, при котором сохранялась бы высокая степень очистки при приемлемом гидравлическом сопротивлении.

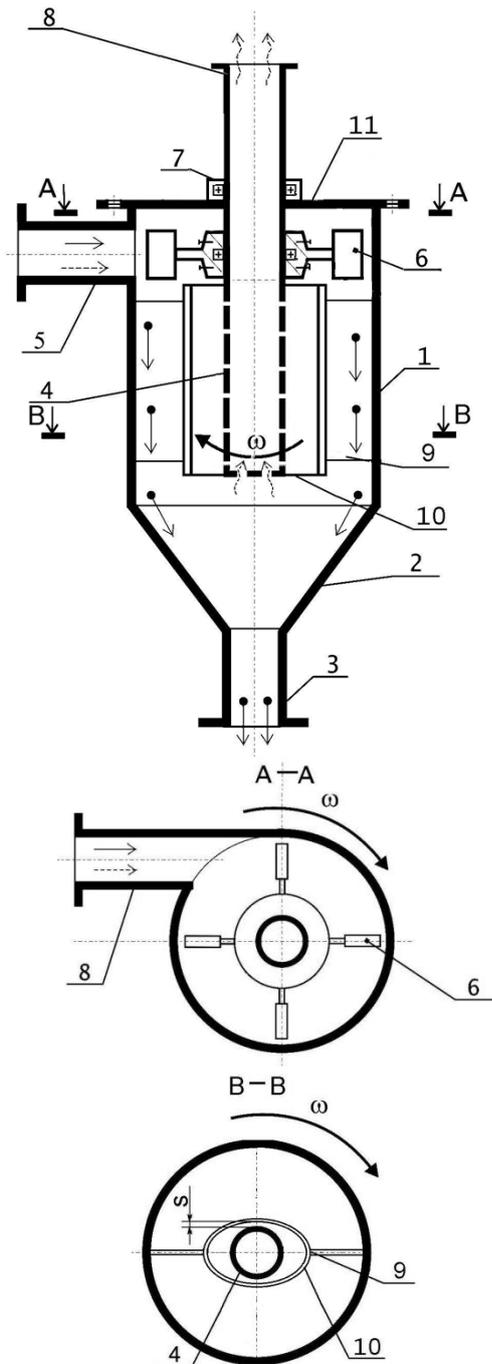


Рис. 1. Фильтр-циклон: 1 – цилиндрический корпус; 2 – коническое днище; 3 – штуцер удаления уловленной пыли; 4 – фильтровальный элемент; 5 – тангенциальный патрубок; 6 – лопасти; 7 – подшипнико-уплотнительное устройство; 8 – выходной патрубок; 9 – крепление обечайки; 10 – эллиптическая обечайка

Вращение фильтровальной трубы 4 вместе с ветряным колесом способствует созданию в зазоре S достаточно большой интермиттирующей движущей силы, которая обеспечивает непрерывную регенерацию фильтрующей поверхности и увеличение осевой составляющей скорости частиц

пыли, которая направляет частицы пыли в бункер, что повышает эффективность работы фильтр-циклона. Кроме того, наличие уменьшенного зазора между корпусом и обечайкой по большой оси эллиптической поверхности способствует увеличению тангенциальной составляющей скорости и, следовательно, общей эффективности очистки.

При работе устройства наблюдается непрерывное удаление осаждающейся на поверхности фильтровального элемента пыли.

Целью математического моделирования являлось определение влияния геометрических параметров на структуру течения в кольцевом зазоре.

Как было показано выше, с внешней стороны фильтровального элемента помещена обечайка в виде эллиптического цилиндра, обеспечивая заданную величину зазора между корпусом фильтрующего элемента и малой осью эллиптического сечения патрона (рис. 2).

В зависимости от угла поворота фильтрующего элемента, расстояние ε от кромки перегородки до поверхности фильтрующего элемента изменяется по закону

$$\varepsilon = \frac{ab}{\sqrt{a^2 \sin^2 \alpha + b^2 \cos^2 \alpha}} - r_{\phi}, \quad (1)$$

где α – угол поворота; a и b – полуоси эллипса (образующей цилиндра патрона фильтра); r_{ϕ} – радиус фильтрующего элемента.

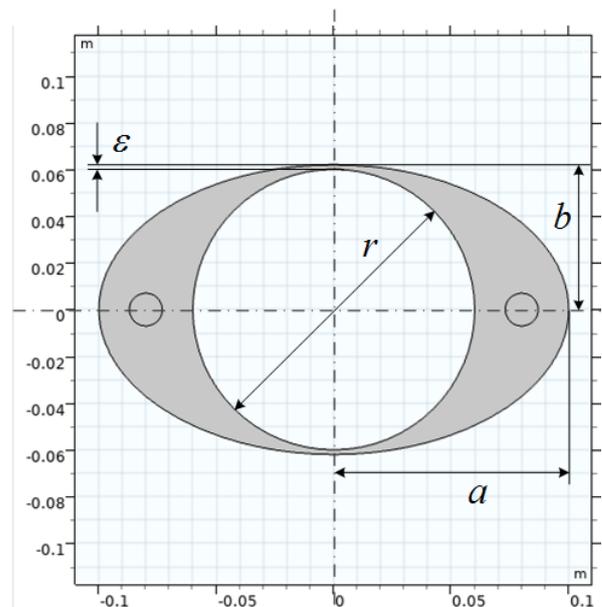


Рис. 2. Геометрическая схема сечения фильтра

Изменение величины зазора за один оборот показано на рис. 3, где пунктиром обозначен заданный рабочий диапазон угла поворота, в котором заданная скорость обеспечивается значением величины щелевого зазора между корпусом фильтрующего элемента и узкой частью эллиптического сечения патрона.

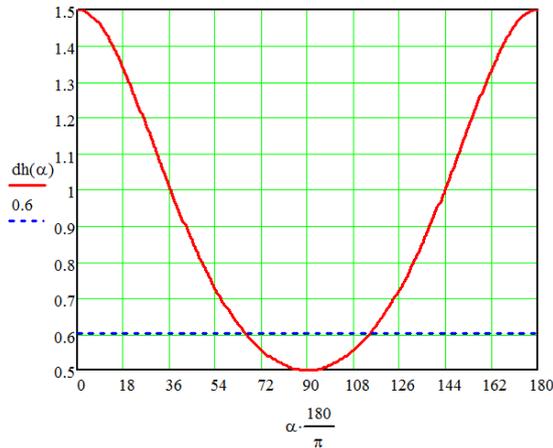


Рис. 3. Изменение величины щелевого зазора при повороте фильтрующего элемента на 180 град. ($a = 3$ см, $b = 2$ см, $r = 1,5$ см)

Условие для расчета необходимого угла, обеспечивающего заданную скорость (величину щелевого зазора), определяется из условия

$$\arcsin \left[\sqrt{\frac{\left(\frac{ab}{h_{\text{пер}} + r_{\text{ф}}}\right)^2 - b^2}{a^2 - b^2}} \right] \leq \alpha \leq \pi - \arcsin \left[\sqrt{\frac{\left(\frac{ab}{h_{\text{пер}} + r_{\text{ф}}}\right)^2 - b^2}{a^2 - b^2}} \right], \quad (2)$$

где $h_{\text{пер}}$ – величина щелевого зазора.

Чтобы определить требуемое значение $h_{\text{пер}}$, необходимо рассчитать поле скоростей в зазоре. Для этого требуется математическая модель, описывающая поля скоростей в пространстве между корпусом фильтра и фильтрующим элементом. Пренебрегая расходом воздуха через фильтрующий элемент в режиме регенерации, представлена расчетная схема камеры фильтрования (рис. 4). Температура воздуха принята равной 25 °С,

плотность воздуха $1,1839$ кг/м³, вязкость воздуха $18,6$ мкПа·с. Размеры фильтра: патрон – эллиптический цилиндр с полуосями $a = 3$ см, $b = 2$ см, $r = 1,5$ см, длина фильтра $L = 20$ см. Скорость потока в щелевом зазоре достигала 5 – 25 м/с. Расчетный критерий Рейнольдса для этих условий составил порядка 130000 , что соответствует турбулентному режиму течения.

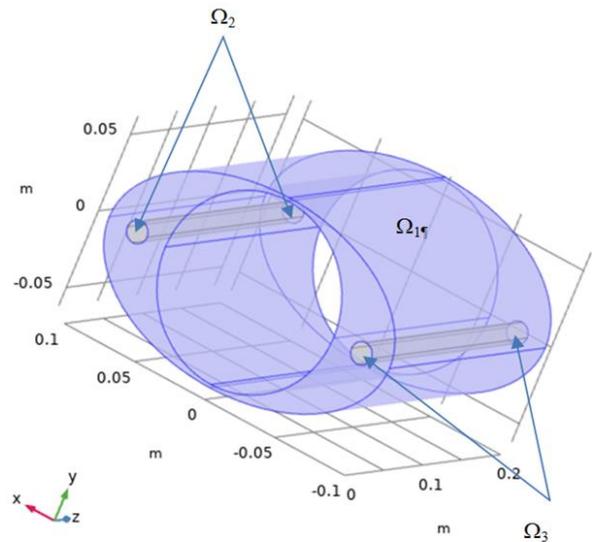


Рис. 4. Расчетная схема камеры фильтрования

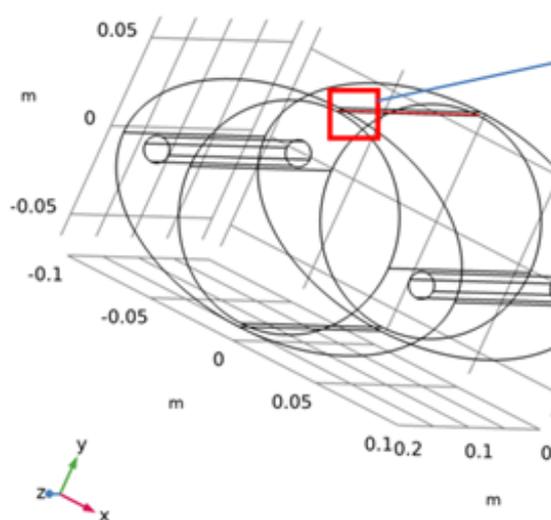
Уравнения движения и неразрывности для турбулентного режима (k - ε модель турбулентности) течения сплошной среды в установившемся изотермическом режиме [8–11] с граничными условиями на стенках $\Omega_1: \mathbf{u} = 0$, на входных каналах $\Omega_2: \mathbf{u} = -u_0 \mathbf{n}$, на выходных каналах $\Omega_3: [-p\mathbf{I} + \mathbf{K}]\mathbf{n} = P_a \mathbf{n}$ имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla [-p\mathbf{I} + \mathbf{K}], \\ \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0, \\ \mathbf{K} = (\mu + \mu_T) (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} (\mu + \mu_T) (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{I} - \frac{2}{3} \rho k \mathbf{I}, \\ \mu_T = \rho_b C_{\mu} \frac{k^2}{\varepsilon}, \\ \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) k = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon, \\ \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \varepsilon = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}, \end{cases} \quad (3)$$

где \mathbf{u} – вектор скорости; \mathbf{n} – вектор нормали к соответствующей границе расчетной области; p – давление; P_a – атмосферное давление; \mathbf{K} – тензор вязких напряжений; \mathbf{I} – единичный тензор; u_0 – скорость входного потока; ρ – плотность воздуха; μ – динамическая вязкость; μ_T – турбулентная динамическая вязкость; k – кинетическая энергия турбулентности; ε – турбулентная диссипация; C_{μ} , $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_k , σ_ε – эмпирические коэффициенты [11]; P_k – генерация; верхний индекс T – операция транспонирования.

Математическая модель (3) позволяет оценить поля давлений и скоростей в установившемся режиме в зазоре между корпусом фильтрующего элемента и узкой частью эллиптического сечения патрона. Это дает возможность подобрать необходимые геометрические размеры и скорость воздуха на входе в фильтр, обеспечивающие необходимую скорость воздуха в зазоре и унос частиц пыли. Также модель позволяет оценить давление на выходных патрубках при уменьшении размера щелевого зазора за счет роста пылевого слоя, что может быть использовано для косвенного контроля степени засоренности фильтра и прогноза времени его регенерации. Результаты моделирования представлены на рис. 5, 6.

Решение (3) осуществлено численно методом конечных элементов.



Для оценки скорости на поверхности пылевого слоя рассмотрено распределение скорости вдоль прямой линии, соединяющей точки с координатами $(0; r + \delta D; 0)$ и $(0; r + \delta D; L_f)$ в декартовой системе координат (рис. 5), где δD соответствует толщине пылевого слоя, L_f – длина корпуса фильтра. Скорость и давление на этом расстоянии от фильтрующего элемента характеризуют силы, действующие на слой пыли без учета гидравлического сопротивления этого слоя (рис. 6).

Таким образом, задаваясь входной скоростью потока воздуха в режиме регенерации, можно подобрать необходимую скорость воздуха в зазоре, обеспечивающую унос частиц пыли. Для оценки зависимости чувствительности изменения давления на выходных патрубках к толщине слоя пыли построена зависимость среднеинтегральной величины давления от толщины при разных значениях скорости потока на входе в фильтр (рис. 7).

Анализ полученных зависимостей (рис. 6) показывает, что скорость воздуха распределена практически равномерно по координате z и может быть изменена с помощью скорости входного потока в корпус фильтра. Это дает возможность управления процессом регенерации фильтра.

Рис. 5. Расположение контрольной линии для оценки скорости и давления на поверхности пылевого слоя

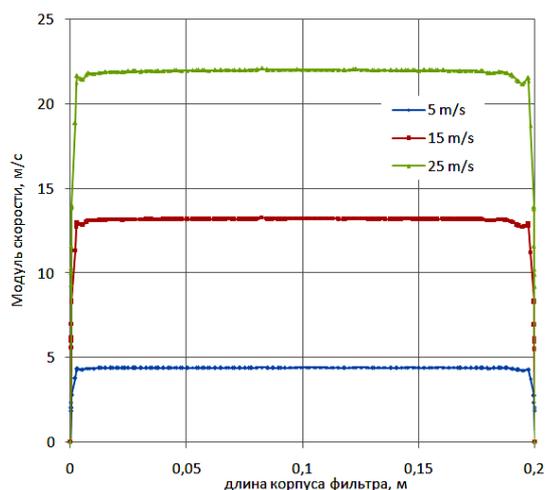


Рис. 6. Распределение скорости по длине контрольной линии

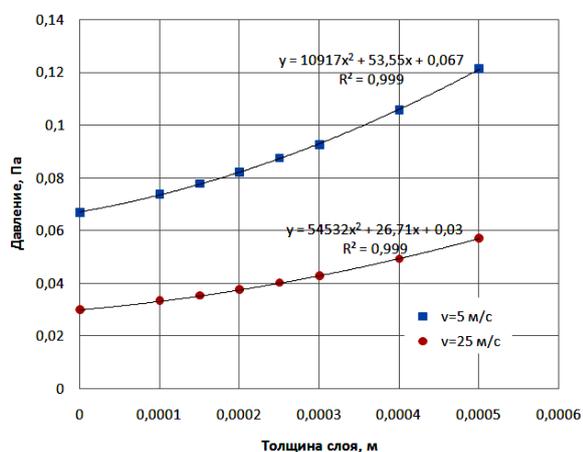


Рис. 7. Зависимость давления от толщины пылевого слоя

Анализ зависимостей (рис. 7) показывает, что существует тесная связь между толщиной пылевого слоя и давлением в камере фильтра. При этом для заданных геометрических размеров и скорости входного потока эта зависимость описывается многочленом второго порядка с коэффициентом корреляции не меньше 0,997, что дает возможность использовать значение этого давления для косвенной оценки степени засоренности фильтра. Это соответствует научным представлениям о рассматриваемом процессе.

Для верификации математического моделирования и подтверждения принятых научных положений были проведены экспериментальные исследования на модельном фильтре с тангенциальным входом (рис. 8).

При проведении экспериментов использован цилиндрический металлокерамический фильтрующий элемент $\varnothing 40 \times 4$ мм

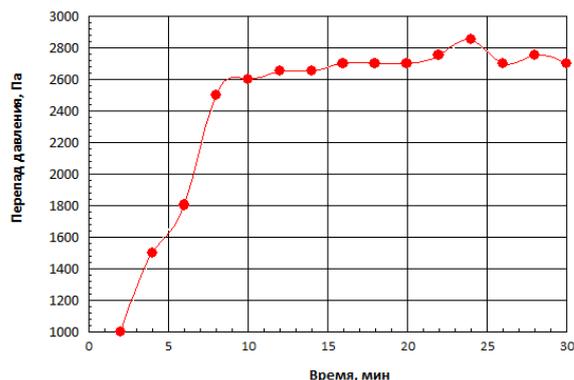
длиной 100 мм. Материал фильтра нержавеющая сталь ОХ18Н10 с фракциями $< 0,063$ мм. Скорость во входном патрубке изменялась в диапазоне $w = 5\text{--}25$ м/с. Начальное запыление $1,5$ г/м³, пыль – зола (медианный размер $d_m = 30$ мкм).



Рис. 8. Модельный фильтр

При испытаниях исследовались аэродинамические характеристики фильтра при различных значениях ширины зазора перегородки $s = 2\text{--}10$ мм.

Приведенная на рис. 9 характеристика отражает работу фильтра в режиме саморегенерации. Анализ графика показывает, что через определенный интервал времени наступает равновесный режим, при котором количество частиц пыли, поступающих на фильтр, примерно совпадает с количеством частиц, удаляемых находящим потоком с поверхности фильтровальной перегородки.

Рис. 9. Зависимость $\Delta P = f(\tau)$ проточного фильтра

На рис. 10 показано поле скоростей, полученное при аэродинамических измерениях по сечению аппарата в зазоре с помощью прецизионного термоанемометра.

Построенные поля скоростей показывают значения локальных скоростей, которые характеризуются уменьшением скорости при

движении от входного патрубка к периферии фильтровальной перегородки и увеличением скорости с уменьшением зазора.

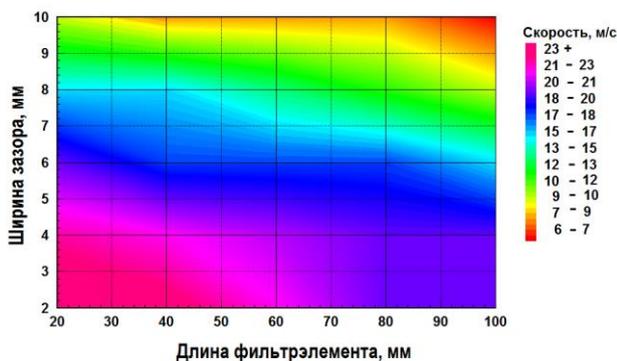


Рис. 10. Распределение поля скоростей в фильтре в режиме регенерации

Выводы. Результаты численного моделирования течения газа в зазоре между вращающимся цилиндрическим фильтровальным элементом и эллиптической обечайкой в трехмерной постановке и расчеты поля давлений и скоростей в зазоре между корпусом фильтра и фильтрующим элементом при различных скоростях входного газового потока в натурном эксперименте подтверждают, что при заданном угле поворота в эллиптической обечайке создается величина зазора, обеспечивающая гидродинамический поток, реализующий унос частиц пыли при одновременном сохранении приемлемого гидродинамического сопротивления. Построенная на основе вычислительного эксперимента зависимость давления на выходном патрубке от толщины пылевого слоя и, следовательно, степени засорения фильтра показывает, что повышение эффективности работы гидродинамического фильтра в заданном режиме возможно за счет выбора геометрических параметров фильтра (величины зазора, толщины фильтровального слоя, габаритов корпуса и т.д.), а также режимов его работы (объемного расхода, скорости вращения).

Внедрение фильтр-циклонов с тангенциальной регенерацией позволит частично (за счет удаления твердых частиц) решить экологическую проблему использования малых энергетических установок.

Список литературы

1. **Жабо В.В.** Охрана окружающей среды на ТЭС и АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 2012. – 240 с.

2. **Александров С.В., Макаrchук Г.В., Медведева Л.В.** Экологические аспекты при работе дизельной теплоэлектростанции с активным котлом-утилизатором высокотемпературного кипящего слоя // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». – 2019. – № 1. – С. 51–59.

3. **Расчет** и выбор пылеулавливающего оборудования: учеб. пособие / В.А. Горемыкин, М.К. Аль-Кудях, Ю.В. Красовицкий и др. – Воронеж: Воронежская государственная архитектурно-строительная академия, 2000. – 326 с.

4. **Белых О.Н., Зинковский А.В., Момотов В.С.** Особенности процесса регенерации фильтровальных перегородок // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2015. – № 1(63). – С. 175–179.

5. **Изучение** процесса тангенциального фильтрования с низкой движущей силой при разделении пылегазовых потоков / Ю.Н. Шаповалов, Ю.В. Красовицкий, Д.В. Никитенко, О.А. Панова // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2007. – № 3. – С. 11–12.

6. **Девисилов В.А., Шарай Е.Ю.** Гидродинамическое фильтрование // Безопасность в техносфере. – 2015. – № 3. – С. 68–80.

7. **Заявка № 2021109277/04(020023)** Российская Федерация, МКИ кл5 В01D46/02 (2006.01) В01D46/24 (2006.01) В04С9/00 (2006.01). Фильтр-циклон / Д.С. Процко, А.А. Хвостов, А.А. Бобков, С.В. Шахов, С.Ю. Панов (РФ); заявитель ФГБОУВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»; № 2021109277/04(020023); заявл. 05.04.2021.

8. **Лойцянский Л.Г.** Механика жидкости и газа: учеб. для вузов. – 7-е изд. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.

9. **Методы** математического моделирования окружающей среды / А.В. Колдоба, Ю.А. Повещенко, Е.А. Самарская, В.Ф. Тишкин. – М.: Наука, 2000. – 256 с.

10. **Гарбарук А.В., Стрелец М.И., Шур М.Л.** Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2012. – 88 с.

11. **Авраменко М.И.** О $k-\epsilon$ модели турбулентности. – 2-е изд., перераб. и доп. – Снежинск: Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 2010. – 102 с.

References

1. Zhabo, V.V. *Okhrana okruzhayushchey sredy na TES i AES* [Environmental protection at thermal power plants and nuclear power plants]. Moscow: Energoatomizdat, 2012. 240 p.

2. Aleksandrov, S.V., Makarchuk, G.V., Medvedeva, L.V. *Ekologicheskie aspekty pri rabote dizel'noy teploelectrostantsii s aktivnym kotlom-utilizatorom vysokotemperaturnogo kipyashchego sloya* [Environmental issues during operation of a

diesel power plant with active high-temperature fluidized bed waste heat boiler]. *Nauchno-analiticheskiy zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii»*, 2019, no. 1, pp. 51–59.

3. Goremykin, V.A., Al'-Kudakh, M.K., Krasovitskiy, Yu.V., Boldyrev, A.M., Shapovalov, Yu.N. *Raschet i vybor pyleulavlivayushchego oborudovaniya* [Design and selection of dust collecting equipment]. Voronezh: Voronezhskaya gosudarstvennaya arkhitekturno-stroitel'naya akademiya, 2000. 326 p.

4. Belykh, O.N., Zinkovskiy, A.V., Momotov, V.S. *Osobennosti protsessa regeneratsii fil'troval'nykh peregorodok* [Characteristic properties of regeneration process of filter-shaft partitions]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy*, 2015, no. 1(63), pp. 175–179.

5. Shapovalov, Yu.N., Krasovitskiy, Yu.V., Nikitenko, D.V., Panova, O.A. *Izuchenie protsessa tangentsial'nogo fil'trovaniya s nizkoy dvizhushchey siloy pri razdelenii pylegazovykh potokov* [Study of process of tangential filtration with a low driving force in case of dust and gas flows separa-

tion]. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*, 2007, no. 3, pp. 11–12.

6. Devisilov, V.A., Sharay, E.Yu. *Gidrodinamicheskoe fil'trovanie* [Hydrodynamic filtration]. *Bezopasnost' v tekhnosfere*, 2015, no. 3, pp. 68–80.

7. Protsko, D.S., Khvostov, A.A., Bobkov, A.A., Shakhov, S.V., Panov, S.Yu. *Fil'tr-tsiklon* [Filter cyclone]. Zayavka № 2021109277/04(020023) RF, 2021.

8. Loytsyanskiy, L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid and gas mechanics]. Moscow: Drofa, 2003. 840 p.

9. Koldoba, A.V., Poveshchenko, Yu.A., Samarskaya, E.A., Tishkin, V.F. *Metody matematicheskogo modelirovaniya okruzhayushchey sredy* [Methods of mathematical modeling of the environment]. Moscow: Nauka, 2000. 256 p.

10. Garbaruk, A.V., Strelets, M.I., Shur, M.L. *Modelirovanie turbulentnosti v raschetakh slozhnykh techeniy* [Modeling turbulence in complex flow calculations]. Saint-Petersburg: Izdatel'stvo Politekhnicheskogo universiteta, 2012. 88 p.

11. Avramenko, M.I. *O k-ε modeli turbulentnosti* [On the k-ε model of turbulence]. Snezhinsk: Izdatel'stvo RFYaTs – VNIITF, 2010. 102 p.

ВЕСТНИК ИВАНОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Выпуск 1

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-82616 от 18.01.2022 г.

Подписано в печать 10.02.2022. Выход в свет 28.02.2022. Формат 60x84 1/8.

Усл. печ. л. 8,37. Уч.-изд. л. 9,21. Тираж 100 экз. Цена свободная. Заказ

Адрес редакции и издательства: Ивановский государственный энергетический университет, 153003, Ивановская область, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.
Типография ООО «ПресСто», 153025, Ивановская обл., г. Иваново, ул. Дзержинского, 39, оф. 307.