

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ / CHEMICAL TECHNOLOGY

Оригинальная статья / Original article

УДК 66.074

DOI:10.21285/2227-2925-2017-7-1-161-167

## РЕГЕНЕРАЦИЯ ЩЕЛЕВОЙ ФИЛЬТРУЮЩЕЙ ПЕРЕГОРОДКИ

© Ю.А. Зыкова, Н.М. Самохвалов, В.В. Виноградов

Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
Российская Федерация, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

*Изучены возможности регенерации цилиндрической щелевой фильтрующей перегородки из нескольких слоев металлической проволоки путем ее интенсивной струйной продувки вращающимся и одновременно перемещающимся вдоль нее соплом. Исследовано влияние числа слоев проволоки, межщелевого расстояния, скорости струи, скорости вращения сопла и его расстояния до перегородки на эффективность регенерации. Изучено влияние размера пылевых частиц и их физических свойств на регенерацию щелевой фильтрующей перегородки. Предложена зависимость для расчета гидравлического сопротивления щелевого фильтра непрерывного действия при очистке запыленных газов, учитывающая эффективность регенерации.*

*Ключевые слова:* регенерация, эффективность, щелевой фильтр, гидравлическое сопротивление, фильтрование.

**Формат цитирования:** Зыкова Ю.А., Самохвалов Н.М., Виноградов В.В. Регенерация щелевой фильтрующей перегородки // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2017. Т. 7, N 1. С. 161–167. DOI: 10.21285/2227-2925-2017-7-1-161-167

## REGENERATION SLOTTED FILTER SEPTUM

© Y.A. Zykova, N.M. Samokhvalov, V.V. Vinogradov

Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation.

*The possibility of regeneration of the slotted filter cylindrical wall composed of several layers of metal wire was studied. The nozzle simultaneously rotating and moving along the wall was used thereto. The influence of the number of wire layers, the distance between the slots, the jet velocity, the rotational speed of the nozzle and its distance from the filter septum on the efficiency of regeneration was investigated. The influence of the size and physical properties of the dust particles on the regeneration of the slotted filter septum was explored. A dependency for the calculation of hydraulic resistance of the slotted filter with continuous cleaning of dusty gases, taking into account the efficiency of regeneration was proposed.*

*Keywords:* regeneration efficiency, slotted filter hydraulic resistance, filtration

**For citation:** Zykova Y.A., Samokhvalov N.M., Vinogradov V.V. Regeneration slotted filter septum. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya* [Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology]. 2017, vol. 7, no 1, pp. 161–167. DOI: 10.21285/2227-2925-2017-7-1-161-167 (in Russian)

### ВВЕДЕНИЕ

Надежность и эффективность работы фильтрующих пылеуловителей во многом зависят от способа регенерации фильтрующей перегородки. Используемый способ регенерации, в свою очередь, определяет конструктивное исполнение фильтра и существенно влияет на степень очистки запыленных газов и гидравлическое сопротивление пылеуловителя [1–3].

Сущность регенерации фильтровальных перегородок заключается в периодическом или непрерывном разрушении и частичном или полном удалении осажденной пыли с целью ограничения роста гидравлического сопротивления до определенных пределов и обеспечения заданной производительности фильтра. Удаление осевшей пыли может осуществляться под воздействием аэродинамического (продувка), гидродинамического (промывка), меха-

нического воздействия, и комбинированными методами, которые имеют похожие механизмы разрушения пылевого слоя [4–6].

Практически во всех случаях разрушение идет по когезионным связям, которые обычно слабее адгезионных. Отрыв частиц и агрегатов происходит, в основном, от пылевого слоя и редко от поверхности фильтрующего материала. Основными причинами когезии частиц пыли являются силы межмолекулярного взаимодействия, капиллярные и электрические силы. Капиллярные силы проявляются при наличии влаги [7].

В щелевом фильтре [8] в качестве фильтрующей перегородки используется навитая на жесткий перфорированный цилиндрический каркас металлическая проволока в несколько слоев. При этом для обеспечения необходимой пористости перегородки между витками и слоями проволоки используются специальные прокладки. Регенерация в таком фильтре осуществляется непрерывной обратной струйной продувкой вращающейся и одновременно перемещающейся вдоль перегородки струи сжатого воздуха. Этот способ регенерации требует изучения с точки зрения его работоспособности и влияния на гидравлическое сопротивление. Необходимо также исследовать влияние скорости вращения продувочного сопла, длительности воздействия и скорости струи, размера выходного сечения сопла, свойств пыли на эффективность восстановления фильтрационных свойств пористой перегородки.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для исследований использовался щелевой фильтр, конструкция которого позволяла изменять скорость вращения продувочного сопла, расстояние отверстия продувочного сопла до фильтрующей перегородки, число слоев, размер щелей между слоями и витками проволоки в перегородке. Для проведения экспериментов использовались потоки воздуха, запыленные цементом, дробленым песком, гипохлоритом кальция, мукой, которые обладали различными физико-химическими свойствами (плотностью, адгезионными способностями и др.), размером и дисперсным составом пылевых частиц. Перегородка имела шахматную намотку из проволоки диаметром 0,8 мм с числом слоев от 2 до 6. При регенерации скорость вращения продувочного сопла 0,5 об/с, скорость продувочной струи на выходе из сопла составляла 36 м/с, диаметр продувочного сопла 8 мм, расстояние от сопла до перегородки была в пределах 4–6 мм. Измерения гидравлического сопротивления проводилось при скоростях фильтрования 0,046, 0,077 и 0,110 м/с. Расстояние между витками проволо-

ки  $h_{\text{ш}}$  составляла 50 и 150 мкм, а между слоями  $h_c$  в перегородке 150 и 180 мкм. Запыление перегородки проводилось во всех экспериментах при одной и той же скорости фильтрования  $W_0 = 0,11$  м/с.

Эффективность регенерации  $K_p$  оценивается коэффициентом регенерируемости фильтрующих перегородок, который можно выразить уравнением

$$K_p = (\Delta P - \Delta P_p) / (\Delta P - \Delta P_{\text{ч}}),$$

где  $\Delta P$  – гидравлическое сопротивление в конце цикла фильтрования;  $\Delta P_p$  – гидравлическое сопротивление после регенерации;  $\Delta P_{\text{ч}}$  – гидравлическое сопротивление чистой фильтрующей перегородки.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для выяснения влияния степени запыленности на остаточное сопротивление проведены исследования по регенерации фильтрующей перегородки при различном числе слоев проволоки и различных размерах щелей между витками и слоями проволоки и на различной пыли. Характерные результаты этих исследований представлены в таблице.

Регенерация протекала при одном обороте сопла при скорости его вращения 0,5 об/с. Расстояние сопла от перегородки составляла 6 мм. Изменение этого расстояния от 4 до 18 мм практически не оказало заметного влияния на эффективность регенерации. Увеличение скорости продувочной струи усиливает унос пыли и несколько повышает коэффициент регенерируемости. Так увеличение скорости струи в 1,5 раза с 36 м/с до 54 м/с снизило остаточное гидравлическое сопротивление от 39,2 до 19,6 Па при скорости фильтрования 0,077 м/с, а при скорости 0,110 м/с с 68,7 до 29,4 Па. При этом коэффициент регенерируемости от цементной пыли щелевой перегородки с 4 слоями и размером щелей 150 мкм повысился соответственно с 95,3 до 98,7 % и с 95,4 до 98,9 %.

Влияние скорости вращения сопла сказывается на эффективности регенерации через время воздействия струи на поверхность продувки. С увеличением длительности воздействия струи эффективность регенерации повышается, но это повышение невелико. Например, при увеличении длительности продувки до 2 мин остаточное сопротивление перегородки снизилось в условиях предыдущего примера на 4–6 Па.

Анализ таблицы показывает, что с увеличением скорости фильтрования, уменьшением числа слоев проволоки и с увеличением размера щелей между витками и слоями проволоки

**Результаты регенерации щелевой фильтрующей перегородки**

| Фракция,<br>мкм    | $h_{щ}$ ,<br>мкм | $h_c$ ,<br>мкм | п,<br>шт. | $W_o$ ,<br>м/с | $\Delta P_c$ ,<br>Па | $\Delta P_p$ ,<br>Па | $\Delta P$ ,<br>Па | $K_p$ , % |
|--------------------|------------------|----------------|-----------|----------------|----------------------|----------------------|--------------------|-----------|
| Дробленый песок    |                  |                |           |                |                      |                      |                    |           |
| 80–150             | 50               | 180            | 6         | 0,046          | 329,6                | 494,4                | 370,8              | 75        |
|                    |                  |                |           | 0,077          | 906,4                | 1294,9               | 988,8              | 79        |
|                    |                  |                |           | 0,110          | 1420,5               | 1907,1               | 1520,4             | 80        |
| 40–80              | 50               | 180            | 6         | 0,046          | 463,0                | 518,0                | 478,7              | 71        |
|                    |                  |                |           | 0,077          | 910,4                | 1018,3               | 959,4              | 55        |
|                    |                  |                |           | 0,110          | 1671,6               | 1946,3               | 1758,1             | 69        |
|                    | 150              | 150            | 6         | 0,077          | 14,6                 | 15,7                 | 14,6               | 100       |
|                    |                  |                |           | 0,110          | 22,4                 | 23,6                 | 22,4               | 100       |
|                    |                  |                | 5         | 0,077          | 13,7                 | 17,7                 | 13,7               | 100       |
|                    |                  |                |           | 0,110          | 21,6                 | 25,5                 | 21,6               | 100       |
|                    |                  |                | 4         | 0,077          | 11,8                 | 13,7                 | 11,8               | 100       |
|                    |                  |                |           | 0,110          | 17,7                 | 20,1                 | 17,7               | 100       |
| 0–40               | 150              | 150            | 5         | 0,077          | 13,7                 | 23,5                 | 13,7               | 100       |
|                    |                  |                |           | 0,110          | 21,6                 | 37,3                 | 21,6               | 100       |
|                    |                  |                | 4         | 0,077          | 11,8                 | 18,6                 | 11,8               | 100       |
|                    |                  |                |           | 0,110          | 17,7                 | 28,4                 | 17,7               | 100       |
| Цемент             |                  |                |           |                |                      |                      |                    |           |
| 1–60               | 50               | 180            | 6         | 0,077          | 959,4                | 1232,1               | 1098,7             | 49        |
|                    |                  |                |           | 0,110          | 1710,9               | 2291,6               | 1993,4             | 51        |
|                    | 150              | 150            | 6         | 0,077          | 14,6                 | 353,2                | 27,5               | 96        |
|                    |                  |                |           | 0,110          | 22,4                 | 618,0                | 41,0               | 97        |
|                    |                  |                | 5         | 0,077          | 13,7                 | 208,0                | 23,5               | 95        |
|                    |                  |                |           | 0,110          | 21,6                 | 347,3                | 31,4               | 97        |
|                    |                  |                | 4         | 0,077          | 11,8                 | 270,8                | 19,2               | 97        |
| 0,110              | 17,7             | 476,8          |           | 27,5           | 98                   |                      |                    |           |
| Гипохлорит кальция |                  |                |           |                |                      |                      |                    |           |
| 20–90              | 50               | 180            | 6         | 0,046          | 470,9                | 620,0                | 494,4              | 84        |
|                    |                  |                |           | 0,077          | 941,8                | 1247,8               | 983,0              | 86        |
|                    |                  |                |           | 0,110          | 1679,5               | 2323,0               | 1786,8             | 83        |
| Пшеничная мука     |                  |                |           |                |                      |                      |                    |           |
| 40–80              | 150              | 150            | 4         | 0,077          | 13,1                 | 19,8                 | 13,5               | 94        |
|                    |                  |                |           | 0,110          | 19,6                 | 58,9                 | 21,6               | 95        |

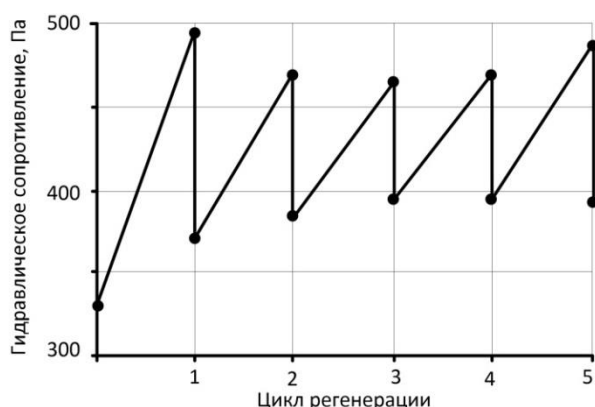
коэффициент регенерируемости повышается. Наиболее существенно регенерация улучшается с уменьшением числа слоев и увеличением размера щелей  $h_{щ}$  и  $h_c$ .

Исследование зависимости гидравлического сопротивления от циклов регенерации показало, что многократность и степень запыления с последующей регенерацией щелевой перегородки приводит к снижению коэффициента регенерируемости по сравнению с однократной продувкой, но через 3–4 цикла остаточное сопротивление стабилизируется. Аналогичные многочисленные кривые получены при исследовании регенерации и на всех исследованных пылях.

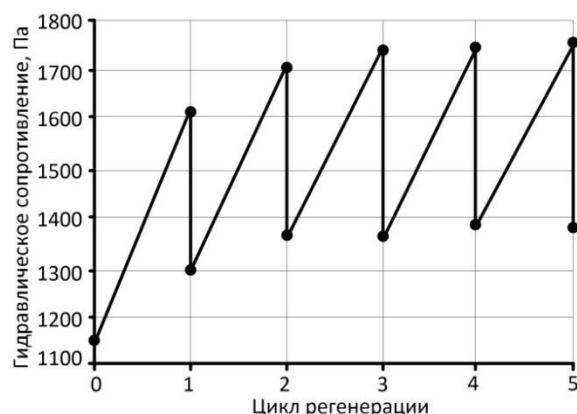
На рис. 1 представлены характерные кривые изменения гидравлического сопротивления от циклов запыления и регенерации. На нем показано изменение сопротивления при

регенерации щелевой перегородки с 6 слоями проволоки, щелями между витками и слоями, соответственно, 50 и 180 мкм от пыли дробленого песка с размерами 80-150 мкм. Наклонные линии отражают прирост сопротивления за счет пылевого осадка, а вертикальные линии процесс регенерации, который длился 2 секунды. На рис. 2 представлены кривые изменения сопротивления щелевой перегородки в результате регенерации (линии 1) и сопротивления при запылении фильтра (линии 2) для условий, представленных на рис. 1.

Характер изменения кривых 2 носит случайный характер, а изменения кривых 1 зависят от эффективности процесса регенерации. После 3–4 циклов запыления и регенерации процесс стабилизируется, на что указывает постоянство значений гидравлического сопротивления фильтрующей перегородки.

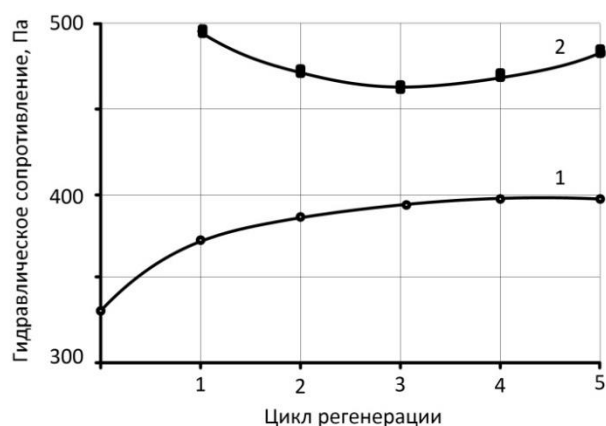


а

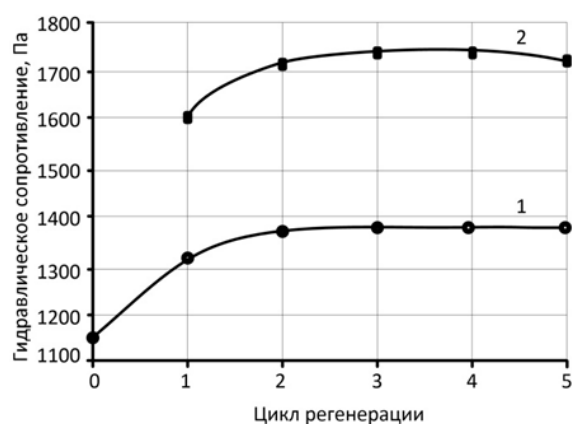


б

**Рис. 1. Изменение гидравлического сопротивления от циклов регенерации при скорости фильтрации:**  
а –  $W_0 = 0,046$  м/с; б –  $W_0 = 0,11$  м/с



а



б

**Рис. 2. Изменение гидравлического сопротивления щелевого фильтра от циклов регенерации при скорости фильтрации:**  
а –  $W_0 = 0,046$  м/с; б –  $W_0 = 0,11$  м/с

При исследовании регенерации щелевого фильтра от цементной пыли при комнатной температуре в условиях повышенной влажности воздуха гидравлическое сопротивление щелевой перегородки после каждого цикла регенерации постоянно повышалось (рис. 3). Это повышение объясняется влиянием капиллярных сил, которые усиливали адгезионное и когезионное сцепление частиц цемента с поверхностью и между собой. Верхняя кривая характеризует изменение общего сопротивления, а нижняя щелевой перегородки при регенерации.

При непрерывной работе щелевого фильтра регенерация должна обеспечивать стабильную и допустимую величину гидравли-

ческого сопротивления. Проверка работы фильтра показала, что непрерывная струйная промывка обеспечивает стабильные и приемлемые показатели его работы. Гидравлическое сопротивление колеблется в некоторых пределах и зависит от коэффициента регенерируемости запыленной щелевой перегородки.

На рис. 4 представлены данные экспериментального исследования изменения гидравлического сопротивления во времени в процессе фильтрации воздуха запыленного пшеничной мукой при постоянной скорости фильтрации 0,11 м/с. Межрегенерационный цикл составлял 2 мин. Фильтр имел 4 слоя проволоки диаметром 0,8 мм, расстояние между щелями проволоки равнялось 150 мкм.

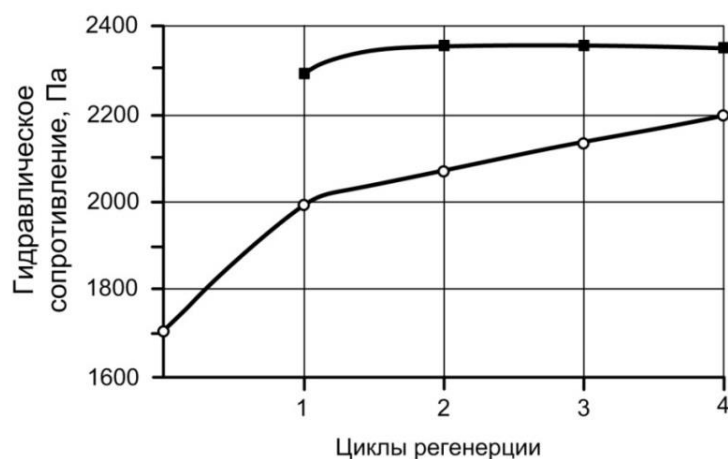


Рис. 3. Изменение сопротивления при регенерации осадка влажного цемента

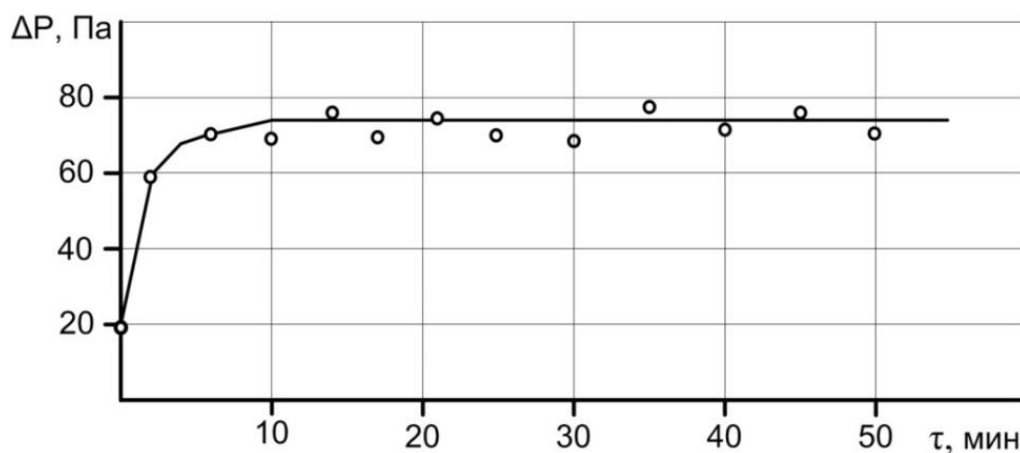


Рис. 4. Сопротивление щелевого фильтра непрерывного действия

Используя результаты проведенных исследований, предложено, для расчета гидравлического сопротивления щелевого фильтра использовать зависимость, учитывающая коэффициент регенерируемости

$$\Delta P = \Delta P_{\text{ч}} + \Delta P_{\text{з}} / K_p,$$

где  $\Delta P_{\text{з}}$  – прирост гидравлического сопротивления от запыления щелевой перегородки.

Коэффициент регенерации  $K_p$  на основе опытных данных рекомендуется принимать для малослипающейся пыли равным 0,9, а для слипающейся 0,8.

Сопротивление чистой фильтрующей перегородки в соответствии с работой [9] рекомендуется определять по зависимости

$$\Delta P_{\text{ч}} = \lambda_c n \times \frac{(1 - \psi_o)}{2} \times \frac{f(1 - \varepsilon_o) \rho_g W_o^2 H}{2\psi_o^3},$$

где  $\lambda_c$  – коэффициент сопротивления;  $n$  – чис-

ло слоев проволоки в перегородке;  $\psi_o$  – живое сечение щелевой перегородки;  $f$  – удельная поверхность фильтрующего слоя;  $\varepsilon_o$  – доля свободного объема перегородки;  $\rho_g$  – плотность газа;  $H$  – толщина фильтрующей перегородки.

Прирост сопротивления возрастает линейно во времени и его можно рассчитать по зависимости, предложенной в работе [10]:

$$\Delta P = k_n \times r_o \times \mu \times Z_{\text{ex}} \times W^2 \times T / (\rho_n \times m^2),$$

где  $k_n$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние дисперсности, шероховатости и отличие пыли от шарообразности;  $r_o$  – удельное сопротивление осадка пыли;  $\mu$  – вязкость газа;  $Z_{\text{ex}}$  – входная запыленность потока;  $W$  – скорость потока в каналах щелевой перегородки;  $T$  – продолжительность межрегенерационного цикла фильтрования;  $\rho_n$  – плотность пыли;  $m$  – пористость пыли.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что используемая для регенерации в щелевом фильтре при очистке запыленных газов непрерывная струйная интенсивная продувка фильтрующей перегородки от осевшей пыли достаточно эффективна. Она

позволяет обеспечить высокую эффективность регенерации и стабильное во времени гидравлическое сопротивление. Разработана методика расчета гидравлического сопротивления щелевого фильтра непрерывного действия.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Trevor S., George C. *Filters and Filtration Handbook*. (Sixth Edition). Philadelphia: Elsevier Ltd, 2015. 444 p.
2. Coulson J.M., Richardson J.F. *Chemical engineering*. V. 2.: Particle Technology and Separation Processes. Oxford.: Butterworth-Heinemann, 2002. 1183 p.
3. Пат. 2378494 Российская Федерация, МПК E21B43/08. Щелевой фильтр с проволочным фильтрующим элементом / Э.Ф. Соловьев, С.Е. Варламов; заявители и патентообладатели Э.Ф. Соловьев, С.Е. Варламов. N 2008116934/03; заявл. 28.04.2008; опубл. 10.01.2010, Бюл. N 1. 2 с.
4. Самохвалов Н.М. Регенерация фильтровальных насыпных слоев // Ползуновский вестник. 2006. N 2–1. С. 389–391.
5. Haixia Li, Joohong Choi, Bin Li, Ire Kim, Jungwon Heo Numerical analysis on the gas flow dynamics from a rectangular slot-nozzle for pulsecleaning of filter unit // Powder Technology. 2016. Vol. 297, N 9. P. 330–339.
6. Пат. N 2456054, Российская Федерация, МПК B01D29/44 B01D29/62. Регенерируемый щелевой фильтр / Ю.В. Данченко, Е.А. Закреп-ская А.Л., Каплан и др.; заявитель и патентообладатель Новомет-Пермь. N 2011103572/05; заявл. 01.02.2011; опубл. 20.07.2012 Бюл. N 20. 2 с.
7. Окладников В.П., Дошлов О.И., Коновалов Н.П. Адгезия и адгезивы. Теория адгезии, свойства и характеристики органических адгезивов, их модификация: монография. В 2-х т.: Т. 1. Иркутск, 1998. 273 с.
8. Пат. N 156669, Российская Федерация, МПК B01D46/40. Фильтр для очистки газа от пыли Н.М. Самохвалов, В.В. Виноградов, Ю.А. Зыкова; заявитель и патентообладатель «ИР-НИТУ». N 2015111410/05; заявл. 30.03.2015; опубл. 10.11.2015, Бюл. N 31. 2с.
9. Виноградов В.В., Зыкова Ю.А., Самохвалов Н.М. Влияние структуры щелевого фильтра на гидравлическое сопротивление // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2015. N 4. С. 3–10.
10. Зыкова Ю.А., Самохвалов Н.М., Виноградов В.В. Сопротивление пылевого осадка в щелевом фильтре // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327, N 4. С. 88–96.

## REFERENCES

1. Trevor S., George C. *Filters and Filtration Handbook* (Sixth Edition). Philadelphia, Elsevier Ltd. Publ., 2015, 444 p.
2. Coulson J.M., Richardson J.F. *Chemical engineering*. Vol. 2. Particle Technology and Separation Processes. Oxford, Butterworth-Heinemann Publ., 2002, 1183 p.
3. Solov'ev E.F. [et al.] *Shchelevoi fil'tr s provolochnym fil'truyushchim elementom* [Slit filter with wire filter element]. Patent RF, no. 2378494, 2010.
4. Samokhvalov N.M. Regeneration of bulk filter layers. *Polzunovskii Vestnik* [Polzunovsky vestnik]. 2006, no. 2–1, pp. 389–391. (in Russian)
5. Haixia Li, Joohong Choi, Bin Li, Ire Kim, Jungwon Heo Numerical analysis on the gas flow dynamics from a rectangular slot-nozzle for pulse-cleaning of filter unit. *Powder Technology*. 2016, vol. 297, no. 9, pp. 330–339.
6. Danchenko Yu. V. [et al.] *Regeneriruemyy shchelevoi fil'tr* [Regenerable filter slit]. Patent RF, no. 2456054, 2012.
7. Okladnikov V.P., Doshlov O.I., Kononov N.P. *Adgeziya i adgezivy. Teoriya adgezii, svoistva i kharakteristiki organicheskikh adgezivov, ikh modifikatsiya* [Adhesion and Adhesives. adhesion theory, the properties and characteristics of organic adhesives, their modification]. Vol. 1, Irkutsk, 1998, 273 p.
8. Samokhvalov N.M. [et al.] *Fil'tr dlya ochistki gaza ot pyli* [Filter for cleaning gas from dust]. Patent RF, no. 156669, 2015.
9. Vinogradov V.V., Zykova Yu.A., Samokhvalov N.M. Effect of the slot filter structure on the hydraulic resistance. *Fluid Dynamics*. 2015, vol. 50, no. 4, pp. 463–470.
10. Zykova Yu.A., Samokhvalov N.M., Vinogradov V.V. Resistance to dust sediment filter in the slot. *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University]. 2016, vol. 327, no. 4, pp. 88–96. (in Russian).

***Критерии авторства***

Зыкова Ю.А., Самохвалов Н.М., Виноградов В.В. выполнили экспериментальную работу, на основании полученных результатов провели обобщение и написали рукопись. Зыкова Ю.А., Самохвалов Н.М., Виноградов В.В. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

***Конфликт интересов***

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

***Принадлежность к организации***

**Юлия А. Зыкова**

Иркутский национальный исследовательский технический университет  
Российская Федерация, 664074, г. Иркутск,  
ул. Лермонтова, 83,  
старший преподаватель,  
ulya2279@mail.ru.

**Николай М. Самохвалов**

Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
Российская Федерация, 664074, г. Иркутск,  
ул. Лермонтова, 83,  
к.т.н., профессор,  
htnv@istu.edu.

**Владимир В. Виноградов**

Иркутский национальный исследовательский технический университет  
Российская Федерация, 664074, г. Иркутск,  
ул. Лермонтова, 83,  
аспирант,  
vvv158@mail.ru.

***Поступила 26.10.2016***

***Contribution***

Zykova Y.A., Samokhvalov N.M., Vinogradov V.V. out the experimental work, on the basis of the results summarized the material and wrote the manuscript. Zykova Y.A., Samokhvalov N.M., Vinogradov V.V. have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

***Conflict of interest***

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

**AUTHORS' INDEX**

***Affiliations***

**Yulia. A. Zykova**

Irkutsk National Research Technical University  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation  
Senior Teacher  
ulya2279@mail.ru.

**Nikolay M. Samokhvalov**

Irkutsk National Research Technical University  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation  
Ph.D. (Engineering), Professor  
htnv@istu.edu

**Vladimir V. Vinogradov**

Irkutsk National Research Technical University  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation  
Postgraduate Student  
vvv158@mail.ru.

***Received 26.10.2016***