

Улавливание аэрозольных частиц фильтрами из пористых сетчатых металлов

В.С. Спиридонов, доцент, канд. техн. наук¹

В.А. Девисилов, доцент, канд. техн. наук¹

А.Е. Крыловский, инженер²

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана

²ООО "Техновакуум", г. Москва

e-mail: spir-vs0346@yandex.ru, devisil@mail.ru

Ключевые слова:

аэрозольные частицы, фильтр, металлическая сетка, пористый сетчатый материал, эффективность очистки.

Приведены результаты экспериментальных исследований эффективности улавливания аэрозольных частиц из потока запыленного воздуха фильтровальными перегородками из пористых сетчатых материалов, изготовленных горячей прокаткой в вакууме многослойных пакетов проволочных сеток. Установлено, что улавливание аэрозольных частиц в этих материалах осуществляется за счет механизмов инерционного захвата и касания. Получена зависимость фракционного коэффициента проскока частиц от числа слоев сетки в пакете и пористости материала. На основе обработки результатов экспериментов получена аналитическая зависимость фракционного коэффициента проскока от пористости материала и числа Стокса. Результаты проведенных исследований позволяют соответствующим подбором номера сетки, числа слоев сеток в пакете и степени его обжатия при прокатке получать фильтровальный материал с заданными эксплуатационными характеристиками.

1. Введение в проблему

Рост промышленного производства неизбежно ведет к увеличению объема вредных выбросов в атмосферу нашей планеты. Существенная доля этих выбросов приходится на аэрозольные частицы различного происхождения [1]. Для защиты атмосферы от аэрозольных загрязнений широко используют фильтровальные аппараты с пористыми проницаемыми перегородками различных типов. Выбор материала перегородки определяется условиями эксплуатации фильтра. Так, в системах очистки высокотемпературных газов в ряде случаев [2] применяют фильтровальные перегородки из пористых порошковых металлов. Существенным недостатком таких материалов является их низкая технологичность при изготовлении фильтровальных перегородок сложной конфигурации. Более высокими технологическими и прочностными характеристиками, по сравнению с порошковыми металлами, обладают пористые сетчатые материалы (ПСМ), изготавлива-

емые горячей прокаткой в вакууме многослойных пакетов металлических тканых сеток из хромоникелевых сталей [3, 4, 5]. Варьирование типом переплетения и толщиной проволок в сетке, количеством слоев сеток в пакете и степенью его обжатия при прокатке позволяет получать разнообразные пористые проницаемые материалы с высокими механическими и технологическими характеристиками.

2. Состояние вопроса

Как известно [6], для очистки от аэрозольных частиц потоков газов обычно используют аппараты с фильтровальными перегородками из высокопористых волокнистых материалов различных типов. Улавливание аэрозольных частиц в таких перегородках осуществляется главным образом за счет механизмов аэродинамического захвата: инерционного столкновения, диффузии и перехвата (касания) [7]. Высокая эффективность очистки газов достигается путем соответствующего подбора диаметра воло-

на D , толщины фильтровального слоя H и скорости фильтрации w газа перед перегородкой. Установлено [8], что в пористых материалах из ультратонких волокон диаметром менее 3 мкм (ткани Петрянова, НЕРА фильтры) аэрозольные частицы улавливаются за счет действия всех трех механизмов аэродинамического захвата, а в материалах из грубых волокон диаметром более 10 мкм, к которым следует отнести и проволочные сетки, — только за счет инерционного столкновения и перехвата.

Исследования, выполненные на модели в виде цилиндра бесконечной длины, установленного перпендикулярно потоку запыленного газа, показали [9], что процесс аэродинамического захвата зависит от распределения скоростей потока вблизи поверхности цилиндра, определяемого безразмерным числом Рейнольдса

$$Re_c = \frac{wD\rho}{\mu}, \quad (1)$$

где: w — скорость набегающего потока газа; D — диаметр цилиндра; ρ и μ — соответственно плотность и динамическая вязкость газа.

На основе результатов этих исследований получен ряд аналитических зависимостей, позволяющих оценить эффективность аэродинамического захвата для различных режимов обтекания газовым потоком изолированного цилиндра. Установлено, что при значении числа Рейнольдса $Re_c = 10$ эффективность улавливания аэрозольных частиц изолированным цилиндром из слоя газа толщиной $H = D$ только за счет инерционного механизма можно рассчитать по формуле

$$\eta_i = \frac{Stk^3}{Stk^3 + 0,77Stk^2 + 0,22}, \quad (2)$$

где: $Stk = d^2\rho_q w C' / (18\mu D)$ — безразмерный критерий Стокса; d — размер частиц; ρ_q — плотность вещества частиц; C' — поправочный коэффициент (коэффициент Каннингхема-Милликена) на скольжение в газе частиц малого.

Величина коэффициента C' зависит от размера аэрозольных частиц d и для ее вычисления используется эмпирическое соотношение

$$C' = 1 + Kn \left[1,252 + 0,399 \exp\left(-\frac{1,1}{Kn}\right) \right], \quad (3)$$

где: $Kn = 2\lambda/d$ — критерий Кнудсена;

$\lambda = \mu / (0,499\rho w)$ — длина свободного пробега молекул газа;

$w' = (8RT/\pi M)^{0,5}$ — среднеарифметическая скорость молекул газа;

R — универсальная газовая постоянная; T и M — соответственно температура и молярная масса газа.

В ряде случаев для оценки эффективности улавливания аэрозольных частиц используют величину коэффициента проскока K , связанного с эффективностью улавливания η соотношением

$$K = 1 - \eta. \quad (4)$$

Для оценки эффективности перехвата аэрозольных частиц изолированным цилиндром при $Re_c < 7$ предложена зависимость

$$\eta_R = \frac{1}{2,002 - \ln Re_c} \left[(1+R)\ln(1+R) - \frac{R(2+R)}{2(1+R)} \right], \quad (5)$$

где $R = d/D$ — параметр перехвата.

Учитывая, что улавливание аэрозольных частиц происходит при одновременном действии механизмов инерционного столкновения и перехвата, их совместную эффективность можно определить по формуле

$$\eta_{IR} = 1 - (1 - \eta_i)(1 - \eta_R). \quad (6)$$

Для значения $Re_c = 0,2$, наиболее характерного для режима течения в пористых перегородках, суммарную эффективность инерционного столкновения и перехвата можно рассчитать с помощью формулы

$$\eta_{IR} = 0,16 \left[R + (0,5 + 0,8R)Stk - 0,1052Stk^2 \right]. \quad (7)$$

Результаты модельных исследований на изолированном цилиндре могут быть перенесены на реальные фильтровальные материалы с учетом роста скорости потока в пористой среде и взаимного влияния волокон на поле скоростей газа вблизи их поверхности. При описании внутренней структуры пористых материалов используют величины пористости Π (доля пустот в общем объеме материала) и относительной плотности α (доля объема материала, занятого волокнами), связанных между собой соотношением $\Pi = 1 - \alpha$. Установлено, что для пористых материалов с относительной плотностью $\alpha < 0,1$ взаимное влияние волокон на эффективность улавливания аэрозольных частиц может быть выражено зависимостью

$$\eta_\alpha = \eta_{IR} (1 + 4,5\alpha), \quad (8)$$

где η_α — эффективность волокна в слое фильтровального материала с относительной плотностью α .

Суммарную эффективность улавливания аэрозольных частиц всеми волокнами фильтровального слоя толщиной H и относительной плотностью α рассчитывают по формуле

$$\eta = 1 - \exp\left[\frac{4H}{\pi D} \left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right) \eta_\alpha\right]. \quad (9)$$

Как известно из [3], величина пористости Π проволочных тканых сеток и ПСМ, получаемых на их основе, не превышает 0,70, поэтому применение вышеуказанных зависимостей для расчета фильтровальных характеристик этих материалов при очистке запыленных газов не представляется возможным. В связи с этим мы провели комплекс экспериментальных исследований эффективности улавливания аэрозольных частиц пористыми перегородками из ПСМ при фильтровании запыленного воздуха.

3. Методика исследований

Экспериментальные исследования проведены на образцах ПСМ, структурные характеристики которых приведены в таблице.

Поскольку фильтровые тканые сетки изготавливают путем переплетения проволок основы и утка, имеющих разную толщину, при вычислении безразмерных чисел Стокса Stk и Рейнольдса Re_c в качестве определяющего размера использован средний объемно-поверхностный диаметр проволок D_x [10], вычисляемый по формуле

$$D_x = D_y \cdot \frac{1 + (N_o l / N_y F)(D_o / D_y)^2}{1 + (N_o D_o l / N_y D_y F)}, \quad (10)$$

Таблица

Структурные характеристики образцов ПСМ

Номер сетки	Характерный диаметр D_x , мм	Пористость	Количество слоев сетки в пакете N_{cl}	Толщина образца h , мм
С120	0,171	0,176	4	1,49
		0,351		1,97
С200	0,148	0,102	10	3,20
		0,164		3,43
		0,305		4,33
С685	0,037	0,100	10	0,85
		0,154		0,91
		0,229		1,01
		0,263	1,06	7
		0,200	0,68	
			1,36	
		20	1,94	

где: $F = [(1 + \cos\varphi)l/N_o + (D_o + D_y)\varphi](N_o/2)$ — длина проволок утка в элементе сетки размером $l \times l$; $\varphi = \arcsin[(D_o + D_y)N_o/l]$ — угол обхвата основы утком; D_o и D_y — соответственно толщина проволок основы и утка; N_o и N_y — соответственно плотность укладки проволок основы и утка на базовой длине l .

При проведении исследований движение воздуха через фильтровальную перегородку обеспечивалось за счет перепада давления Δp , создаваемого мембранным компрессором, а количество аэрозольных частиц в потоке воздуха до и после фильтровальной перегородки определялось с помощью счетчика аэрозольных частиц АЗ-5. Для оценки эффективности улавливания аэрозольных частиц различного размера в перегородке использована величина фракционного коэффициента проскока K_i , вычисляемая в виде отношения

$$K_i = n_{2i} / n_{1i},$$

где n_{1i} и n_{2i} — соответственно количество частиц i -й фракции до и после перегородки.

Общая эффективность улавливания аэрозольных частиц η в пористой перегородке связана с величиной фракционного коэффициента проскока K_i формулой

$$\eta = 1 - \sum_i K_i,$$

где i — число фракций аэрозольных частиц.

При проведении экспериментов определялась зависимость величины K_i от скорости потока запыленного воздуха, от количества слоев N сеток в пакете, от числа Стокса Stk и от пористости Π материала. В связи с тем, что процесс аэродинамического захвата аэрозольных частиц поверхностью проволоки определяется скоростью потока вблизи волокна, в качестве определяющей скорости при вычислении чисел Re_c и Stk использована среднеобъемная скорость газа в порах w_n , связанная со скоростью фильтрации w (скоростью набегающего на фильтровальную перегородку потока газа) соотношением $w_n = w/\Pi$. При проведении исследований скорость потока в порах w_n изменялась в диапазоне 0,2–2,2 м/с, а число Рейнольдса Re_c — в диапазоне 0,56–26,1.

4. Обсуждение результатов

Результаты экспериментов показали (рис. 1), что при возрастании скорости w_n потока воздуха в указанном диапазоне коэффициент проскока частиц с размерами выше 0,4 мкм уменьшается. Такой характер зависимости $K = f(w_n)$ указывает на преобладаю-

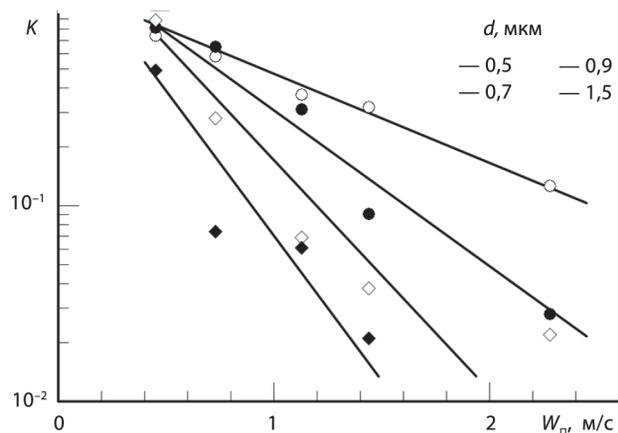


Рис. 1. Зависимость фракционного коэффициента проскока K от размера d частиц и среднеобъемной скорости $W_{пр}$ потока для ПСМ из сетки С120 пористостью $\Pi = 0,351$

щую роль инерционных сил в механизме осаждения аэрозольных частиц на поверхности поровых каналов.

Согласно результатам экспериментальных исследований, проведенных методом микрофотографий [11], ПСМ из фильтровых сеток сохраняют слоистую структуру в широком диапазоне изменения степени обжатия

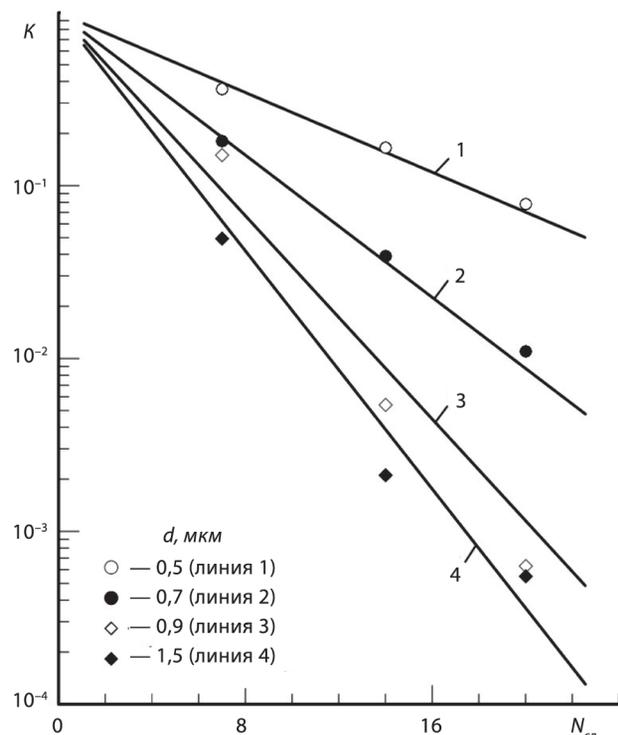


Рис. 2. Зависимость фракционного коэффициента проскока K от размера d частиц и числа $N_{сл}$ слоев сетки в пакете для ПСМ из сетки С685 пористостью $\Pi = 0,2$ при $W_{пр} = 0,325$ м/с

пакета сеток, что позволяет рассматривать их в виде системы однослойных фильтровальных материалов, расположенных последовательно один за другим. Величина фракционного коэффициента проскока K частиц через такие системы зависит от числа элементов (слоев сеток) $N_{сл}$ и определяется соотношением

$$K = K_1^{N_{сл}}, \quad (11)$$

где K_1 — коэффициент проскока частиц через один слой сетки.

Сопоставление результатов расчета по формуле (11) с экспериментальными данными (рис. 2) показало их удовлетворительное согласование.

Как известно [5], проволочные сетки, использованные для изготовления образцов ПСМ, геометрически подобны и различаются только характерным диаметром проволоки D_x (см. таблицу). Поэтому для устранения влияния масштаба на результаты проведенных исследований экспериментальные данные были обработаны в виде безразмерной зависимости $K_1 = f(Stk)$ для всех исследованных образцов ПСМ (рис. 3).

Как видно из рис. 3, изменение пористости ПСМ ведет к существенной трансформации зависимости $K_1 = f(Stk)$, обусловленной изменением внутренней структуры материала в процессе его деформации при прокатке [12]. Математическая обработка экспериментальных данных, представленных на рис. 3, позволила получить универсальную аналитическую зависимость для расче-

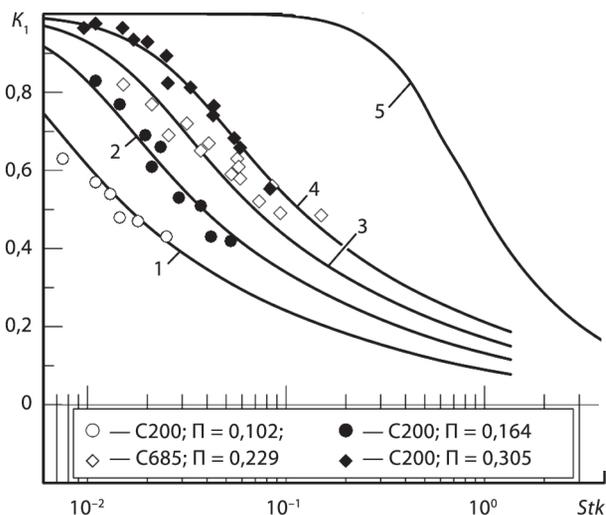


Рис. 3. Зависимость фракционного коэффициента проскока K_1 через один слой ПСМ от пористости Π и числа Stk . Линии — расчет по формуле (12) для ПСМ: 1 — С200, $\Pi = 0,102$; 2 — С200, $\Pi = 0,164$; 3 — С685, $\Pi = 0,229$; 4 — С200, $\Pi = 0,305$. Линия 5 — расчет по формулам (2) и (4)

та коэффициента проскока аэрозольных частиц через один слой ПСМ с различной пористостью

$$K_1 = \frac{0,77Stk^{1,5}\Pi^{0,9} + 0,22\Pi^{3,6}}{Stk^2 + 0,77Stk^{1,5}\Pi^{0,9} + 0,22\Pi^{3,6}}. \quad (12)$$

Формула (12) совместно с формулами (11) и (4) позволяет определять эффективность улавливания η аэрозольных частиц фильтровальными перегородками из ПСМ с различной пористостью Π и различным числом $N_{сл}$ слоев в пакете любых фильтровых саржевых односторонних сеток.

Литература

1. Тимонин А.С. Инженерно-экологический справочник. Т. 1. — Калуга: Издательство Н. Бочкаревой, 2003. — 917 с.
2. Жуланов Ю.В. Исследование фильтрации аэрозолей металлокерамическими фильтрами / Ю.В. Жуланов, Ю.В. Красовицкий // Коллоидный журнал. 1981. Т. 43. — С. 246–250.
3. Пористые проницаемые материалы: справ. изд. / С.В. Белов [и др.]; Под общ. ред. Белова С.В. — М.: Металлургия, 1987. — 335 с.
4. Спиридонов В.С. Фильтровальные перегородки из спеченных металлических сеток для встроенных фильтров авиационных гидросистем / В.С. Спиридонов, Ю.М. Новиков, В.А. Большаков // Безопасность в техносфере. 2015. № 4. — С. 39–45.
5. Девисилов В.А. Металлические проволочные сетки для фильтрования жидкостей и газов. Часть 1. Структурные характеристики и их расчет / В.А. Девисилов, В.С. Спиридонов // Безопасность в техносфере. 2009. № 3. — С. 46–55.
6. Юров Ю.Л., Девисилов В.А., Басманов П.И. Высокоэффективные аэрозольные фильтры на основе волокни-

5. Заключение

Результаты проведенных исследований показали высокую эффективность улавливания аэрозольных частиц субмикронного размера пористыми сетчатыми материалами из потоков запыленного газа. Это позволяет их использовать в качестве фильтровальных перегородок в системах очистки высокотемпературных и компримированных газов, где применение высокопористых волокнистых материалов, изготавливаемых на основе полимерных волокон, не представляется возможным.

7. стых материалов ФП. — Краснодар: Изд-во КубГТУ, 2004. — 64 с.
7. Brown R.C. Aerosol Filtration. Oxford: Pergamon Press, 1993. — 269 p.
8. Кириш А.А. Фильтрация аэрозолей волокнистыми материалами ФП / А.А. Кириш, А.К. Будыка, В.А. Кириш // Российский химический журнал. 2008. Т. LII, № 5, С. 97–102.
9. Страус В. Промышленная очистка газов: Пер. с англ. — М.: Химия, 1981. — 616 с.
10. Защита атмосферы от промышленных загрязнений: справ. изд.: В 2-х ч. Ч.1; Под ред. Калверта С., Инглунда Г.М. — М.: Металлургия, 1988. — 760 с.
11. Белов С.В. Распределение просвета по толщине фильтровых сеток / С.В. Белов, В.С. Спиридонов // Порошковая металлургия. 1982. № 3. — С. 68–72.
12. Белов С.В. Гидравлические характеристики пористых сетчатых металлов на ламинарном режиме фильтрации / С.В. Белов, Г.П. Павлихин, В.С. Спиридонов // Порошковая металлургия. 1979. № 5. С. 64–66.

References

1. Timonin A.S. *Inzhenerno-ekologicheskiy spravochnik. T. 1* [Engineering-ecological reference book. V. 1]. Kaluga, Bochkareva Publ., 2003. 917 p. (in Russian)
2. Zhulanov Yu.V. Issledovanie fil'tratsii aerorozley metallokeramicheskimi fil'trami [A study of the filtration of aerosols of metal-ceramic filters]. *Kolloidnyy zhurnal* [Kolloid journal]. 1981, V. 43, p. 246–250. (in Russian)
3. Belov S.V. *Poristye pronitsaemye materialy* [Porous permeable materials]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987. 335 p. (in Russian)
4. Spiridonov V., Novikov Y., Bolshakov V. Fil'troval'nye peregorodki iz spechennykh metallicheskiykh setok dlya vstroennykh fil'trov aviatsionnykh gidrosistem [Filtering Walls Made of Sintered Metal Gauzes for Built-in Filters of Aviation Hydraulic Systems]. *Bezopasnost' v tekhnosfere*

- [Safety in technosphere]. 2015, V. 4, I. 4, pp. 39–45. DOI: 10.12737/14433. (in Russian)
5. Devisilov V.A., Spiridonov V.S. Metallicheskie provolochnye setki dlya fil'trovaniya zhidkostey i gazov. Chast' 1. Strukturnye kharakteristiki i ikh raschet [Metal Wire Grids for Filtering Liquids and Gases Part 1. Structural Characteristics and their Calculation]. *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in technosphere]. 2009, I. 3, pp. 46–55. (in Russian)
6. Yurov Yu.L., Devisilov V.A., Basmanov P.I. *Vysokoeffektivnyye aerazol'nyye fil'try na osnove voloknistykh materialov FP* [High-performance aerosol filters based on fiber materials FP]. Krasnodar, KubGTU Publ., 2004. 64 p. (in Russian)
7. Brown R.C. Aerosol Filtration. Oxford, Pergamon Press Publ., 1993. 269 p.

8. Kirsh A.A. Fil'tratsiya aerorozley voloknistymi materialami FP [Filtration of aerosols with fiber materials FP]. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal* [Russian chemical journal]. 2008, V. LII, I. 5, pp. 97–102. (in Russian)
9. Straus V. *Promyshlennaya ochistka gazov* [Industrial treatment of gases]. Moscow, Chemistry, 1981. 616 p. (in Russian)
10. Calvert S.V. *Zashchita atmosfery ot promyshlennykh zagryazneniy* [Atmosphere protection from industrial pollution]. Moscow, Metallurgy Publ., 1988. 760 p. (in Russian)
11. Belov S.V. Raspreделение prosveta po tolshchine fil'trovyykh setok [The Distribution of Clearance for the Thickness of the Filter Mesh]. *Poroshkovaya metallurgiya* [Powder metallurgy]. 1982, I. 3, pp. 68–72. (in Russian)
12. Belov S.V. [Hydraulic characteristics of porous mesh metals on a laminar filtering mode]. *Poroshkovaya metallurgiya* [Powder metallurgy]. 1979, I. 5, pp. 64–66. (in Russian)

Aerosol Particles Capture by Filters Made of Porous Mesh Metals

V.S. Spiridonov, Ph.D. of Engineering, Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University

V.A. Devisilov, Ph.D. of Engineering, Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University

A.E. Krylovskiy, Engineer, Technovakuum, Ltd

Results of experimental investigations related to filtration efficiency of aerosol particles from a dusty air flow by filtering baffles made of porous mesh materials by multiply packages of wire meshes hot rolling in vacuum have been represented. It has been found that capture of aerosol particles in these materials is mainly carried out by mechanisms of inertial capture and contact. The functional connection for particles' fractional breakthrough coefficient from number of mesh layers in the package and its material porosity has been obtained. The analytical relation between fractional breakthrough coefficient and material porosity and Stokes number has been obtained based on experimental data processing. These studies results allow by appropriate selection of mesh number, quantity of meshes layers in the package and the package compression degree during rolling obtain a filter material with desired performance characteristics.

Keywords: aerosol particles, filter, metal mesh, porous mesh material, cleaning efficiency..

Создан Фонд поддержки научных исследований в области промышленной безопасности имени Якова Брюса (Фонд Якова Брюса)

Президент Фонда — Сидоров В.И., директор — Печеркин А.С.

Основной уставной целью Фонда является формирование имущества на основе добровольных взносов, пожертвований и иных не запрещенных законом поступлений и использование его для поддержки научных исследований в области промышленной безопасности.

Основным видом деятельности Фонда является проведение и поддержка научных исследований и разработок в области естественных и технических наук в сферах декларирования промышленной безопасности, экспертизы промышленной безопасности, обоснования безопасности, анализа риска и расследования аварий, технического аудита, производственного контроля и систем

управления промышленной безопасностью на опасных производственных объектах.

Предусмотрены проведение и поддержка научных исследований и разработок общественных и гуманитарных наук в сферах разработки требований промышленной безопасности в проектах законов, нормативных правовых актов, технических регламентов, а также руководств по безопасности, методик и других методических документов; деятельность по созданию баз данных и информационных ресурсов; проведение форумов, конгрессов, симпозиумов, конференций, семинаров, совещаний, выставок и других мероприятий; издание книг, брошюр, журналов и периодических публикаций; разработка программного обеспечения и другое.

Новости нормативного регулирования охраны труда

Приказом Минтруда России от 02.11.2015 № 835н утверждены Правила по охране труда в лесозаготовительном, деревообрабатывающем производствах и при проведении лесохозяйственных работ. Приказ зарегистрирован Минюстом России 09.02.2016, рег. № 41009, официально опубликован на официальном интернет-портале правовой информации (www.pravo.gov.ru) 12.02.2016, № опубли. 0001201602120002, и вступит в силу 13.05.2016.

Приказом Минтруда России от 16.11.2015 № 873н утверждены Правила по охране труда при хранении,

транспортировании и реализации нефтепродуктов и признано утратившим силу постановление Минтруда России от 06.05.2002 № 33, утвердившее Межотраслевые правила по охране труда при эксплуатации нефтебаз, складов ГСМ, стационарных и передвижных автозаправочных станций. Приказ зарегистрирован Минюстом России 28.01.2016, рег. № 40876, официально опубликован на официальном интернет-портале правовой информации (www.pravo.gov.ru) 03.02.2016, № опубли. 0001201602030003, и вступит в силу 04.05.2016.