

УДК 66.074.2/3:66.067.3

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕХАНИЗМА ОЧИСТКИ ГАЗОВ ОТ АЭРОЗОЛЕЙ МАСЛА ФИЛЬТРАМИ ИЗ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Хабибуллин Марат Яхиевич,  
m-hab@mail.ru

Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Октябрьский),  
Россия, 452607, г. Октябрьский, ул. Девоновская, 54-а.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью увеличения объемов проведения различных технологических процессов, связанных с эффективной очисткой газов в керамических фильтрах. Наиболее перспективной альтернативой рукавным фильтрам для очистки от пыли высокотемпературных газов являются фильтры с элементами из пористых проницаемых керамических материалов.

**Цель:** разработать и предложить схему лабораторной установки для изучения данного процесса путем использования фильтров с порами больших размеров в диапазоне исследуемых параметров за счет получения эффекта генерации «вторичных» аэрозолей и наблюдения на границе коэффициента проскока с увеличением скорости фильтрования и размера частиц.

**Объекты.** Исследованиям подвергались однослойные фильтрующие элементы – пористые цилиндры, двухслойные фильтрующие элементы, комбинированный фильтрующий элемент, который изготавливали нанесением на однослойный элемент из порошка с частицами размером 45 мкм слоя порошка с более крупными частицами (180 мкм). Комбинированный фильтрующий элемент состоял из двух элементов: наружного однослойного (размер частиц 180 мкм, внутренний диаметр 0,052 м, толщина стенки 0,004 м) и вставленного в него коаксиально двухслойного. Исследовали осаждение аэрозолей трансформаторного масла, получаемых распылением в специальном генераторе тумана. Дисперсный состав и концентрацию аэрозолей до и после фильтра определяли пятиступенчатым каскадным импактором.

**Методы.** Лабораторные исследования проводились согласно предложенным методам по эффективной очистке газов в керамических фильтрах при температуре 600 °С и более. Однако дальнейшее развитие этих исследований сдерживалось отсутствием достаточно экономичных отечественных керамических пористых фильтровальных элементов. Наиболее перспективной альтернативой рукавным фильтрам для очистки от пыли высокотемпературных газов являются фильтры, фильтрующий элемент которых изготовлен из пористых проницаемых керамических материалов, представляющих собой особый вид керамики, выполненной специальными технологическими приемами с повышенной пористостью и с соответствующими размерами и формами пор. В процессе проведения испытаний фиксировали: гидравлическое сопротивление образца, температуру и расход воздуха, концентрацию и размеры капель до и после фильтра. Технология создания пористых проницаемых керамических материалов из порошков заключается в следующем: получение узко фракционированного порошка-наполнителя (электрокорунд, дистен-силлиманит), подбор технологической связки (глина) и временной связки (поливиниловый спирт), смешивание компонентов в определенном соотношении, прессование (удельное давление 30 МПа), сушка (при 150–150 °С) и обжиг (при 1200–1300 °С) образцов. Технология создания пористых проницаемых керамических материалов из волокон заключается в следующем: получение водной суспензии силикатных волокон определенной длины (1–5 мм), формование образцов методом шликерного литья, сушка и обжиг. На ряд пористых образцов из порошков нанесена мембрана с целью создания образцов с малым размером пор и оценки их свойств.

Результаты исследования взаимосвязи гидравлического сопротивления  $\Delta p$  фильтрующих элементов со скоростью движения потока капельной смеси газа анализировали в критериальной форме в целях исключения влияния индивидуальных особенностей образцов и условий испытания. Установлен эффект генерации «вторичных» аэрозолей и подтвержден обработкой результатов. Эффективность фильтрования двухслойными и комбинированными фильтрами достигает 99,96 %. Полученные результаты исследования свидетельствуют о целесообразности использования в промышленных аппаратах керамических фильтровальных элементов.

### Ключевые слова:

Улавливание, однослойный, двухслойные, комбинированный, фильтрующий элемент.

### Введение

В настоящее время в газовой промышленности возросли требования к качеству подготовки углеродородных газов для их дальнейшей транспортировки и переработки, что обусловило необходимость поиска новых технических решений по более глубокой очистке и осушке газа от капельной жидкости и паров воды путем создания высокоэффективных фильтров для улавливания субмикронных частиц высококонцентрированных туманов [1].

Существуют типы фильтров с зернистыми многослойными металлокерамическими материалами, способными улавливать частицы жидкостей с очищающей способностью до 99,9 % и размером частиц 0,05...0,90 мкм [2].

Как правило, такие фильтры изготавливаются из зернистых смачиваемых материалов: сталь коррозионностойкая, никель, карбид кремния и оксид алюминия. Такие фильтры состоят из селективного тонкодисперсного материала, наносимого на грубодисперсную армирующую сетку, и его структура, согласно кристаллической решетке материала, анизотропная [3].

Опыт применения по очистке и осушке газа от капельной жидкости и паров в мире показывает, что керамические фильтры достигают высокой эффективности очистки газов с температурой, превышающей 400 °С, в то время как температура применения синтетических тканей не превышает 250 °С, стеклотканей – 300 °С [4].

### Методология

Лабораторные исследования, проведенные в Институте нефти и газа Уфимского государственного нефтяного технического университета (филиал в г. Октябрьский) (ИНиГ УГНТУ), подтвердили возможность эффективной очистки газов в керамических фильтрах при температуре 600 °С и более [5]. Однако дальнейшее развитие этих исследований сдерживалось отсутствием достаточно экономичных отечественных керамических пористых фильтровальных элементов. Наиболее перспективной альтернативой рукавным фильтрам для очистки от пыли высокотемпературных газов являются фильтры, фильтрующий элемент которых изготовлен из пористых проницаемых керамических материалов [6], представляющих собой особый вид керамики, выполненной специальными технологическими приемами с повышенной пористостью и с соответствующими размерами и формами пор [7].

В процессе проведения испытаний записывали результаты: гидравлического сопротивления образца, температуры и расхода воздуха, концентрации и размеров капель до и после фильтра.

Состав капель тумана на входе в фильтрующий элемент определенной конструкции, выполненный в ИНиГ УГНТУ (филиал в г. Октябрьский) [7], имеет следующие параметры: диаметр капель  $d_m=1,3$  мкм, среднее логарифмическое стандартное отклонение функции распределения капель по размерам  $\lg\sigma_k=0,23$ , величина плотности капли  $\rho_k=885$  кг/м<sup>3</sup>. Концентрация капель на входе в фильтр менялась в диапазоне 500–1000 мг/м<sup>3</sup>.

Технология изготовления пористых проницаемых керамических материалов из порошков заключается в следующем: получение узко фракционированного порошка-наполнителя (электрокорунд, дистен-силлиманит), подбор технологической связки (глина) и временной связки (поливиниловый спирт), смешивание компонентов в определенном соотношении, прессование (удельное давление 30 МПа), сушка (при 150–150 °С) и обжиг (при 1200–1300 °С) образцов.

Технология получения пористых проницаемых керамических материалов из волокон заключается в получении водной суспензии силикатных волокон определенной длины (1–5 мм), формовании образцов методом шликерного литья, сушке и обжиге.

На ряд пористых образцов из порошков нанесена мембрана с целью создания образцов с малым размером пор и оценки их свойств.

В табл. 1 приведены физико-технические характеристики образцов, а в табл. 2 – результаты их исследований из работы [8]. Эффективность улавливания капель  $\eta$  определялась при скорости фильтрации 3 см/с.

Экспериментальные исследования показали, что фракционная эффективность волокнистого фильтра, работающего в низкоскоростном режиме (как и в высокоскоростном), подчиняется нормально-логарифмическому закону. Это позволяет принять для эффективности получения результатов расчетов по фракционной эффективности волокнистых филь-

тров, работающих в низкоскоростном (диффузионном) режиме, вероятностный метод, который используется при расчете высокоскоростных (инерционных) фильтров [9].

Необходимое в этом случае значение  $d_{50}$  (диаметр капель, улавливаемых фильтром с эффективностью, равной 0,5 мкм) может быть выражено в виде зависимости, представленной по формуле (1):

$$d_{50} = 0,475 - 0,694F, \quad (1)$$

где  $F$  – функция, характеризующая фракционную эффективность улавливания капель в диффузионном режиме фильтрации, представленная в выражении (2):

$$F = \left[ \frac{\alpha H}{\pi d_b} \left( 2,002 - \ln \frac{d_b v_r \rho_r}{\mu} \right)^{-1/3} \left( \frac{C_k K_B T_r}{3\pi \mu d_m v_r d_b} \right)^{2/3} \right], \quad (2)$$

где  $d_{50}$  – диаметр капель, улавливаемых фильтром с эффективностью, равной 0,5 мкм;  $\alpha=(1-\varepsilon)$  – коэффициент плотности упаковки;  $H$  – толщина фильтровального слоя, м;  $\varepsilon$  – пористость фильтровального материала, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $d_b$  – диаметр волокон в фильтре, м;  $v_r$  – значение скорости газового потока, м/с;  $\rho_r$  – значение плотности газового потока, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – вязкость динамическая газов, Па·с;  $C_k$  – коэффициент Кенингема–Милликена;  $K_B$  – постоянная Больцмана (1,38<sup>-23</sup> Дж/К);  $T_r$  – абсолютная температура газов, К;  $d_m$  – медианный диаметр капель, относительно которого рассчитывается величина  $C_k$ , м.

В рассматриваемом случае за диаметр  $d_b$  принимается средний диаметр зерна  $d_3$ , м. Величину  $d_{50}$  определяли из выражения в работе [10] в виде (3):

$$x = \frac{\lg \left( \frac{d_m}{d_{50}} \right)}{\sqrt{\lg^2 \sigma_\eta + \lg^2 \sigma_k}}, \quad (3)$$

где  $x$  – аргумент функции  $\Phi(x)=\eta$  (определяется из таблицы работы [11]);  $\lg\sigma_\eta$  – величина стандартного логарифмического отклонения функции распределения взвешенных частиц с учетом фракционной эффективности каплеуловителя (при расчетах значение  $\lg\sigma_\eta=1,2$  соответствует значению  $\lg\sigma_\eta$  волокнистых фильтров с низкой скоростью очистки).

Обобщение экспериментальных данных показывает, что значения  $d_{50}$  для образцов керамических фильтров с  $d_3 < 50$  мкм достаточно хорошо определяются и составляют в среднем 0,23 мкм. Величины  $d_{50}$  для образцов с  $d_3 < 50$  мкм (образцы № 3 и 4) составляют от 1 до 2 мкм и характеризуются низкой эффективностью улавливания капель ( $\eta \approx 0,3 \dots 0,5$ ).

Очистку газов на выходе из поршневых и винтовых маслозаполненных агрегатов, например воздушных и гелиевых компрессоров, проводят в зависимости от требуемой степени очистки различными способами [12–16].

Исследована возможность тонкой очистки газов от аэрозолей масла (средний размер частиц ~1 мкм) металлокерамическими фильтрами. Содержание аэрозолей в сжатом газе не должно превышать 0,01 мг/м<sup>3</sup>. Эти фильтры легко поддаются механической обра-

ботке и сварке; могут быть регенерированы обратным потоком газа или химического растворителя, а также прокаливанием; имеют относительно высокую механическую прочность; однородны по структуре; выдерживают высокие температуры. Однако недостаток данных о фракционной эффективности улавливания аэрозолей масел в металлокерамических фильтрах [17–21] затрудняет расчет, проектирование и использование их в системах очистки компрессоров.

Исследуемые однослойные фильтрующие элементы – пористые цилиндры (внутренний диаметр 0,034 м, наружный 0,04 м, длина ~0,1 м) – устанавливали в

цилиндрической камере (диаметр 0,1 м) так, чтобы один торец элемента был заглушен, а другой имел в центре отверстие для подвода газа. Двухслойные фильтрующие элементы изготавливали нанесением на однослойный элемент из порошка с частицами размером 45 мкм слоя порошка с более крупными частицами (180 мкм). Комбинированный фильтрующий элемент состоял из двух элементов: наружного однослойного (размер частиц 180 мкм, внутренний диаметр 0,052 м, толщина стенки 0,004 м) и вставленного в него коаксиально двухслойного [22–26]. Характеристики исследуемых элементов приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Характеристика исследуемых фильтрующих элементов

**Table 1.** Characteristics of the investigated filter elements

Номер образца фильтрующего элемента Number of filter element sample	Тип фильтрующего элемента Filter element type	Материал Material	Размер, мкм Size, microns		Производительность по воздуху (при $\Delta p=5,9$ кПа), м <sup>3</sup> /с Air capacity (at $\Delta p=5,9$ kPa), m <sup>3</sup> /s
			частиц порошка powder particles	пор (средний) pore (average)	
1	Однослойный Single layer	Сплав H60M20 Alloy H60M20	63	24	$2,25 \cdot 10^{-3}$
2			40	14	$1,13 \cdot 10^{-3}$
3		Титан Titanium	45	7	$0,78 \cdot 10^{-3}$
4		Бронза ПРБ Bronze PWB	40	12	$0,15 \cdot 10^{-3}$
5	Двухслойный Double layer	Титан Titanium	45; 180		Не определяли Not determined
6	Комбинированный Combined		180; 45; 180		

Исследовали осаждение аэрозолей трансформаторного масла, получаемых распылением в специальном генераторе тумана. Дисперсный состав и концентрацию аэрозолей до и после фильтра определяли пятиступенчатым каскадным импактором [27–31]. Расчетные значения медианного размера  $d_{50}$  частиц, осаждаемых на ступенях импактора при постоянном расходе газа через него (20 л/мин), приведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Расчетные значения медианного размера  $d_{50}$  частиц

**Table 2.** Calculated values of the median size of  $d_{50}$  particles

Расчетные данные/Estimated data					
Ступень/Step	I	II	III	IV	V
$d_{50}$ , мкм/ $\mu\text{m}$	8	5,23	2,85	1,85	1

Статистическое распределение аэрозольных частиц после генератора тумана подчинялось нормальному логарифмическому закону. Величина среднего размера частиц по диаметру составлял  $d_{50}=3,9$  мкм. Среднее квадратическое отклонение от функции распределения размера аэрозольных частиц  $\lg \Delta=0,326$ . Концентрация аэрозолей перед фильтром была постоянной ( $3,8$  г/м<sup>3</sup>).

Пробы перед фильтром отбирали изокинетично, а после фильтра – неизокинетично (параметр неизокинетичности 0,5...2,0). Однако, как показал расчет [6], погрешность измерения концентрации частиц размером 10 мкм не превышала 9,5 %. Концентрация аэрозольных частиц, измеренная импактором, отличалась от концентрации, измеренной балансным методом с помощью абсолютных фильтров, не более чем на 30 % [32–38].

### Обсуждение

Результаты исследования взаимосвязи гидравлического сопротивления  $\Delta p$  фильтрующих элементов со скоростью движения потока капельной смеси газа анализировали в критериальной форме в целях исключения влияния индивидуальных особенностей образцов и условий испытания [39–41].

Обработка экспериментальных данных по гидравлическому сопротивлению сухих фильтровальных перегородок, изготовленных из различных материалов (металлической проволоки, монель-металла, полипропиленовых и лавсановых волокон и др.), проводилась на основании анализа классических уравнений гидродинамики, используемых для определения величины проницаемости газов через пористые перегородки. Для расчета гидравлического сопротивления волокнистых фильтров в тех случаях, когда течение не является ламинарным и необходимо учитывать инерционные потери, было предложено уравнение (4):

$$\Delta p = \zeta \frac{\vartheta_r^2 \rho_r H \alpha}{\varepsilon^2 \pi d_b}, \quad (4)$$

где  $\Delta p$  – гидравлическое сопротивление сухого фильтра, МПа;  $\zeta$  – коэффициент гидравлического сопротивления сухого фильтра;  $\vartheta_r$  – скорость газового потока, м/с;  $\rho_r$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $H$  – глубина фильтрующего слоя, м;  $\alpha$  – относительная плотность фильтрующей среды;  $\varepsilon$  – пористость;  $d_b$  – диаметр волокон, м.

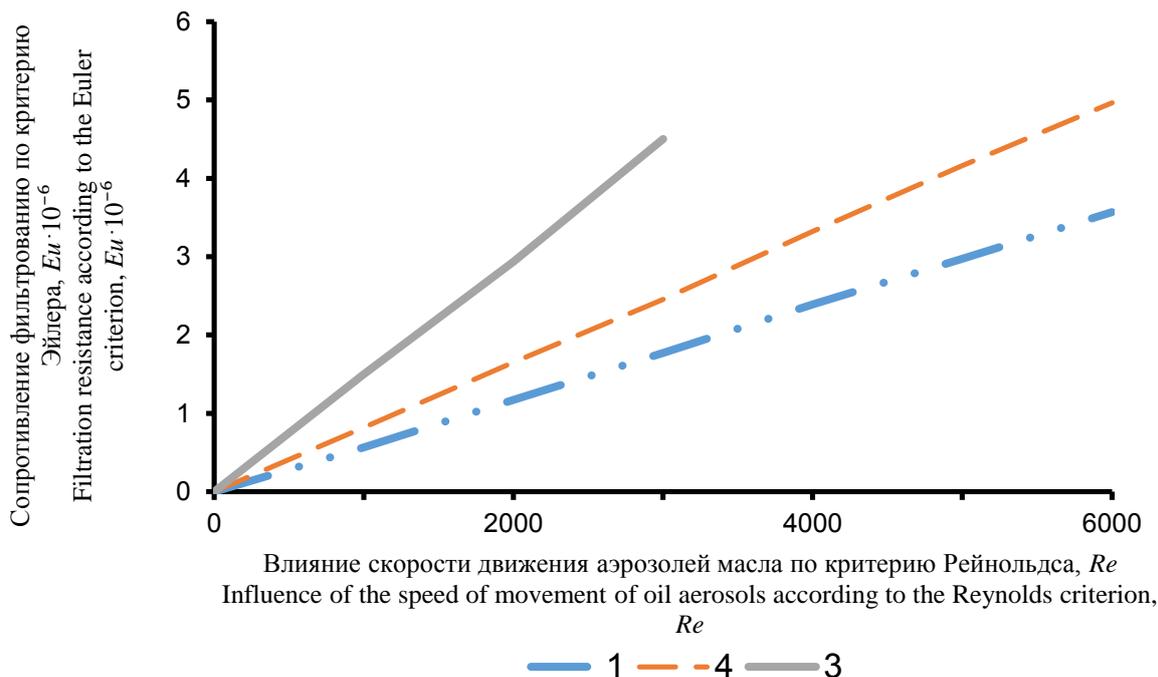
Уравнение (4) отражает квадратичную зависимость гидравлического сопротивления фильтра от скорости газа, что характерно для турбулентного

(скоростного) движения газового потока, а коэффициент гидравлического сопротивления  $\zeta$  должен учитывать взаимное расположение волокон в фильтре.

Коэффициент  $\zeta$ , характеризующий гидравлическое сопротивление перегородок, решеток и других препятствий на пути движения газового потока, находится в зависимости от критерия  $Re$  до определенного критического значения  $Re_{кр}$ , после которого (с увеличением скорости газового потока) наступает автомодельный режим, и величина  $\zeta$  сохраняет практически постоянное, независимое от  $Re$  значение.

Исследования показали, что при скорости газового потока  $>3$  м/с ( $Re > 8$ ) величина  $\zeta$  колеблется в пределах от 3 до 6. При  $Re < 5$  значения резко возрастают [42, 43].

На основе экспериментальных данных были рассчитаны безразмерные критерии Эйлера  $Eu$  и Рейнольдса  $Re$ . Как видно из рис. 1, во всем диапазоне исследованных скоростей сопротивление ( $Eu$ ) газовому потоку у фильтров из титана выше, чем у фильтров из бронзы и сплава H60M20. Функция  $Eu=f(Re)$  близка к линейной, т. е. соответствует закону Дарси для проницаемых тел и может быть описана уравнением.



**Рис. 1.** Влияние скорости движения ( $Re$ ) аэрозолей масла на сопротивление ( $Eu$ ) фильтрованию (номера прямых соответствуют номерам фильтрующих элементов в табл. 1)

**Fig. 1.** Influence of the speed of movement ( $Re$ ) of oil aerosols on the resistance ( $Eu$ ) to filtration (the numbers of the straight lines correspond to the numbers of the filter elements in Table 1)

Рост гидравлического сопротивления  $\Delta p$  фильтра с увеличением продолжительности его работы (рис. 2) объясняется, с одной стороны, уменьшением живого сечения каналов в результате образования на их стенках пленки масла, а с другой – образованием пузырей в выталкиваемой жидкости при выходе газа из фильтра и дополнительным гидравлическим сопротивлением  $\Delta p_\sigma$ , связанным с преодолением сил поверхностного натяжения  $\sigma$ . Полное гидравлическое сопротивление  $\Delta p$  на элементе складывается из сопротивления  $\Delta p_o$  «сухого» (не замасленного) элемента и  $\Delta p_\sigma$ , рассчитываемого из источника [44] по формуле (5):

$$\Delta p_\sigma = \beta 4\sigma / d_o, \quad (5)$$

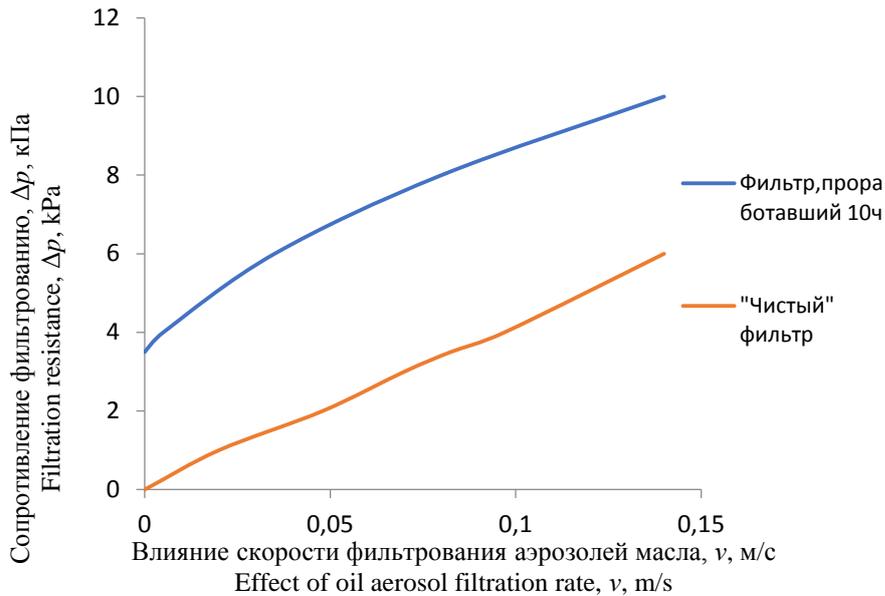
где  $\beta=0,8 \dots 1,0$  – коэффициент;  $\sigma$  – силы поверхностного натяжения, н/м;  $d_o$  – средний размер пор, м.

Результаты расчета по этой формуле хорошо согласуются с данными эксперимента. Следует отметить, что подобный рост гидравлического сопротивления газовому потоку  $\Delta p_\sigma$  с учетом преодоления сил поверхностного натяжения наблюдается и на

сетчатых барабанных решетках [45]. Для оценки фильтрующей способности элементов был принят коэффициент проскока частиц аэрозолей, определяемый как отношение массовых концентраций аэрозолей на выходе и входе фильтра в зависимости от скорости газа и размера аэрозольных частиц. Сложный характер этой зависимости (рис. 3) для элемента № 1 (табл. 1) обусловлен сложным характером процесса улавливания аэрозолей (инерционный, диффузионный, касания и т. п.) и генерацией «вторичных» аэрозолей в результате разрыва (дробления) масляных пленок в пузырьках.

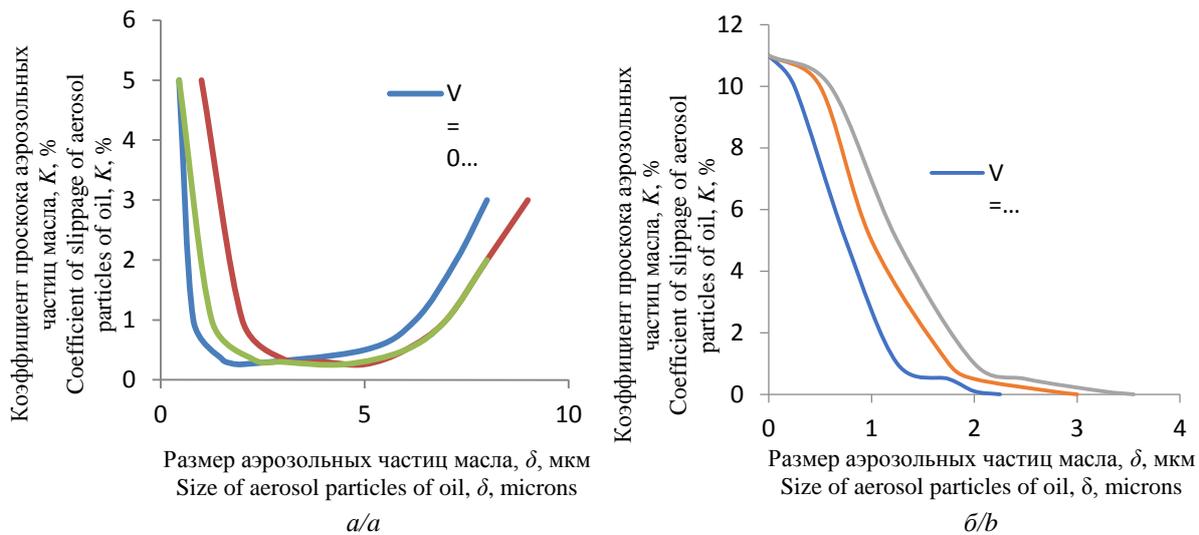
При использовании фильтров с порами больших размеров в диапазоне исследуемых параметров эффект генерации «вторичных» аэрозолей отсутствует и на границе наблюдается постепенное уменьшение коэффициента проскока с увеличением скорости фильтрования и размера частиц (рис. 3).

Из исследованных однослойных фильтрующих элементов наиболее эффективны элементы № 1 и 2 из сплава H60M20 (табл. 3).



**Рис. 2.** Влияние скорости фильтрования  $v$  аэрозолей масла на сопротивление фильтрованию  $\Delta p$  в зависимости от продолжительности работы фильтра из сплава H60M20: — «чистый» фильтр; — фильтр, проработавший 10 ч

**Fig. 2.** Influence of the filtration rate  $v$  of oil aerosols on the filtration resistance  $\Delta p$  depending on the duration of the filter from the alloy H60M20: — «clean» filter; — filter that worked for 10 hours



**Рис. 3.** Зависимость коэффициента проскока  $K$  аэрозольных частиц масла от их размера  $\delta$  при разной скорости фильтрования  $V$  (м/с) через фильтрующие элементы из сплава H60M20: а, б) соответственно элементы № 1 и 2 (табл. 1)

**Fig. 3.** Dependence coefficient of slippage of aerosol particles of oil  $K$  of aerosol oil particles on their size  $\delta$  at different filtration rates  $V$ (м/с) through filtering elements made of alloy H60M20: а, б) elements no. 1, 2, respectively (Table 1)

**Таблица 3.** Результаты исследования однослойных фильтрующих элементов

**Table 3.** Results of research of single-layer filter elements

Номер образца фильтра (табл. 1) Filter sample number (Table 1)	Оптимальная скорость фильтрования, м/с Optimal filtration speed, m/s	Коэффициент проскока (%) аэрозольных частиц с размером, мкм Coefficient of slippage (%) of aerosol particle size, $\mu\text{m}$						Эффективность фильтрования, % Filtration efficiency, %
		Более 8 More than 8	8,0...5,23	5,23...2,85	2,85...1,85	1,85...1,00	Менее 1 Less than 1	
1	0,143	0,0	0,0	0,03	0,55	1,68	11,7	99,26
2	0,04	2,18	0,4	0,24	0,16	1,14	5	99,13
3	0,02	2,92	1,6	0,16	0,35	0,32	0,1	98,57
4	0,025	9,74	8,02	4,69	1,45	0,81	1,08	96,04
5	0,133	5,91	0,37	0,17	0,08	0,23	0,02	99,15
6	0,02	0,26	0,0	0,0	0,0	0,0	0,14	99,96

## Выводы

Результаты исследования взаимосвязи гидравлического сопротивления  $\Delta p$  фильтрующих элементов со скоростью движения потока капельной смеси газа анализировали в критериальной форме в целях исключения влияния индивидуальных особенностей образцов и условий испытания. В процессе исследования установлен эффект генерации «вторичных» аэрозолей, что подтверждается обработкой результатов. Процесс осаждения инерционным механизмом вполне эффективно происходит за счет диффузионных процессов переноса. Обобщение экспериментальных данных (рис. 2) показывает, что значения  $d_{50}$

для образцов керамических фильтров со средним диаметром зерен (равным диаметру волокон фильтра)  $d_3 < 50$  мкм достаточно хорошо определяются и составляют в среднем 0,23 мкм. Величины  $d_{50}$  для образцов  $d_3 > 50$  мкм (образцы № 3 и 4) составляют от 1 до 2 мкм и характеризуются низкой эффективностью улавливания капель ( $\eta \approx 0,3-0$ ). Результаты исследования свидетельствуют о целесообразности использования в промышленных аппаратах керамических фильтрованных элементов с  $d_3 \leq 50$  мкм. Эффективность фильтрования двухслойными и комбинированными фильтрами достигает 99,96 % (элемент № 6).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Improved design of two-stage filter cartridges for high sulfur natural gas purification / Z. Liu, Z. Ji, J. Shang, H. Chen, Y. Liu, R. Wang // *Separation and Purification Technology*. – 2018. – V. 198. – P. 155–162.
2. Filtration of aerosol particles by cylindrical fibers within a parallel and staggered array / Z. Liu, Z. Ji, J. Shang, H. Chen, Y. Liu, R. Wang // *Microsystem Technologies*. – 2016. – V. 22 (5). – P. 965–977.
3. Хабибуллин М.Я., Сулейманов Р.И. Повышение надежности сварных соединений трубопроводов в системе поддержания пластового давления // *Нефтегазовое дело*. – 2019. – Т. 17. – № 5. – С. 93–98. DOI: 10.17122/ngdelo-2019-5-93-98
4. Guo B., Ghalambor A. *Natural gas engineering handbook*. 2nd ed. – Houston, Texas: Gulf Publishing Company, 2012. – 472 p.
5. Permeability of filter cartridges used for natural gas filtration at high pressure / Cheng Chang, Zhongli Ji, Liu Chuanbin, Zhao Fengting // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2016. – V. 34. – P. 419–427.
6. Mehdi A., Mohebbi A., Fabrizio S. Experimental study of filtration system performance of natural gas in urban transmission and distribution network: a case study on the city of Kerman // *Iran. Fuel*. – 2011. – V. 90. – № 3. – P. 11661171.
7. Mokhatab S., Poe W. *Handbook of natural gas transmission and processing*. 2nd ed. – USA, Kidlington, Oxford: Elsevier Inc., 2012. – 802 p.
8. Петров Д.В., Матросов И.И. Рамановский газоанализатор (РГА): измерения природного газа // *Прикладная спектроскопия*. – 2016. – Т. 70. – № 10. – С. 1770–1776.
9. Шурайц А.Л. Выявление величины запаса падения давления на фильтрующем элементе // *Проблемы и методы обеспечения надежности и безопасности систем транспорта нефти, нефтепродуктов и газа: материалы международного форума*. – Уфа, 2012. – С. 360–362.
10. Хабибуллин М.Я. Повышение долговечности и надежности работы центробежных сепараторов путем применения новых материалов // *Нефтегазовое дело*. – 2020. – Т. 18. – № 3. – С. 107–112. DOI: 10.17122/ngdelo-2020-3-107-112
11. Усачев А.П. Основные принципы устройства и функционирования газовых цилиндрических фильтрующих устройств высокой пропускной способности // *Региональная архитектура и строительство*. – 2018. – № 1. – С. 141–147.
12. Шурайц А.Л., Густов С.В., Недлин М.С. Фильтры предварительной очистки – слабое звено в общей цепи обеспечения безопасности газорегуляторных пунктов высокой пропускной способности // *Проблемы и методы обеспечения надежности и безопасности систем транспорта нефти, нефтепродуктов и газа: материалы науч.-практ. конф.* – Уфа, 2014. – С. 435–437.
13. Model-based information fusion investigation on fault isolation of subsea systems considering the interaction among subsystems and sensors / G. Song, P.S. Rossi, F. Khan, N. Paltrinieri, A. Bahoo Toroody // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. – 2020. – V. 67. – P. 104267. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104267.
14. Хабибуллин М.Я. Исследование процессов, происходящих в колонне труб при устьевой импульсной закачке жидкости в скважину // *Нефтегазовое дело*. – 2018. – Т. 16. – № 6. – С. 34–39. DOI: 10.17122/ngdelo-2018-6-34-39
15. Усачев А.П. Разработка математической модели по обоснованию типа системы грубой очистки природного газа от твердых частиц и оптимизации ее геометрических и эксплуатационных параметров // *Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов*. – 2011. – № 1 (83). – С. 148–158.
16. Thomas D. *Aerosol Filtration*. – Oxford: Elsevier, 2016. – 218 p.
17. Bell C.G., Strauss W. Effectiveness of vertical mist eliminators in a cross flow-scrubber // *Journal of the Air Pollution Control Association*. – 1973. – V. 23. – № 11. – P. 967–969.
18. Billings C.E. *Fabric filter installations for flue gas fly ash control* // *Powder Technology*. – 1977. – V. 18. – P. 79–110.
19. Khabibullin M.Ya. Development of the design of the sucker-rod pump for sandy wells // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – P. 012065. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012065
20. Termani S.M. Filtration of aerosol particles by cylindrical fibers within a parallel and staggered array // *Microsystem Technologies*. – 2016. – V. 22. – № 5. – P. 965–977.
21. Шурайц А. Л., Бирюков А.В., Усачев А.П. Разработка методики расчета установок двухступенчатой очистки природного газа от механических примесей // *Научный журнал строительства и архитектуры*. – 2020. – № 3 (59). – С. 32–42. DOI: 10.36622/VSTU.2020.59.3.003.
22. Усачев А.П. Целевая функция, устанавливающая требования к системе защите, предотвращающей падение давления природного газа на фильтрующем элементе установки очистки сверх максимально допустимого значения // *Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов*. – 2011. – № 4 (86). – С. 164–173.
23. Усачев А.П. Целевая функция, устанавливающая требования по предотвращению попадания крупных твердых частиц в оборудование газорегуляторных пунктов // *Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов*. – 2011. – № 2 (84). – С. 133–141.
24. Suleimanov R.I., Khabibullin M.Ya., Suleimanov Re.I. Analysis of the reliability of the power cable of an electric-centrifugal pump unit // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering 2019*. – 2019. – P. 012054. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012054
25. Шерстюк П.В. Определение оптимальной формы корпусов системы очистки природного газа // *Проблемы и решения обеспечения надежности и безопасности систем транспорта нефти и газа: материалы нефтегазового форума*. – 2011. – № 4. – С. 371–373.
26. Шерстюк П.В. Разработка внутренней защитной оболочки фильтрующего элемента в установке очистки природного газа // *Энергоэффективность. Проблемы и решения: материалы XII Всероссийской научно-практической конференции*. – Уфа, 2012. – С. 171–172.
27. Хабибуллин М.Я. Увеличение эффективности разделения жидких систем при сборе пластовой жидкости // *Нефтегазовое дело*. – 2020. – Т. 18. – № 2. – С. 64–71. DOI: 10.17122/ngdelo-2020-2-64-71
28. Шерстюк П.В. Разработка наружной защитной оболочки фильтрующего элемента в установке очистки природного газа //

- Энергоэффективность. Проблемы и решения: материалы XII Всероссийской научно-практической конференции. – Уфа, 2012. – С. 173–174.
29. Усачев А.П. Результаты опытов по выявлению динамики роста перепада давления в процессе засорения фильтрующего элемента твердыми частицами // Проблемы и методы обеспечения надежности и безопасности систем транспорта нефти, нефтепродуктов и газа: материалы международного форума. – Уфа, 2012. – С. 358–359.
  30. Гиляев Ген.Г., Хабибуллин М.Я., Гиляев Г.Г. Перспективы применения кислотного геля для закачки проппанта в процессе проведения гидроразрыва карбонатных пластов на территории самарской области // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 8. – С. 54–57. DOI: 10.24887/0028-2448-2020-8-54-57
  31. Усачев А.П. Совершенствование методических подходов к замеру перепада давления на цилиндрических фильтрующих элементах современных газовых фильтров сетчатого типа // Нефтегазовое дело. – 2015. – № 1. – Т. 13. – С. 131–136.
  32. Шурайц А.Л. Анализ существующей конструкции газового фильтра предварительной очистки с минимальной удельной металлоемкостью // Проблемы и методы обеспечения надежности и безопасности систем транспорта нефти, нефтепродуктов и газа: материалы науч.-практ. конф. – Уфа: Изд-во ИПТЭР, 2015. – С. 347–348.
  33. Салин Д.В. Предпосылки к разработке газового фильтра предварительной очистки с блоком вертикально расположенных фильтрующих цилиндрических элементов // Проблемы и методы обеспечения надежности и безопасности систем транспорта нефти, нефтепродуктов и газа: материалы науч.-практ. конф. – Уфа: Изд-во ИПТЭР, 2015. – С. 344–346.
  34. Mena L., Talaache Z. To a probabilistic approach of reinforced slope stability analysis // International Journal of Engineering & Technology. – 2013. – V. 5. – P. 125–130. DOI: 10.7763/IJET.2013.V5.525.
  35. Epistemic-based investigation of the probability of hazard scenarios using Bayesian network for the lifting operation of floating objects / A.B. Toroody, M.M. Abaiee, R. Gholamnia, M.J. Ketabdari // Journal of Marine Science and Application. – 2016. – V. 15. – P. 250–259. DOI: 10.1007/s11804-016-1361-y
  36. Khabibullin M.Ya., Suleimanov R.I. Automatic packer reliability prediction under pulsed transient flooding of hydrocarbon reservoirs // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. – 2019. – P. 012024. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012024
  37. Густов С.В. Разработка методических положений по предотвращению попадания крупных твердых частиц в оборудованные газорегуляторных пунктов газа // Нефтегазовое дело. – 2012. – № 3. – С. 268–278.
  38. Гумеров А.Г., Усачев А.П., Шурайц А.Л. Математическая модель оптимизации системы комплексной защиты подземных резервуаров и трубопроводов сжиженного углеводородного газа путем заключения в футляр, заполненный азотом // Нефтегазовое дело. – 2008. – № 2. – Т. 6. – С. 38–46.
  39. Fattahi H., Ilghani N.Z. Slope stability analysis using Bayesian Markov Chain Monte Carlo Method // Geotech. Geol. Eng. – 2020. – V. 38. – P. 2609–2618. DOI: 10.1007/s10706-019-01172-w.
  40. Khabibullin M.Y. Theoretical grounding and controlling optimal parameters for water flooding tests in field pipelines // Journal of Physics: Conference Series. International Conference «Information Technologies in Business and Industry». – 2019. – P. 042013. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/4/042013
  41. Густов С.В., Усачев А.П., Шурайц А.Л. Определение капитальных вложений в обогреваемое помещение для размещения фильтра // Энергоэффективность. Проблемы и решения: материалы XIV Всерос. науч.-практ. конф. – Уфа: Изд-во ИПТЭР, 2014. – С. 240–242.
  42. Кудряшова О.Б., Антонникова А.А. Физико-математическая модель эволюции двухфазных аэрозолей при ультразвуковом воздействии // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2012. – № 4 (20). – С. 87–94.
  43. Хабибуллин М.Я. Совершенствование процесса солянокислотной обработки скважин применением новейших технологий и оборудования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 10. – С. 128–134. DOI: 10.18799/24131830/2020/10/2861
  44. Кудряшова О.Б., Антонникова А.А. Математическая модель эволюции аэрозолей при ультразвуковом воздействии // Известия Томского политехнического университета. Математика и механика. – 2013. – Т. 322. – № 2. – С. 160–163.
  45. Valentine R.J. An assessment of the factors that contribute to the poor performance of geosynthetic-reinforced earth retaining walls // Proceedings of the International Symposium on Design and Practice of Geosynthetic-Reinforced Soil Structures. – Bologna, Italy, 14–16 October 2013. – P. 318–327.

Поступила 27.04.2022 г.

#### Информация об авторах

**Хабибуллин М.Я.**, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтепромысловых машин и оборудования, Институт нефти и газа, Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Октябрьский).

UDC 66.074.2/3:66.067.3

## INCREASING THE EFFICIENCY OF THE MECHANISM FOR GAS CLEANING FROM OIL AEROSOLS BY FILTERS FROM METALLOCERAMIC MATERIALS

**Marat Ya. Khabibullin,**  
m-hab@mail.ru

Ufa State Petroleum Technological University (Branch in the City of Oktyabrsky),  
54a, Devonskaya street, Oktyabrsky, 452607, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need to increase in volumes the implementation of various technological processes associated with the effective purification of gases in ceramic filters. The most promising alternative to bag filters for removing dust from high-temperature gases are filters with elements made of porous permeable ceramic materials.

**Purpose:** to develop and propose a scheme of a laboratory setup for studying this process by using filters with large pores in the range of parameters under study by obtaining the effect of generating «secondary» aerosols and observing the breakthrough coefficient at the boundary with an increase in the filtration rate and particle size.

**Objects.** Single-layer filter elements were subjected to research – porous cylinders, two-layer filter elements, combined filter element. The latter was made by applying a layer of powder with larger particles (180  $\mu\text{m}$ ) to a single-layer element from a powder with particles of 45  $\mu\text{m}$  in size. The combined filter element consisted of two elements: an outer single-layer element (particle size 180  $\mu\text{m}$ , inner diameter 0,052 m, wall thickness 0,004 m) and a coaxial two-layer one inserted into it. The deposition of transformer oil aerosols obtained by spraying in a special fog generator was studied. The dispersed composition and concentration of aerosols before and after the filter were determined using a five-stage cascade impactor.

**Methods.** Laboratory studies were carried out according to the proposed methods for the effective purification of gases in ceramic filters at a temperature of 600 °C and more. However, the further development of these studies was hampered by the lack of sufficiently economical domestic ceramic porous filter elements. The most promising alternative to bag filters for dust removal of high-temperature gases are filters, the filter element of which is made of porous permeable ceramic materials – special type of ceramics made by special technological methods with increased porosity and with appropriate sizes and shapes of pores. While testing, the following characteristics were recorded: the hydraulic resistance of the sample, the temperature and air flow, the concentration and size of the droplets before and after the filter. The technology for creating porous permeable ceramic materials from powders is as follows: obtaining a narrowly fractionated filler powder (electrocorundum, disthene-sillimanite), selecting a technological binder (clay) and a temporary binder (polyvinyl alcohol), mixing the components in a certain ratio, pressing (specific pressure 30 MPa), drying (at 150–150 °C) and firing (at 1200–1300 °C) samples. The technology for creating porous permeable ceramic materials from fibers is as follows: obtaining an aqueous suspension of silicate fibers of a certain length (1–5 mm), molding samples by slip casting, drying and firing. A membrane was applied to a number of porous powder samples in order to create samples with a small pore size and evaluate their properties.

The results of the study of the relationship between the hydraulic resistance  $\Delta p$  of the filter elements and the flow rate of the droplet gas mixture were analyzed in the criterion form in order to exclude the influence of the individual characteristics of the samples and test conditions. The effect of generating «secondary» aerosols was established and confirmed by processing the results. The efficiency of filtration with two-layer and combined filters reaches 99,96 %. The obtained research results indicate the expediency of using ceramic filter elements in industrial devices.

### Key words:

Capturing, single layer, double layer, combined, filter element.

### REFERENCES

- Liu Z., Ji Z., Shang J., Chen H., Liu Y., Wang R. Improved design of two-stage filter cartridges for high sulfur natural gas purification. *Separation and Purification Technology*, 2018, vol. 198, pp. 155–162.
- Liu Z., Ji Z., Shang J., Chen H., Liu Y., Wang R. Filtration of aerosol particles by cylindrical fibers within a parallel and staggered array. *Microsystem Technologies*, 2016, vol. 22 (5), pp. 965–977.
- Khabibullin M.Ya., Suleimanov R.I. Improving the reliability of welded joints of pipelines in the reservoir pressure maintenance system. *Oil and Gas Business*, 2019, vol. 17, no. 5, pp. 93–98. In Rus. DOI: 10.17122/ngdelo-2019-5-93-98.
- Guo B., Ghalambor A. *Natural gas engineering handbook* [Natural gas engineering handbook]. 2<sup>nd</sup> ed. Houston, Texas, Gulf Publ. Company, 2012. 472 p.
- Chang Cheng, Ji Zhongli, Chuanbin Liu, Fengting Zhao. Permeability of filter cartridges used for natural gas filtration at high pressure. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, vol. 34, pp. 419–427.
- Mehdi A., Mohebbi A., Fabrizio S. Experimental study of filtration system performance of natural gas in urban transmission and distribution network: a case study on the city of Kerman. *Iran. Fuel*, 2011, vol. 90, no. 3, pp. 11661171.
- Mokhatab S., Poe W. *Handbook of natural gas transmission and processing*. 2<sup>nd</sup> ed. USA, Kidlington, Oxford, Elsevier Inc, 2012, 802 p.
- Petrov D.V., Matrosov I.I. Raman gas analyzer (RGA): natural gas measurements. *Applied spectroscopy*, 2016, vol. 70, no. 10, pp. 1770–1776.
- Shurayts A.L. Identification of the value of the pressure drop margin on the filter element. *Problems and methods of ensuring the reliability and safety of oil, oil products and gas transport systems. Materials of the international forum*. Ufa, 2012. pp. 360–362.
- Khabibullin M.Ya. Improving the durability and reliability of centrifugal separators by using new materials. *Oil and Gas Business*, 2020, vol. 18, no. 3, pp. 107–112. In Rus. DOI: 10.17122/ngdelo-2020-3-107-112.
- Usachev A.P. Basic principles of the device and functioning of high-throughput gas cylindrical filtering devices. *Regional architecture and construction*, 2018, no. 1, pp. 141–147. In Rus
- Shurayts A.L., Gustov S.V., Nedlin M.S. Filtry predvaritelnoy ochistki – slaboe zveno v obshchey tsepi obespecheniya bezopasnosti gazoregulyatornykh punktov vysokoy propusknoy sposobnosti [Preliminary filters – a weak link in the overall safety chain of high-throughput gas control points]. *Problemy i metody obespecheniya nadezhnosti i bezopasnosti sistem transporta nefii, nefteproduktov i gaza. Materialy nauchno-prakticheskoy konfer-*

- entsii [Problems and methods of ensuring the reliability and safety of oil, oil products and gas transport systems. Materials of scientific-practical conference]. Ufa, 2014, no. 4, pp. 435–437.
13. Song G., Rossi P.S., Khan F., Paltrinieri N., Bahoo Toroody A. Model-based information fusion investigation on fault isolation of subsea systems considering the interaction among subsystems and sensors. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2020, vol. 67, pp. 104267. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104267.
  14. Khabibullin M.Ya. Investigation of the processes occurring in the pipe string during the wellhead pulsed injection of fluid into the well. *Oil and Gas Business*, 2018, vol. 16, no. 6, pp. 34–39. In Rus. DOI: 10.17122/ngdelo-2018-6-34-39.
  15. Usachev A.P. Development of a mathematical model for substantiating the type of system for coarse purification of natural gas from solid particles and optimizing its geometric and operational parameters. *Problems of collecting, preparing and transporting oil and oil products*, 2011, no. 1 (83), pp. 148–158. In Rus.
  16. Thomas D. *Aerosol filtration*. Oxford, Elsevier, 2016. 218 p.
  17. Bell G.G., Strauss W. Effectiveness of vertical mist eliminators in a cross flow-scrubber. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 1973, vol. 23, no. 11, pp. 967–969.
  18. Billings C.E. Fabric filter installations for flue gas fly ash control. *Powder Technology*, 1977, vol. 18, pp. 79–110.
  19. Khabibullin M.Ya. Development of the design of the sucker-rod pump for sandy wells. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, pp. 012065. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012065
  20. Termani S.M. Filtration of aerosol particles by cylindrical fibers within a parallel and staggered array. *Microsystem Technologies*, 2016, vol. 22, no. 5, pp. 965–977.
  21. Shurayts A.L., A. V. Biryukov A.V., Usachev A.P., J. Development of a methodology for calculating installations for two-stage purification of natural gas from mechanical impurities. *Scientific journal of construction and architecture*, 2020, no. 3 (59), pp. 32–42. DOI: 10.36622/VSTU.2020.59.3.003. In Rus.
  22. Usachev A.P. Objective function that establishes the requirements for the protection system that prevents the pressure drop of natural gas on the filter element of the purification unit in excess of the maximum allowable value. *Problems of collecting, preparing and transporting oil and oil products*, 2011, no. 4 (86), pp. 164–173. In Rus.
  23. Usachev A.P. Objective function that establishes the requirements for preventing the ingress of large solid particles into the equipment of gas control points. *Problems of collecting, preparing and transporting oil and oil products*, 2011, no. 2 (84), pp. 133–141. In Rus.
  24. Suleimanov R.I., Khabibullin M.Ya., Suleimanov Re.I. Analysis of the reliability of the power cable of an electric-centrifugal pump unit. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering 2019*, 2019, pp. 012054. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012054
  25. Sherstyuk P.V. Determination of the optimal form of natural gas purification system housings. *Problems and solutions of ensuring the reliability and safety of oil and gas transport systems: materials of the oil and gas forum*, 2011, no. 4, pp. 371–373. In Rus.
  26. Sherstyuk P.V. Razrabotka vnutrenney zashchitnoy obolochki filtruyushchego elementa v ustanovke ochistki prirodnogo gaza [Development of the inner protective shell of the filter element in the installation of natural gas purification]. *Energoeffektivnost. Problemy i resheniya. Materialy XII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Energy Efficiency. Problems and solutions. Proc. of the XII All-Russian Scientific and Practical Conference]. Ufa, 2012, pp. 171–172.
  27. Khabibullin M.Ya. Increasing the efficiency of separation of liquid systems during the collection of reservoirs fluid. *Oil and gas business*, 2020, vol. 18, no. 2, pp. 64–71. In Rus. DOI: 10.17122/ngdelo-2020-2-64-71.
  28. Sherstyuk P.V. Razrabotka vneshney zashchitnoy obolochki filtruyushchego elementa v ustanovke ochistki prirodnogo gaza [Development of the outer protective shell of the filter element in a natural gas purification unit]. *Energoeffektivnost. Problemy i resheniya. Materialy XIV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Energy Efficiency. Problems and solutions. Proceedings of the XII All-Russian Scientific and Practical Conference]. Ufa, 2012, pp. 173–174.
  29. Usachev A.P. Rezultaty opytov po vyyavleniyu dinamiki rosta perezada davleniya v protsesse zasoreniya filtruyushchego elementa tverdyimi chastitsami [Results of experiments to identify the dynamics of pressure drop growth in the process of filter element clogging with solid particle]. *Problemy i metody obespecheniya nadezhnosti i bezopasnosti sistem transporta nefii, nefiiproduktov i gaza. Materialy mezhdunarodnogo foruma* [Problems and methods of ensuring reliability and safety of oil, oil products and gas transport systems: materials of the international forum]. Ufa, 2012, pp. 358–359.
  30. Gilaev Gen.G., Khabibullin M.Ya., Gilaev G.G. Prospects for the use of acid gel for proppant injection in the process of hydraulic fracturing of carbonate reservoirs in the Samara region. *Oil industry*, 2020, no. 8, pp. 54–57. In Rus. DOI: 10.24887/0028-2448-2020-8-54-57.
  31. Usachev A.P. Improvement of methodological approaches to measuring the pressure drop on cylindrical filter elements of modern gas filters of the mesh type. *Oil and gas business*, 2015, no. 1, vol. 13, pp. 131–136. In Rus.
  32. Shurayts A.L. Analiz sushchestvuyushchey konstruktssii gazovogo filtra predvaritelnoy ochistki s minimalnoy udelnoy teploemkostyu [Analysis of the existing design of a gas pre-treatment filter with a minimum specific metal content]. *Problemy i metody obespecheniya nadezhnosti i bezopasnosti sistem transporta nefii, nefiiproduktov i gaza. Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Problems and methods of ensuring the reliability and safety of oil, oil products and gas transport systems. Materials of scientific-practical. Conference]. Ufa, IPTER Publ. House, 2015, pp. 347–348.
  33. Salin D.V. Predposylki k razrabotke gazovogo filtra predvaritelnoy ochistki s blokom vertikalno raspolozhennykh filtruyushchikh tsilindricheskikh elementov [Prerequisites for the development of a gas pre-filter with a block of vertically arranged filtering cylindrical elements]. *Problemy i metody obespecheniya nadezhnosti i bezopasnosti sistem transporta nefii, nefiiproduktov i gaza. Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Problems and methods of ensuring the reliability and safety of oil, oil products and gas transport systems: materials of scientific-practical. conference]. Ufa, IPTER Publ. House, 2015, pp. 344–346.
  34. Menaa L., Talaiche Z. To a probabilistic approach of reinforced slope stability analysis. *International Journal of Engineering & Technology*, 2013, vol. 5, pp.125–130. DOI: 10.7763/IJET.2013.V5.525.
  35. Toroody A.B., Abaiee M.M., Gholamnia R., Ketabdari M.J. Epistemic-based investigation of the probability of hazard scenarios using Bayesian network for the lifting operation of floating objects. *Journal of Marine Science and Application*, 2016, vol. 15, pp. 250–259. DOI: 10.1007/s11804-016-1361-y.
  36. Khabibullin M.Ya., Suleimanov R.I. Automatic packer reliability prediction under pulsed transient flooding of hydrocarbon reservoirs. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019*, 2019, pp. 012024. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012024
  37. Gustov S.V. Development of methodological provisions to prevent the ingress of large solid particles into the equipment of gas control points. *Oil and Gas Business*, 2012, no. 3, pp. 268–278. In Rus.
  38. Gumerov A.G., Usachev A.P., Shurayts A.L. Mathematical model for optimizing the system of complex protection of underground tanks and pipelines of liquefied hydrocarbon gas by enclosing it in a case filled with nitrogen. *Oil and Gas Business*, 2008, no. 2, vol. 6, pp. 38–46. In Rus.
  39. Fattahi H., Ilghani N.Z. Slope stability analysis using Bayesian Markov Chain Monte Carlo Method. *Geotech. Geol. Eng.*, 2020, vol. 38, pp. 2609–2618. DOI: 10.1007/s10706-019-01172-w.
  40. Khabibullin M.Y. Theoretical grounding and controlling optimal parameters for water flooding tests in field pipelines. *Journal of Physics: Conference Series. International Conference «Information Technologies in Business and Industry»*, 2019, pp. 042013. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/4/042013
  41. Gumerov A.G., Usachev A.P., Shurayts A.L. Opredelenie kapitalnykh vlozheniy v obogrevaemoe pomeshchenie dlya razmeshcheniya filtra [Determination of capital investments in a heated room for filter placement]. *Energoeffektivnost. Problemy i resheniya. Materialy XIV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Energy Efficiency. Problems and solutions. Materials of XIV All-Russian scientific and practical conference]. Ufa, IPTER Publ. House, 2014, pp. 240–242.

42. Kudryashova O.B., Antonnikova A.A. Physico-mathematical model of the evolution of two-phase aerosols under ultrasonic action. *Bulletin of the Tomsk State University. Mathematics and mechanics*, 2012, no. 4 (20), pp. 87–94. In Rus.
43. Khabibullin M.Ya. Improving the process of hydrochloric acid treatment of wells using the latest technologies and equipment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 10, pp. 128–134. DOI: 10.18799/24131830/2020/10/2861. In Rus.
44. Kudryashova O.B., Antonnikova A.A. Mathematical model of the evolution of aerosols under ultrasonic exposure. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 2, pp. 160–163. In Rus.
45. Valentine R.J. An assessment of the factors that contribute to the poor performance of geosynthetic-reinforced earth retaining walls. *Proc. of the International Symposium on Design and Practice of Geosynthetic-Reinforced Soil Structures*. Bologna, Italy, 14–16 October 2013, pp. 318–327.

Received: 27 April 2022.

#### Information about the authors

**Marat Ya. Khabibullin**, Cand. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technological University (Branch in the City of Oktyabrsky).