



ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ АДСОРБЦИОННОГО ФИЛЬТРА С КОРОТКИМ ДИФфуЗОРОМ НА БАЗЕ ИНЖЕНЕРНОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА

А. С. Корнеева, Н. Ю. Филькин

Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

В данной работе рассматриваются адсорбционные фильтры с коротким диффузором, используемые для удаления загрязняющих веществ из парогазовых смесей. Описывается процесс проектирования проточной части таких фильтров, который включает этапы определения параметров слоя адсорбента, моделирования газодинамических процессов с использованием численных методов, в программах ANSYS CFX, и анализа полученных результатов. Проведенные численные исследования охватывают различные варианты засыпки адсорбента, включая профилирование слоя и использование адсорбента с различной пористостью. Это позволяет выявить влияние указанных факторов на аэродинамическое сопротивление и эффективность работы фильтра в целом. Также предлагается алгоритм проектирования, который обеспечивает оптимальное соответствие толщины слоя адсорбента и локальной скорости потока, способствуя увеличению времени защитного действия фильтра и улучшению качества очистки.

Ключевые слова: адсорбционный фильтр, адсорбционная очистка, короткий диффузор, инженерная методика, время защитного действия, профилирование насыпного слоя адсорбента, пористость, аэродинамическое сопротивление.

Введение

Адсорбционная очистка газа является важным процессом, находящим широкое применение во многих отраслях промышленности, таких как нефтехимия, газовая промышленность и металлургия [1]. Газовые смеси часто содержат компоненты, которые могут быть вредными для человеческого здоровья, окружающей среды или оборудования, с которым они взаимодействуют.

Адсорбционная очистка позволяет удалять нежелательные компоненты из газовых потоков, такие как органические соединения, сероводород, аммиак и тяжелые металлы, что достигается посредством использования адсорбентов — веществ, способных притягивать и удерживать молекулы загрязнителей на своей поверхности. Этот процесс позволяет улучшить качество продукта и повысить эффективность технологических процессов [2].

Для реализации преимуществ адсорбционной очистки применяются горизонтальные и вертикальные адсорбционные фильтры и аппараты [3]. Однако данные устройства имеют недостатки, связанные с неравномерностью распределения газового потока по слою адсорбента.

Неравномерность распределения газового потока объясняется особенностями его входа в проточную часть фильтров и аппаратов, а именно тем, что поперечное сечение адсорбера во много раз превышает размеры входного патрубка [4]. А короткий переходной участок между ними часто реализован в виде диффузора круглой или прямоугольной формы. В результате перед слоем адсорбента локальные значения скоростей потока могут отличаться

в 10 раз, а выравнивание профиля поля скоростей происходит уже в толще слоя. Это приводит к тому, что эффективность очистки в центральной части адсорбера из-за уменьшения времени реакции падает. А так как в центральную часть адсорбера устремляется большая часть газов, снижается и эффективность всей очистки в целом.

Более того, неравномерное распределение потока зачастую ведет к ускоренному износу адсорбента в определенных участках, что требует более частой замены или регенерации материала. Негативные последствия этого очевидны: ухудшение качества получаемого газа и нерациональный расход адсорбента [5].

На сегодняшний день для решения данной проблемы применяют распределители различных типов: конусообразные переходы, отбойные пластины, набор концентрических направляющих, профилированные сетки. Однако предлагаемые распределители имеют недостатки: увеличение массогабаритных размеров, а также рост аэродинамического сопротивления [6].

Одним из способов решения данной проблемы и перспективной альтернативой существующих рекомендаций может стать профилирование насыпного слоя адсорбента или использование адсорбента с разной пористостью в различных областях поперечного сечения проточной части фильтра [7].

Профилирование слоя адсорбента предполагает создание его неравномерной толщины слоя, наибольшей в центральной части и уменьшающейся к периферии. Это позволяет уменьшить количество насыпки на периферийных участках, где адсорбция происходит с меньшей скоростью.

Такой подход позволит добиться того, что локальные значения толщины слоя адсорбента будут подобраны в соответствии с локальными значениями скорости газового потока таким образом, чтобы обеспечивать требуемое минимальное время взаимодействия потока и адсорбента.

Использование адсорбента с разной пористостью заключается в том, что менее пористый адсорбент размещается в центральной части засыпки, а более пористый — на периферии. Такой подход способствует распределению потока на периферийные участки.

Цель исследования

Цель работы заключается в исследовании процессов адсорбционной очистки газов путем улучшения распределения газового потока по слою адсорбента. В частности, работа нацелена на оценку влияния профилирования на равномерность распределения газового потока. Разработка и внедрение новых подходов позволит повысить качество очистки газов, снизить эксплуатационные расходы и минимизировать негативное воздействие на окружающую среду.

Адсорбционные фильтры на промышленных предприятиях

Для проведения процессов удаления загрязняющих веществ из парогазовых смесей зачастую применяются адсорбционные фильтры различных типов. В таких фильтрах адсорбент размещается в специальных кассетах или в виде свободной насыпки, ограниченной сеткой [8, 9].

Адсорбционные фильтры с подобной конструкцией применяются на различных промышленных предприятиях для очистки воздуха и газа от вредных примесей, запахов и летучих органических соединений [10, 11]. Вот несколько типов предприятий и процессов, где могут использоваться такие фильтры:

1. Химическая промышленность. Для очистки воздуха и газов от токсичных и вредных веществ.
2. Нефтехимическая промышленность. Для удаления углеводородов и других загрязняющих веществ из выбросов.
3. Фармацевтическая промышленность. Для обеспечения стерильности воздуха и удаления запахов.
4. Пищевая промышленность. Для удаления запахов и обеспечения качества воздуха в производственных помещениях.
5. Электроника и нанотехнологии. Для обеспечения высокой чистоты воздуха и предотвращения загрязнения чувствительных компонентов.
6. Системы вентиляции и кондиционирования. Для улучшения качества воздуха в офисах и жилых зданиях.

Общей конструктивной особенностью адсорбционных фильтров является наличие короткого диффузора на входе в проточную часть. Такая конструкция имеет недостаток, связанный с неравномерным распределением потока и образованием зон, где адсорбция практически не происходит. Это приводит к неэффективному использованию адсорбента и ускоренному истощению его ресурса, а также снижает эффективность адсорбционной очистки [12].

Предметом представленного исследования являются адсорбционные фильтры с насыпным сло-

ем адсорбента. Примером такого фильтра является фильтр-адсорбер типа ААС-500. Это прибор, предназначенный для очистки вентиляционного воздуха канализационных насосных станций и других участков очистных сооружений, использующий сорбционно-каталитический метод очистки. Данное оборудование предназначено для очистки воздуха городских и поселковых канализационно-насосных станций производительностью по газу 300–500 м³/час. В качестве сорбента используется катализатор в виде активированного угля, импрегнированного йодидом калия не менее 2 %. Адсорбер имеет относительно небольшие габаритные размеры и изготавливается из нержавеющей стали.

Оценка эффективности предложенных решений по устранению данного недостатка требует проведения расчетно-теоретических и численных исследований. Расчетно-теоретическое исследование позволит определить оптимальные параметры для достижения максимальной эффективности адсорбции — время защитного действия адсорбента. Результаты численного моделирования позволят оптимизировать конструкции адсорбционных фильтров с коротким диффузором, что будет способствовать повышению их эффективности, и разработать рекомендации по выбору и применению профилированных насыпных слоев адсорбента.

Расчетно-теоретическое исследование

Процесс проектирования проточной части адсорбционного фильтра с коротким диффузором включает в себя несколько этапов [13]. На первом этапе важно учитывать параметры слоя адсорбента, такие как время защитного действия и его высоту. Для определения данных параметров применяются инженерные методики расчета, основанные на уравнении, предложенном Н. А. Шиловым, согласно которому время защитного действия является линейной функцией высоты слоя:

$$\tau = k(H - h),$$

где k — коэффициент защитного действия слоя, показывающий время полного задержания адсорбтива слоем адсорбента высотой 1 см в условиях стационарного режима;

H — общая высота слоя адсорбента;

$h = H - h_0$ — высота неиспользованной ёмкости слоя адсорбента.

Основной характеристикой процесса является изотерма адсорбции — кривая равновесия при постоянной температуре $a_0^* = f(p)$. Для того, чтобы вычислить значение времени защитного действия адсорбционного слоя, необходимо сначала построить изотерму адсорбции целевого вещества. Для этого применяется теория Эйкена и Поляни. В соответствии с этой теорией, построение изотермы адсорбции пара стандартного вещества $a_1^* = f_1(p_1)$ для определенной температуры t_1 (рис. 1) позволяет рассчитать изотерму адсорбции другого пара $a_2^* = f_2(p_2)$ при температуре t_2 .

В качестве примера в роли стандартного вещества рассмотрим бензол, в роли целевого — этиловый спирт. Адсорбент — активный уголь марки АГ-5 с эквивалентным диаметром гранул 1,2 мм.

Значение статистической активности по целевому веществу рассчитывается по формуле:

$$a_2 = \frac{a_1}{M_1 \cdot \beta} \cdot M_2,$$

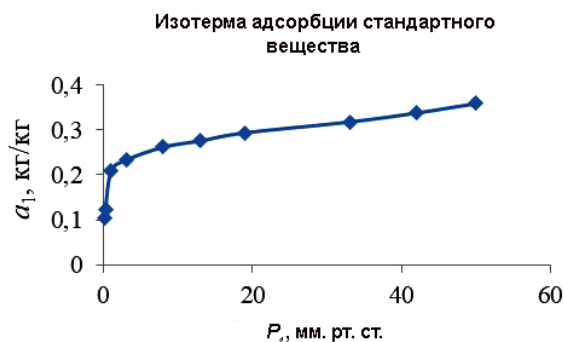


Рис. 1. Изотерма стандартного вещества
Fig. 1. Isotherm of standard substance

где a_1 — ордината изотермы адсорбции стандартного вещества, кг/кг;

a_2 — ордината определяемой изотермы, кг/кг;

β — коэффициент аффинности;

M_1 и M_2 — молекулярные массы стандартного и целевого вещества.

Вторая координата изотермы адсорбции целевого вещества рассчитывается по формуле:

$$P_2 = 10^{\left[\log P_{s,2} - \beta \frac{t_1 + 278}{t_2 + 278} \cdot \log \frac{P_{s,1}}{P_1} \right]},$$

где P_1 и P_2 — парциальные давления стандартного и целевого веществ, мм рт. ст.; $P_{s,1}$ — давление насыщенного пара стандартного вещества при температуре t_1 ; $P_{s,2}$ — давление насыщенного пара целевого вещества при температуре t_2 , мм рт. ст.

Результаты расчета сводим в табл. 1.

По полученным данным строим изотерму адсорбции бензола при 25 °С (рис. 2).

С помощью изотермы определяют значение статической активности адсорбента по целевому веществу при начальной концентрации газовой смеси C_0 . Предварительно рассчитывают парциальное давление P , соответствующее начальной концентрации C_0 :

$$P_{(C_0)} = C_0 \cdot R \cdot (t_2 + 273) / M_2,$$

где $R = 8,314$ — универсальная газовая постоянная;

M_2 — молекулярная масса сорбируемого вещества.

$$P_{(C_0)} = 2 \cdot 10^{-3} \cdot 8,314 \cdot \frac{25 + 273}{46} = 107,7 \text{ Па},$$

$$\text{или } 0,8 \text{ мм. рт. ст.}$$

По изотерме адсорбции находят адсорбционную емкость адсорбента a_2 , соответствующую данной концентрации. По полученному значению определяют, к какой области изотермы относится величина C_0 .

Определим с помощью изотермы (рис. 2) статическую активность угля по этанолу при концентрации паровоздушной смеси $C_0 = 2 \cdot 10^{-3}$ кг/м³. На полученном графике изотермы адсорбции этилового спирта абсциссе $P_{(C_0)} = 0,8$ мм. рт. ст. соответствует ордината $a_0 = 0,18$ кг/кг. Так как на изотерме точка, которая соответствует исходной концентрации газовой смеси, находится в первой (прямолинейной) области.

Также определить метод расчета продолжительности адсорбции можно, рассчитав соотношение

Таблица 1. Результаты расчета
Table 1. Calculation results

Изотерма бензола при 20 °С		Изотерма этилового спирта при 25 °С	
a_1 , кг/кг	P_1 , мм. рт. ст.	a_2 , кг/кг	P_2 , мм. рт. ст.
0,103	0,105	0,093	0,9005
0,122	0,223	0,11	1,4612
0,208	1	0,188	3,8327
0,233	3	0,21	7,7646
0,262	8	0,236	14,584
0,276	13	0,249	19,923
0,294	19	0,265	25,426
0,318	33	0,287	36,254
0,338	42	0,305	42,331
0,359	50	0,324	47,35

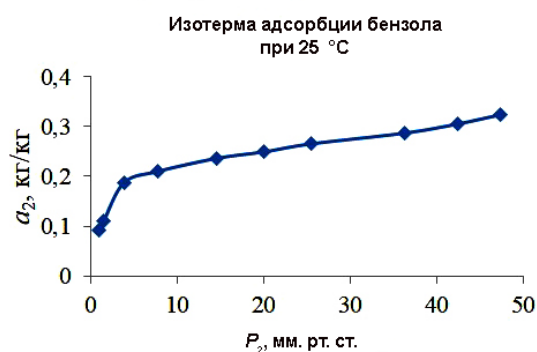


Рис. 2. Изотерма адсорбции бензола
Fig. 2. Benzene adsorption isotherm

давлений P/P_s . В зависимости от полученного значения изотерма адсорбции делится на три области:

— первая характеризуется отношением $P/P_s < 0,17$ (по бензолу);

— вторая $0,17 < P/P_s < 0,5$;

— третья $P/P_s > 0,5$.

Рассчитывают соотношение P/P_s :

$$\frac{P}{P_{s,1}} = 10^{\frac{\lg P_{(C_0)} - \lg P_{s,2}}{\beta}},$$

$$\frac{P}{P_{s,1}} = 10^{\frac{\lg 0,2 - \lg 61,55}{0,654}} = 0,0013 < 0,17.$$

В зависимости от положения величины C_0 на изотерме и величины соотношения P/P_s применяют один из трех методов расчета продолжительности адсорбции.

Так как на изотерме точка, которая соответствует исходной концентрации газовой смеси, находится в первой (прямолинейной) области и отношение давлений $P/P_{s,1} < 0,17$, то время защитного действия адсорбента определяется по формуле:

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\left(\frac{a_0}{(\omega \cdot C_0)} \right)} \cdot \sqrt{H} - b \cdot \sqrt{\frac{a_0}{(\beta_y \cdot C_0)}},$$

где ω — рабочая скорость газа в аппарате, м/с;

H — высота слоя активного угля, м;

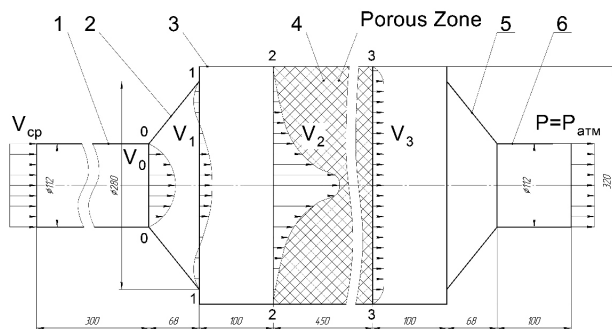


Рис. 3. Расчётная схема проточной части адсорбционного фильтра с коротким диффузором:

1 — входной воздуховод; 2 — короткий диффузор;
3 — корпус; 4 — слой адсорбента; 5 — конфузор;

Fig. 3. Calculation scheme of the flow part of the adsorption filter with a short diffuser:

1 — inlet air duct; 2 — short diffuser;
3 — body; 4 — adsorbent layer;
5 — confuser; 6 — outlet air duct

C_0 — начальная концентрация адсорбируемого вещества в парогазовом потоке, кг/м³;

a_0 — количество адсорбируемого вещества, равновесное с концентрацией потока C_0 ;

β_y — коэффициент массоотдачи.

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\frac{0,18 \cdot 600}{(0,098 \cdot 2 \cdot 10^{-3})}} \cdot \sqrt{1} - 1,19 \times \\ \times \sqrt{\frac{0,18 \cdot 600}{(25 \cdot 2 \cdot 10^{-3})}} = 265455 \text{ с} = 73,7 \text{ ч.}$$

Методика численного исследования. Основные этапы

На втором этапе необходимо проведение детального моделирования газодинамических процессов, происходящих в проточной части фильтра. Для этого следует применять численные методики расчета [14]. В настоящий момент одним из наиболее популярных продуктов для проведения численных исследований является программа ANSYS [15]. Модуль CFX, входящий в состав данной программы, дает возможность проводить газодинамические исследования с высокой степенью точности и адекватности [16, 17].

Описание расчетной модели

Расчетная схема проточной части адсорбционного фильтра с коротким диффузором представлена на рис. 3. Согласно схеме, поток движется через входной воздуховод 1 диаметром 112 мм, из которого он попадает в проточную часть фильтра, состоящую из короткого диффузора 2, корпуса 3 и фильтрующего слоя адсорбента 4. Поток покидает проточную часть фильтра через конфузор 5 и выходной воздуховод 6 длиной 100 мм.

Корпус имеет прямоугольную форму с сечением 320×320 мм; диффузор — конический, длиной 68 мм, с выходным диаметром 280 мм. Поток входит в воздуховод 1 со средней скоростью V_{cp} и выходит из воздуховода 6 с давлением, равным атмосферному ($P=P_{атм}$).

Методика численного расчета включает в себя последовательность следующих этапов [18]:

1. Импорт расчетной геометрии.

Расчетная модель проточной части фильтра предварительно строится в соответствии со схемой, приведенной на рис. 3, в программе КОМПАС-3D, после чего конвертируется в формат, подходящий для передачи в ANSYS. Расчетная модель представляет собой сборку, состоящую из трех элементов: входного участка, фильтрующего элемента и выходного участка.

2. Построение сеточной модели.

При генерации сеточной модели происходит разбиение созданной геометрии на сеть конечных элементов. Построение сеточной модели осуществляется в два этапа: сначала идет общее построение сетки для всей расчетной области, а затем — создание сеточной модели в пристенной области, т.е. в области пограничного слоя.

Для построения сеточной модели для всей расчетной области задаются следующие настройки: Use Advanced Size Function — On; Curvature; Relevance Center — Fine; Smoothing — Medium; Max Face Size — 5 мм.

Для моделирования сетки в пограничном слое выбираем опцию Inflation, для которой задаем следующие параметры: Inflation Option — First Layer Thickness; First Layer Height — 0,091 мм; Maximum Layers — 5; Growth Rate — 1,2.

Значение толщины первого слоя (First Layer Height) рассчитывается исходя из параметра y^+ , который для модели турбулентности SST составляет $y^+ < 3$.

3. Задание граничных условий и параметров расчетной области.

Так как расчетная модель состоит из трёх элементов, то в CFX-Pre создадим еще два так называемых домена (Domain) для входного и выходного участков, которые назовем Zone Inlet и Zone Outlet соответственно. Оставшемуся домену, представляющему собой фильтрующий элемент (слой адсорбента), присвоим наименование Porous Zone и зададим следующие параметры:

— Basic Settings: Domain type — Porous Domain; Material — Air at 25 °C; Morphology — Continuous Fluent; Reference Pressure — 1 atm;

— Fluid Models: Heat Transfer — Isothermal, 20 °C; Turbulence — SST;

— Porosity Settings: Area porosity — Isotropic; Volume Porosity — от 0 до 1; Loss Model — Isotropic Loss; Loss Velocity Type — True Velocity.

Для пористого тела одним из основных параметров является Volume Porosity (объемная пористость), который определяет долю пустот в материале. Объемная пористость — это отношение суммарного объема пор к общему объему дисперсной системы. Этот параметр может быть задан в виде числа от 0 до 1, где 0 обозначает полное отсутствие пор, а 1 — полное отсутствие насыпки.

После задания для домена Porous Zone во вкладках Basic Settings и Fluid Models указанных выше параметров аналогичные параметры автоматически присвоятся доменам Zone Inlet и Zone Outlet, так что необходимость их задавать не возникнет. Таким образом, далее можно будет перейти к заданию граничных условий.

Создадим входное граничное условие типа Inlet для домена Zone Inlet и приложим его к поперечному сечению входного воздуховода. Во вкладке Boundary Details в соответствующей строке введём значение скорости (Normal Speed) V_{cp} в диапазоне от 1 до 10 м/с.

Выходное граничное условие типа Outlet для домена Zone Outlet приложим к поперечному сечению выходного воздуховода. Во вкладке Boundary Details в соответствующей строке введём значение статического давления (Static Pressure) $P = P_{атм} = 100000$ Па

4. Расчет, просмотр и анализ результатов.

Для оценки работоспособности предложенной методики была проведена серия численных расчетов проточной части адсорбционного фильтра с коротким диффузором. Расчеты проводились:

1. При однородной насыпке слоя адсорбента постоянной толщины, но разной пористости (0,2, 0,5 и 0,8) при скорости потока V_{cp} , 10 м/с. В таком варианте исследования скорость газового потока является наибольшей в центральной части адсорбционного слоя. Слои адсорбента, находящиеся по периферии, не включаются в работу в нужном объеме, вследствие чего ресурс адсорбционного фильтра заканчивается раньше положенного. Максимальная скорость потока составила 11,8 м/с.

2. При однородной насыпке слоя адсорбента с профилированной формой и разной пористостью (0,2, 0,5 и 0,8) при скорости потока V_{cp} , 10 м/с. Вариант с профилированной формой засыпки адсорбента интересен тем, что в данном случае высота адсорбционного слоя пропорциональна форме профиля скоростей, что позволяет повысить ресурс работы фильтра. Максимальная скорость потока составила 11,8 м/с.

3. При неоднородной насыпке слоя адсорбента постоянной толщины, но разной пористости при скорости потока V_{cp} , 10 м/с. Основная часть потока газа устремляется в центральную часть фильтра. Слои адсорбента, находящиеся в периферийных участках, не задействованные в процессе адсорбции, что уменьшает ресурс адсорбционного фильтра (как в первом случае). Максимальная скорость потока составила 28 м/с.

4. При неоднородной засыпке слоя адсорбента с профилированной формой при скорости потока V_{cp} , 10 м/с. В данном варианте исследования обеспечивается равномерное распределение газового потока за счет неравномерной пористости адсорбента. В этом варианте обеспечивается минимальная скорость потока, равная 1,4 м/с.

Анализ полученных результатов

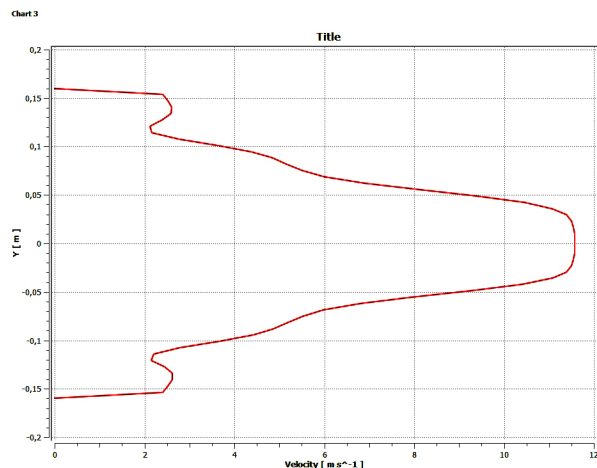
Проведя анализ результатов численных исследований для всех рассматриваемых вариантов, мы пришли к следующим выводам:

1. Базовая конструкция адсорбционного фильтра обеспечивает наименьшие потери давления, особенно при засыпке адсорбента низкой пористости.

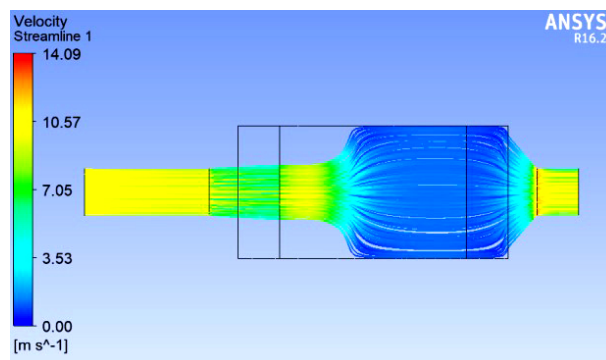
2. При применении профилированной формы засыпки и одинаковой по всему объему пористости адсорбента потери давления увеличиваются. Следовательно, используя данный прием, нам не удастся получить выигрыша в аэродинамическом сопротивлении;

3. Большой интерес представляют исследования, в которых центральную часть фильтра заполняет высокопористый адсорбент, а по направлению к периферии его пористость уменьшается. В таком случае аэродинамическое сопротивление будет уменьшаться;

4. При использовании неоднородной засыпки слоя адсорбента с профилированной формой



a)



b)

Рис. 4. Визуализации профиля скоростей в поперечном сечении фильтра (a) и линий тока в продольном сечении (b) для скорости $V_{cp} = 10$ м/с и насыпки с пористостью 0,8
Fig. 4. Visualization of the velocity profile in the cross-section of the filter (a) and streamlines in the longitudinal section (b) for the velocity $V_{cp} = 10$ m/s and backfill with a porosity of 0,8

аэродинамическое сопротивление остается на том же уровне, что и в предыдущем варианте исследования.

Алгоритм проектирования проточной части адсорбционного фильтра

На основании методик численного расчета и расчетно-теоретической методики расчета проточной части адсорбционного фильтра с коротким диффузором, составим алгоритм проектирования проточной части адсорбционного фильтра.

На первом этапе необходимо провести численное исследование проточной части адсорбционного фильтра в программном комплексе ANSYS CFX и построить профиль скоростей в контрольных сечениях (рис. 4a) и линий тока в продольном сечении (рис. 4b).

Помимо этого необходимо выполнить оценку аэродинамического сопротивления проточной части адсорбционного фильтра с коротким диффузором, используя формулу:

$$\Delta P = |P_{вх} - P_{вых}|,$$

где $P_{вх}$ и $P_{вых}$ — давление на входе и на выходе адсорбционного фильтра.

Затем потребуется разбить слой адсорбента на участки равной толщины и после этого оценить

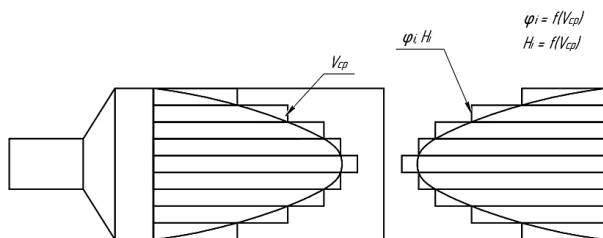


Рис. 5. Визуализация пропорциональности толщины профиля засыпки адсорбента средней скорости потока на данном участке

Fig. 5. Visualization of the proportionality of the adsorbent backfill profile thickness to the average flow velocity in a given area

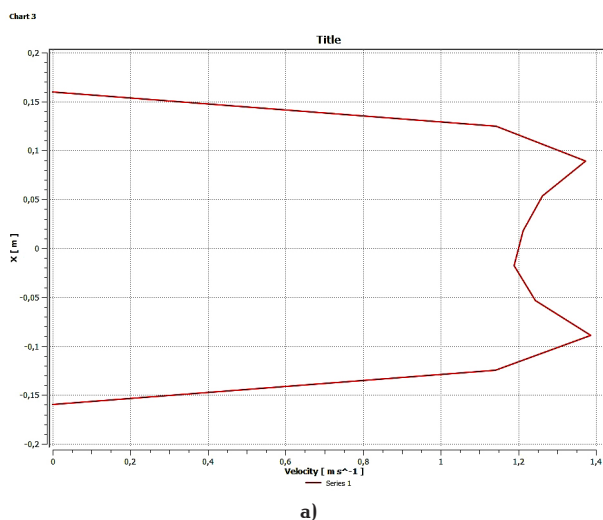


Рис. 6. Визуализации профиля скорости в поперечном сечении фильтра (а) и линий тока в продольном сечении (б) для скорости $V_{cp} = 10$ м/с и насыпки с пористостью 0,2; 0,4; 0,7 и 0,9

Fig. 6. Visualization of the velocity profile in the cross-section of the filter (a) and the streamlines in the longitudinal section (b) for the velocity $V_{cp} = 10$ m/s and the fill with a porosity of 0,2; 0,4; 0,7 and 0,9

среднюю скорость газового потока, приходящегося на каждый из полученных участков (рис. 5).

Из схематичного рис. 5 видно, что толщина профиля засыпки адсорбента пропорциональна средней скорости потока на данном участке.

Далее нужно выполнить расчет времени защитного действия адсорбционного слоя для каждого участка по уравнению Шилова.

На основании полученных значений подобрать необходимую толщину слоя каждого участка, уве-

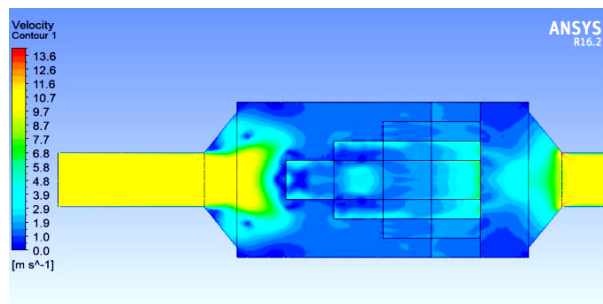


Рис. 7. Визуализации поля скоростей в продольном сечении фильтра для скорости $V_{cp} = 10$ м/с для насыпки с пористостью от 0,2; 0,4; 0,7 и 0,9

Fig. 7. Visualization of the velocity field in the longitudinal section of the filter for the velocity $V_{cp} = 10$ m/s for the fill with a porosity of 0,2; 0,4; 0,7 and 0,9

личивая или уменьшая ее, до величины, обеспечивающей условие $\tau_i = \tau_{\text{треб}}$. На заключительном этапе провести поверочный численный расчет для оценки газодинамической картины движения потока и аэродинамического сопротивления, от которого значительно зависит эффективность работы адсорбционных фильтров.

После этого провести анализ полученных результатов (рис. 6–7).

Заключение

Опираясь на предложенные методики проектирования проточной части адсорбционного фильтра можно менять профиль засыпки адсорбента таким образом, чтобы локальные значения толщины слоя соответствовали локальным значениям средней скорости потока на каждом участке засыпки. Такой подход позволит проектировать проточную часть адсорбционного фильтра с коротким диффузором так, чтобы процесс адсорбционной очистки был наиболее эффективным, а время защитного действия было максимальным.

Библиографический список

1. Нитченко К. А., Шарапов А. И. Исследование протекания процесса адсорбции при использовании технологических адсорбентов // Будущее науки-2019: сб. науч. ст. 7-й Междунар. мол. науч. конф. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2019. Т. 6. С. 230–233.
2. Ягдовский В. Д. Адсорбция. Москва: Лаборатория знаний, 2015. 219 с. ISBN 978-5-93208-675-9.
3. Филькин Н. Ю., Жукова Е. А., Хусаинов С. А. [и др.] Численный анализ повышения газодинамической эффективности газового фильтра с коротким диффузором профилированием его проточной части // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства: материалы 9-й Междунар. науч.-техн. конф. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2019. С. 66–67. EDN: HTDGMG.
4. Пронин В. А., Мамченко В. О., Долговская О. В., Цветков В. А. Очистка и дезодорация газоздушных выбросов. Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2022. 156 с. ISBN 978-5-7577-0668-9.
5. Титова Л. М., Наурзгалиева Д. З. Совершенствование конструкции насадочных аппаратов за счет равномерного распределения газового потока // Нефтегазовые технологии и экологическая безопасность. 2023. № 4. С. 54–61. DOI: 10.24143/1812-9498-2023-4-54-61. EDN: LYHWCR.
6. Fil'kin N. Yu., Yusha V. Increasing the efficiency of the gas filter with a short diffuser by profiling its flow part // AIP

Conference Proceedings. 2019. Vol. 2141 (1). P. 030062. DOI: 10.1063/1.5122112.

7. Корнеева А. С., Филькин Н. Ю. Методика численного расчета проточной части адсорбционного фильтра с коротким диффузором // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства: материалы 14-й Междунар. науч.-техн. конф. (Омск, 12–15 марта 2024 г.). Омск: Изд-во ОмГТУ, 2024. С. 44–45.

8. Хафизов И. М., Гафаров Р. З., Жирнов Б. С. [и др.] Оптимизация процесса загрузки и регенерации адсорбента // Фундаментальные исследования. 2017. № 10-1. С. 56–61. EDN: WZDAAR.

9. Файзуллина Л. Т., Туманова Е. Ю. Применение технологии плотной укладки адсорбента в колонну для повышения эффективности его использования // Нефтегазовое дело. 2018. № 1. С. 23–31. DOI: 10.17122/ngdelo-2018-1-23-31.

10. Азров М. Э., Тодес О. М., Наринский Д. А. Аппараты со стационарным зернистым слоем: гидравлические и тепловые основы работы. Ленинград: Химия, 1979. 176 с.

11. Кельцев Н. В. Основы адсорбционной техники. Москва: Химия, 1984. 512 с.

12. Пушнов А., Балтренас П., Каган А., Загорскис А. Аэродинамика воздухоочистных устройств с зернистым слоем: моногр. Вильнюс: Техника, 2010. 346 с. ISBN 978-9955-28-643-1.

13. Дворецкий С. И., Дворецкий Д. С., Акулинин Е. И., Голубятников О. О. Моделирование и оптимизация циклических адсорбционных процессов для разделения и очистки газовых смесей: моногр. Тамбов: Издат. центр ТГТУ, 2021. 212 с. ISBN 978-5-8265-2417-6.

14. Филиппов Г. А., Меламед Л. Э., Тропкина А. И. Методика математического моделирования и анализ гидродинамики систем, содержащих засыпки и перфорированные перегородки, на основе вычислительного комплекса ANSYS // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2005. № 11-12. С. 64–79. EDN: KJUSAR.

15. Файзуллина Л. Т., Туманова Е. Ю. Численное моделирование гидродинамики потока в слое адсорбента // Актуальные проблемы науки и техники. 2017. Т. 2. С. 33–35. EDN: УТВНСВ.

16. Дворецкий С. И., Дворецкий Д. С., Акулинин Е. И., Голубятников О. О. Моделирование и оптимизация циклических адсорбционных процессов для разделения и очистки газовых смесей: моногр. Тамбов: Изд. центр ТГТУ, 2021. 212 с. ISBN 978-5-8265-2417-6.

17. ANSYS Workbench User's Guide. Release 12.1 / ANSYS, Inc. URL: <https://www.fluid.tuwien.ac.at/322057?action=AttachFile&do=get&target=fluug.pdf> (дата обращения: 01.04.2024).

18. Xu P., Wen J., Zhao X. [et al.]. Study on adsorption characteristics optimization of vertical radial flow adsorber // Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering. 2022. Vol. 17 (2). DOI: 10.1002/apj.2755.

КОРНЕЕВА Анастасия Сергеевна, ассистент кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 9506-8607

Адрес для переписки: n.skazhutina.699@gmail.com

ФИЛЬКИН Николай Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология» ОмГТУ, г. Омск. SPIN-код: 2384-3430

AuthorID (РИНЦ): 684478

AuthorID (SCOPUS): 56503788300

Адрес для переписки: finick@inbox.ru

Для цитирования

Корнеева А. С., Филькин Н. Ю. Исследование газодинамических процессов в проточной части адсорбционного фильтра с коротким диффузором на базе инженерной методики расчета // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2024. Т. 8, № 4. С. 54–62. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-4-54-62.

Статья поступила в редакцию 15.10.2024 г.

© А. С. Корнеева, Н. Ю. Филькин

IMPROVING THE EFFICIENCY OF ADSORPTION FILTERS WITH A SHORT DIFFUSER BY IMPROVING THEIR FLOW PART

A. S. Korneeva, N. Yu. Filkin

Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

The study examines short-diffuser adsorption filters designed to remove pollutants from vapor-gas mixtures. The design process of the flow path of such filters is considered, which includes the stages of determining the parameters of the adsorbent layer, modeling gas-dynamic processes using numerical methods in the ANSYS CFX program and analyzing the results. The numerical studies cover various options for backfilling the adsorbent, including layer profiling and the use of adsorbent with different porosity, which allows us to assess the impact of these factors on the aerodynamic resistance and overall efficiency of the filter. A design algorithm is also proposed that ensures optimal compliance between the adsorbent layer thickness and the local flow velocity, which helps to increase the protective action time of the filter and improve the quality of cleaning.

Keywords: adsorption filter, adsorption purification, short diffuser, short diffuser, protective action time, profiling of the bulk adsorbent layer, porosity, aerodynamic resistance.

References

1. Nitchenko K. A., Sharapov A. I. Issledovaniye protekaniya protsessa adsorbtsii pri ispol'zovanii tekhnologicheskikh adsorbentov [Study of the adsorption process using technological adsorbents] // Budushcheye nauki – 2019. *The Future of Science* – 2019. Kursk, 2019. P. 230–233. (In Russ.).
2. Yagodovskiy V. D. Adsorbtsiya [Adsorption]. Moscow, 2015. 219 p. ISBN 978-5-93208-675-9. (In Russ.).
3. Fil'kin N. Yu., Zhukova E. A., Khusainov S. A. [et al.] Chislennyy analiz povysheniya gazodinamicheskoy effektivnosti gazovogo fil'tra s korotkim diffuzorom profilirovaniyem ego protochnoy chasti [Numerical analysis of increasing the gas-dynamic efficiency of a gas filter with a short diffuser by profiling its flow part] // Tekhnika i tekhnologiya neftekhimicheskogo i neftegazovogo proizvodstva. *Engineering and Technology of Petrochemical and Oil and Gas Production*. Omsk, 2019. P. 66–67. (In Russ.).
4. Pronin V. A., Mamchenko V. O., Dolgovskaya O. V., Tsvetkov V. A. Ochistka i dezodoratsiya gazovozdushnykh vybrosov [Cleaning and deodorization of gas-air emissions]. Saint Petersburg, 2022. 156 p. ISBN 978-5-7577-0668-9. (In Russ.).
5. Titova L. M., Naurzgalieva D. Z. Sovershenstvovaniye konstruktssii nasadochnykh apparatov za schet ravnomernogo raspredeleniya gazovogo potoka [Improving the design of devices with random packing due to the uniform distribution of the gas flow] // Neftegazovyye tekhnologii i ekologicheskaya bezopasnost'. *Oil and Gas Technologies and Environmental Safety*. 2023. No. 4. P. 54–61. DOI: 10.24143/1812-9498-2023-4-54-61. EDN: LYHWCR. (In Russ.).
6. Fil'kin N. Yu., Yusha V. Increasing the efficiency of the gas filter with a short diffuser by profiling its flow part // AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2141 (1). P. 030062. DOI: 10.1063/1.5122112. (In Engl.).
7. Korneyeva A. S., Fil'kin N. Yu. Metodika chislennogo rascheta protochnoy chasti adsorbtsionnogo fil'tra s korotkim diffuzorom [Methodology for numerical calculation of the flow part of an adsorption filter with a short diffuser] // Tekhnika i tekhnologiya neftekhimicheskogo i neftegazovogo proizvodstva *Engineering and Technology of Petrochemical and Oil and Gas Production*. Omsk, 2024. P. 44–45. (In Russ.).
8. Khafizov I. M., Gafarov R. Z., Zhirnov B. S. Optimizatsiya protsessa zagruzki i regeneratsii adsorbenta [Optimization of process of loading and regeneration of adsorbent] // Fundamental'nyye issledovaniya. *Fundamental Research*. 2017. No. 10-1. P. 56–61. EDN: WZDAAR. (In Russ.).
9. Fayzullina L. T., Tumanova E. Yu. Primeneniye tekhnologii plotnoy ukladki adsorbenta v kolonnu dlya povysheniya effektivnosti ego ispol'zovaniya [The use of technology for adsorbent stacking into the column for increasing its use efficiency] // Neftegazovoye delo. *Petroleum Engineering*. 2018. No. 1. P. 23–31. DOI: 10.17122/ngdelo-2018-1-23-31. (In Russ.).
10. Aerov M. E., Todes O. M., Narinskiy D. A. Apparaty so statsionarnym zernistym slozem: gidravlicheskiye i teplovyye osnovy raboty [Stationary granular layer devices: hydraulic and thermal principles of operation]. Leningrad, 1979. 176 p. (In Russ.).
11. Kel'tsev N. V. Osnovy adsorbtsionnoy tekhniki [Fundamentals of adsorption technology]. Moscow, 1984. 512 p. (In Russ.).
12. Pushnov A., Baltrenas P., Kagan A., Zagorskis A. Aerodinamika vozdukhoochistnykh ustroystv s zernistym slozem [Aerodynamics of air cleaning devices with a granular layer]. Vilnius, 2010. 346 p. ISBN 978-9955-28-643-1. (In Russ.).
13. Dvoretzkiy S. I., Dvoretzkiy D. S., Akulinin E. I., Golubyatnikov O. O. Modelirovaniye i optimizatsiya tsiklicheskh adsorbtsionnykh protsessov dlya razdeleniya i ochistki gazovykh smesey [Modeling and optimization of cyclic adsorption processes for separation and purification of gas mixtures]. Tambov, 2021. 212 p. ISBN 978-5-8265-2417-6. (In Russ.).
14. Filippov G. A., Melamed L. E., Tropkina A. I. Metodika matematicheskogo modelirovaniya i analiz gidrodinamiki sistem, soderzhashchikh zasypki i perforirovannyye peregorodki, na osnove vychislitel'nogo kompleksa ANSYS [Methodology of mathematic simulation and analysis of hydro-dynamics for systems containing pebble beds and perforate walls, on the basis of CAE system ANSYS] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki. *Proceedings of the Higher Educational Institutions. Energy Sector Problems*. 2005. No. 11-12. P. 64–79. EDN: KJUSAR. (In Russ.).
15. Fayzullina L. T., Tumanova E. Yu. Chislennoye modelirovaniye gidrodinamiki potoka v sloze adsorbenta [Numerical modeling of hydrodynamic flow in an adsorbent

layer] // Aktual'nyye problemy nauki i tekhniki. *Actual Problems of Science and Technology*. Ufa, 2017. Vol. 2. P. 33–35. EDN: YTBHCB. (In Russ.).

16. Dvoretzkiy S. I., Dvoretzkiy D. S., Akulinin E. I., Golubyatnikov O. O. Modelirovaniye i optimizatsiya tsiklicheskih adsorbtsionnykh protsessov dlya razdeleniya i ochistki gazovykh smesey [Modeling and optimization of cyclic adsorption processes for separation and purification of gas mixtures]. Tambov, 2021. 212 p. ISBN 978-5-8265-2417-6. (In Russ.).

17. ANSYS Workbench User's Guide. Release 12.1 / ANSYS, Inc. URL: <https://www.fluid.tuwien.ac.at/322057?action=AttachFile&do=get&target=fluug.pdf> (accessed: 01.04.2024). (In Engl.).

18. Xu P., Wen J., Zhao X. [et al.]. Study on adsorption characteristics optimization of vertical radial flow adsorber // *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*. 2022. Vol. 17 (2). DOI: 10.1002/apj.2755. (In Russ.).

KORNEEVA Anastasia Sergeevna, Assistant of Refrigeration and Compressor Equipment and Technology Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 9506-8607

Correspondence address: n.skazhutina.699@gmail.com

FILKIN Nikolay Yuryevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Refrigeration and Compressor Equipment and Technology Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 2384-3430

AuthorID (RSCI): 684478

AuthorID (SCOPUS): 56503788300

Correspondence address: finick@inbox.ru

For citations

Korneeva A. S., Filkin N. Yu. Improving the efficiency of adsorption filters with a short diffuser by improving their flow part // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2024. Vol. 8, no. 4. P. 54–62. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-4-54-62.

Received October 15, 2024.

© A. S. Korneeva, N. Yu. Filkin