



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-03-235>

УДК 622.807:613.62:614.8.084



Определение запыленности рабочего места оператора дробильно-щебеночного завода в целях специальной оценки условий труда

Е. А. Король¹  , Е. Н. Дегаев¹  , Д. С. Конюхов^{2,3}   

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация

² АО «Мосинжпроект», г. Москва, Российская Федерация

³ МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Российская Федерация

 gidrotehnik@inbox.ru

Аннотация

Горнодобывающая отрасль является одним из ключевых секторов экономики России, обеспечивая другие отрасли необходимым сырьем и материалами. Однако эта отрасль характеризуется тяжёлыми условиями труда, которые могут негативно сказаться на здоровье работников. Воздействие вредных веществ и значительные физические нагрузки способствуют развитию профессиональных болезней. Для обеспечения безопасности производственных процессов и сохранения здоровья работников горнодобывающей отрасли необходимо проведение специальной оценки условий труда. Эта оценка позволяет определить уровень вредности и опасности на рабочих местах, а также разработать меры по снижению негативного воздействия на здоровье работников. Целью работы является определение запыленности рабочего места оператора дробильно-щебеночного завода в рамках специальной оценки условий труда. Определение концентрации пыли в воздухе рабочего места оператора дробильно-щебеночного завода производили в соответствии со стандартной весовой методикой. Испытания проводились в четыре этапа и длились 400 мин, что составляет 83% от общего времени рабочей смены. По результатам обработки данных выявлено превышение предельно допустимой концентрации пыли в 1,28 раза. Установлен класс (подкласс) условий труда – 3.1. Установлено, что средние концентрации пыли на разных этапах испытания различаются в 3–4 раза, что связано с интенсивностью и направлением ветра на производственной площадке. По полученным данным спрогнозированы концентрации пыли на рабочем месте в зависимости от скорости ветра на производственной площадке с величиной достоверности аппроксимации $R^2 = 0,95$. Установлено, что максимально допустимая скорость ветра на производственной площадке не должна быть выше 2,6 м/с. С помощью аппроксимированных данных спрогнозировано, что при отсутствии ветра на производственной площадке концентрация пыли в воздухе рабочего места оператора сохранится на уровне 0,5 мг/м³. Для снижения запыленности рабочего места оператора необходимы комплексные мероприятия по сокращению пылеобразования на дробильно-сортировочном заводе, включающие мойку колес автомобильного транспорта, установку систем подавления пыли и замену открытого ленточного конвейера на закрытый. Для предотвращения развития профессиональных заболеваний операторам рекомендуется использовать средства индивидуальной защиты органов дыхания, кожи и глаз на протяжении всей смены.

Ключевые слова

производство, щебень, дробильно-щебеночный завод, пыль, концентрация, выбросы, запыленность, пылеобразование, оператор, условия труда, вред, прогнозирование, защита

Для цитирования

Korol E.A., Degaev E.N., Konyukhov D.S. Assessing dust concentration at the workplace of a crushing and screening plant operator for special labor conditions evaluation. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(4):395–405. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-03-235>



SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Research paper

Assessing dust concentration at the workplace of a crushing and screening plant operator for special labor conditions evaluationE. A. Korol¹  , E. N. Degaev¹  , D. S. Konyukhov^{2,3}   ¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation² Mosinzhproekt JSC, Moscow, Russian Federation³ MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation gidrotehnik@inbox.ru**Abstract**

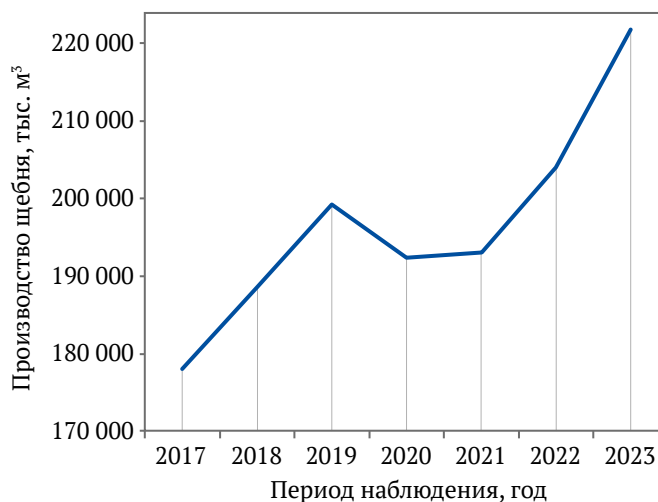
The mining industry is one of the key sectors of the Russian economy, supplying other industries with essential raw materials. However, this sector is characterized by harsh working conditions that may adversely affect workers' health. Exposure to harmful substances and significant physical workloads contribute to the development of occupational diseases. To ensure safety in production processes and protect the health of mining industry workers, it is necessary to conduct a special labor conditions assessment. This assessment allows for determining the level of harmfulness and hazard in workplaces, as well as developing measures to reduce the negative impact on workers' health. The purpose of this study is to assess dust concentration at the workplace of a crushing and screening plant operator as part of a special labor conditions evaluation. Dust concentration at the operator's workplace was measured using a standard gravimetric method. The testing was conducted in four stages and lasted 400 minutes, which is 83% of the total work shift duration. Data analysis revealed an exceedance of the permissible dust concentration by a factor of 1.28. The labor conditions class (subclass) was established as 3.1. It was found that the average dust concentrations varied by a factor of 3–4 across different testing stages due to the intensity and direction of air velocity at the production site. Based on the obtained data, dust concentrations at the workplace were predicted according to air velocity at the site, with an approximation accuracy of $R^2 = 0.95$. It was determined that the maximum allowable air velocity at the site should not exceed 2.6 m/s. Using approximated data, it was forecasted that, in the absence of air movement, the dust concentration at the operator's workplace would remain at 0.5 mg/m³. To reduce dust concentration at the operator's workplace, comprehensive measures to minimize dust generation at the crushing plant are necessary, including washing vehicle wheels, installing dust suppression systems, and replacing the open belt conveyor with a closed one. To prevent the development of occupational diseases, operators are advised to use personal respiratory, skin, and eye protection throughout the shift.

Keywords

production, crushed stone, crushing and screening plant, dust, concentration, emissions, dust concentration, dust generation, operator, labor conditions, harm, forecasting, protection

For citationKorol E.A., Degaev E.N., Konyukhov D.S. Assessing dust concentration at the workplace of a crushing and screening plant operator for special labor conditions evaluation. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(4):395–405. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-03-235>**Введение**

По данным¹ Роструда добывающая промышленность остается наиболее травмоопасной сферой экономической деятельности [1, 2]. Связано это прежде всего с особенностями производственных процессов, сложными климатическими и географическими условиями. Объем производства щебня в 2023 г. превысил 221 млн т, что на 24,5% больше, чем в 2017 г. (рис. 1). Щебень является одним из основных материалов, используемых в строительстве и производстве строительных материалов. Снижения темпов добычи и производства в ближайшие годы не предвидится в связи с реализацией различных крупных федеральных проектов, а значит отрасли необходимо увеличивать мощности и количество рабочих мест [3, 4].

**Рис. 1.** Динамика производства щебня в России за 2017–2023 гг.

¹ Результаты мониторинга условий и охраны труда в Российской Федерации в 2022 году. Министерство труда и социальной защиты Российской Федерации. М., 2022.



Производство щебня связано с рядом профессиональных рисков и опасностей для здоровья работников [4, 5]. На щебеночных заводах работают люди разных профессий, и каждая из них имеет свои особенности и риски для здоровья. Например, водители самосвалов и погрузчиков подвергаются воздействию шума и вибрации, что может привести к снижению слуха и развитию вибрационной болезни. Однако наиболее опасным фактором при производстве щебня является пыль, которая на 60% и более состоит из диоксида кремния (SiO_2). Операторы дробилок и грохотов работают в условиях повышенной запыленности, что может вызывать развитие силикоза и других заболеваний легких [6, 7].

Исследования в этой области в основном направлены на изучение влияния кремнеземной пыли на здоровье человека и замеров запыленности воздуха в целом по заводу или карьере в различной отдаленности от источников загрязнения для моделирования и разработки методов снижения пыли. Так, В.С. Кузнецов и Л.Ф. Суламанидзе отмечают, что при работе щебеночного завода концентрация пыли на границе санитарно-защитной зоны превышает предельно допустимую концентрацию (ПДК) в 5–10 раз [8]. Дзифа Фрэнсис Ахадзи исследовал влияние кремнеземной пыли на состояние работников каменных карьеров и симптомы их заболеваний. Автор рекомендует использовать средства индивидуальной защиты (СИЗ) зрения и дыхания [9]. Фредерик Анлима в своих исследованиях отмечает увеличение случаев силикоза в ряде стран и ставит под сомнение методы борьбы с пылью и их эффективность в предотвращении воздействия вдыхаемого кристаллического кремнезема [10]. Чжи-чао Лю на основе результатов моделирования предложил оптимальный метод снижения пыли, подходящий для дробильной станции, и смоделировал закон диффузии пыли при этом методе [11].

С 2014 г. в России введена специальная оценка условий труда (СОУТ), которая регламентируется федеральным законодательством² и направлена на выявление и оценку вредных и опасных производственных факторов на отдельных рабочих местах, а также на разработку мероприятий по улучшению условий труда и профилактику профессиональных заболеваний.

Целью работы является определение запыленности рабочего места оператора дробильно-щебеночного завода в рамках специальной оценки условий труда.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести испытания и определить среднесменную концентрацию пыли в рабочей зоне оператора;
- выявить факторы, влияющие на запыленность рабочего места оператора;
- по аппроксимированным данным спрогнозировать концентрацию пыли на рабочем месте при различных скоростях ветра;
- оценить адекватность и точность полученных результатов;
- установить класс (подкласс) условий труда оператора;

² Федеральный закон от 28.12.2013 № 426-ФЗ «О специальной оценке условий труда».

– разработать рекомендации по снижению запыленности рабочего места оператора и улучшению условий труда.

Новизна работы заключается в комплексном подходе оценки запыленности рабочего места оператора дробильно-щебеночного завода с учётом специфики отрасли и воздействия скорости ветра на уровень запыленности.

Научное значение работы заключается в аппроксимации полученных данных для прогнозирования запыленности рабочего места оператора в зависимости от скорости ветра на производственной площадке.

Практическая ценность работы заключается в прогнозировании концентрации пыли в воздухе рабочего места оператора от скорости ветра на производственной площадке, а также в разработке рекомендаций по снижению запыленности на дробильно-сортировочном заводе.

Методы исследований

Для измерения концентрации пыли в воздухе рабочего места оператора дробильно-сортировочного завода использовался аспирационный метод, основанный на просасывании определенного объема воздуха через специальные фильтры с последующим измерением массы пыли и расчетом концентрации³.

Массовую концентрацию всей пыли в воздухе K_n в каждом отдельном испытании определяют по формуле:

$$K_n = \frac{(m_n - m_0) \cdot 1000}{V_{20}}, \quad (1)$$

где K_n – концентрация пыли в воздухе, $\text{мг}/\text{м}^3$; m_0 – масса чистого фильтра, мг ; m_n – масса фильтра с осевшими частицами пыли, мг ; V_{20} – объем воздуха, приведенный к стандартным условиям, дм^3 ;

$$V_{20} = \frac{V_t \cdot 293P}{(273 + T) \cdot 101,33}, \quad (2)$$

где V_t – объем воздуха, прошедший через фильтр, дм^3 ; P – атмосферное давление, кПа ; T – температура воздуха на рабочем месте, $^{\circ}\text{C}$.

Если время отдельных измерений разное, то рассчитывают средневзвешенную концентрацию по формуле:

$$K_{oi} = \frac{K_{n1}t_1 + K_{n2}t_2 + \dots + K_{nn}t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}, \quad (3)$$

где t_1, t_2, \dots, t_n – время измерений, мин.

Среднесменная концентрация пыли на рабочем месте рассчитывается по формуле:

$$K_{cc} = \frac{K_{o1}T_{o1} + K_{o2}T_{o2} + \dots + K_{on}T_{on}}{\sum T}, \quad (4)$$

где $K_{o1}, K_{o2}, \dots, K_{on}$ – средневзвешенные концентрации пыли за технологическую операцию, $\text{мг}/\text{м}^3$;

³ Методика измерений массовой концентрации пыли гравиметрическим методом для целей специальной оценки условий труда. МИ АПФД–18.01.2018; МУК 4.1.2468–09 Измерение массовых концентраций пыли в воздухе рабочей зоны предприятий горнорудной и нерудной промышленности.

$T_{01}, T_{02}, \dots, T_{0n}$ – продолжительность технологических операций, мин; $\sum T$ – суммарная продолжительность рабочей смены, мин.

Для оценки распределения данных определяют медиану Me и стандартное геометрическое отклонение σ_g :

$$Me = e^{\ln Me}, \quad (5)$$

где

$$\ln Me = \frac{t_1 \ln K_{n1} + t_2 \ln K_{n2} + \dots + t_n \ln K_{nn}}{\sum t}, \quad (6)$$

$$\sigma_g = e^{\sqrt{2 \ln \frac{K_{in}}{Me}}}. \quad (7)$$

Окончательный результат записывают в виде:

$$K \pm 0,01\delta\tilde{K} \text{ при } P = 0,95, \quad (8)$$

где \tilde{K} – среднее арифметическое значение результатов измерений n , мг/м^3 ; δ – границы относительной погрешности, %.

Для оценки точности и адекватности расчетов возможно также использовать вероятностный метод обработки данных. Для этого рассчитывают стандартное геометрическое отклонение по формуле:

$$\sigma_g = \left(\frac{K_{84}}{Me} + \frac{Me}{K_{16}} \right) : 2, \quad (9)$$

где K_{84} и K_{16} – значения концентраций, соответствующие 84% и 16% вероятности накопления частот, мг/м^3 .

Среднесменную концентрацию пыли при этом определяют по формуле:

$$K_{cc} = e^{\ln K_{cc}}, \quad (10)$$

где

$$\ln K_{cc} = \ln Me + 0,5(\ln \sigma_g)^2. \quad (11)$$

Результаты исследований

Измерения запыленности производились в рамках процедуры специальной оценки условий труда [12, 13] на дробильно-щебеночном заводе, находящемся в Подмосковье. Рабочее место оператора находится в отдельно стоящем помещении контейнерного типа на высоте трех метров от уровня земли. Помещение оборудовано климатическим оборудованием для кондиционирования воздуха.

Пылеобразование на дробильно-сортировочном заводе происходит на всем производственном цикле (рис. 2). Основными факторами генерации пыли на производственной площадке являются:

- движение грузового автотранспорта;
- загрузка сырья в приемочный бункер;
- работа дробильного агрегата;
- работа вибрационного грохота;
- поступление щебня в навалы.

Наиболее интенсивное пылеобразование на исследуемом объекте происходит при поступлении отсортированного щебня в навалы. При свободном падении с ленточного конвейера более легкие частицы пыли отрываются от поверхности щебня за счет сопротивления воздуха. Чем с большей высоты падает щебень, тем больше кинетической энергии он приобретает. Эта энергия передается частицам пыли, вызывая их движение и столкновение друг с другом. В результате увеличивается число столкновений и разрушений частиц пыли, что приводит к образованию большего объема пыли. Еще одним фактором, определяющим высокое пылеобразование на производственной площадке, является ветер, который усиливает не только движение пыли, но и поднимает с поверхности навалов и технологического оборудования осевшие частицы, тем самым увеличивая концентрацию пыли в воздухе. Поэтому в данной работе в дополнение к стандартной методике проводили



Рис. 2. Схема дробильно-щебеночного завода с иллюстрацией основных источников пылеобразования



измерение скорости ветра и анализ его влияния на запыленность рабочего места оператора.

В качестве математической модели, описывающей пылевые выбросы, можно использовать систему уравнений, включающих [14]:

– уравнение Навье–Стокса:

$$\begin{cases} \frac{\partial V_x}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} = \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right), \\ \frac{\partial V_y}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial z} = \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \eta \left(\frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2} \right) - g, \\ \frac{\partial V_z}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \eta \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right); \end{cases} \quad (12)$$

– уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \rho = 0; \quad (13)$$

– уравнение Менделеева–Клайперона:

$$P = \frac{\rho}{M} RT; \quad (14)$$

– уравнение теплопроводности:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} = \\ = \frac{1}{c(T)\rho} \left(\frac{\partial \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right)}{\partial z} \right); \end{aligned} \quad (15)$$

– уравнение изменения концентрации пыли:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial C}{\partial x} + (V_y + V_c) \frac{\partial C}{\partial y} + V_z \frac{\partial C}{\partial z} = F_c, \quad (16)$$

где x, y, z – декартовы координаты; τ – время; V – скорость движения воздуха; P – давление воздуха; ρ – плотность материала; T – температура воздуха; M – молярный объем; R – универсальная газовая постоянная (8,31 Дж/моль·К); η – динамическая вязкость; g – ускорение свободного падения; $\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности материала; $C(T)$ – удельная теплоемкость материала; C – концентрация пылевых выбросов; V_c – скорость оседания пылевых выбросов (0,04 м/с); F_c – мощность источника пыли [14].

Во время испытаний производственный процесс был разделен условно на четыре этапа по два часа, равномерно распределенных в течение смены. Время проведения измерения для каждой отдельной пробы – 25 мин. Общее время измерений составляет 400 мин, что соответствует 83% рабочей смены. Отбор проб производился фильтрами АФА (аналитические аэрозольные фильтры) с помощью аспиратора типа ПУ. В процессе испытаний ветер дул в направлении

Таблица 1

Результаты отбора проб воздуха для определения среднесменных концентраций расчетным методом

| № этапа | Длительность этапа T, мин | Масса фильтра m_0 , мг | Масса фильтра m_n , мг | Расход воздуха, л/мин | Атмосферное давление, кПа | Время измерения t, мин | Температура воздуха в рабочей зоне, °С | Скорость ветра V, м/с | Частные значения концентрации пыли в воздухе K, мг/м³ | Среднеарифметическая концентрация по этапу $K_{об}$, мг/м³ | Среднесменная концентрация пыли в воздухе $K_{ср}$, мг/м³ | Медиана Me | Стандартное геометрическое отклонение σ_g |
|---------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|---------------------------|------------------------|--|-----------------------|---|---|--|------------|--|
| I | 120 | 62574,6 | 62577,0 | 20 | 102,0 | 25 | 21,4 | 1 | 4,79 | 3,70 | 7,7 | 6,22 | 1,92 |
| | | 62020,2 | 62022,7 | | | 25 | 21,5 | 2 | 4,99 | | | | |
| | | 62828,1 | 62829,1 | | | 25 | 21,9 | 1 | 2,00 | | | | |
| | | 62532,8 | 62534,3 | | | 25 | 22,0 | 1 | 3,00 | | | | |
| II | 120 | 64731,1 | 64737,2 | | 102,2 | 25 | 22,3 | 4 | 12,19 | 14,21 | | | |
| | | 60150,5 | 60159,4 | | | 25 | 22,5 | 5 | 17,80 | | | | |
| | | 60741,8 | 60750,1 | | | 25 | 22,7 | 5 | 16,61 | | | | |
| | | 61799,2 | 61804,3 | | | 25 | 23,5 | 4 | 10,23 | | | | |
| III | 120 | 63384,4 | 63389,2 | | 102,6 | 25 | 24,8 | 4 | 9,64 | 9,41 | | | |
| | | 61474,8 | 61479,0 | | | 25 | 25,4 | 4 | 8,45 | | | | |
| | | 61696,4 | 61702,2 | | | 25 | 25,9 | 4 | 11,69 | | | | |
| | | 61495,3 | 61499,2 | | | 25 | 26,1 | 3 | 7,86 | | | | |
| IV | 120 | 60473,5 | 60475,6 | 102,8 | 25 | 25,5 | 2 | 4,22 | 3,41 | | | | |
| | | 63826,8 | 63829,0 | | 25 | 25,2 | 1 | 4,41 | | | | | |
| | | 63638,6 | 63640,0 | | 25 | 24,7 | 1 | 2,80 | | | | | |
| | | 63937,4 | 63938,6 | | 25 | 24,4 | 1 | 2,40 | | | | | |



помещения, в котором располагается рабочее место оператора. В табл. 1 представлены результаты измерений и последующая их обработка согласно стандартной расчетной методике.

Полученные результаты свидетельствуют о стабильной концентрации пыли в воздухе рабочей зоны, т.к. стандартное геометрическое отклонение $\sigma_g < 3$. Однако, стоит отметить, что средние концентрации этапов различаются в 3–4 раза, что связано с интенсивностью и направлением ветра на производственной площадке. Усиление ветра до 5 м/с наблюдалось с 10:00 до 13:30, что соответствует максимальным значениям концентрации пыли на рабочем месте (рис. 3).

По полученным данным, приведенным на рис. 4, можно спрогнозировать концентрации пыли K_{np} на рабочем месте в зависимости от скорости ветра V на производственной площадке с величиной достоверности аппроксимации $R^2 = 0,95$:

$$K_{np} = 0,2185V^3 - 1,1571V^2 + 3,6493V + 0,4968. \quad (17)$$

С помощью графика, представленного на рис. 4, определим предельно допустимую скорость ветра на исследуемом объекте:

$$V_{п.д} = 2,6 \text{ м/с.}$$

Для того чтобы определить зависимость пылеобразования от технологического оборудования, движения автотранспорта, загрузки приемочного бункера и высоты свободного падения щебня, по формуле (17) рассчитаем концентрацию пыли при $V = 0 \text{ м/с}$:

$$K_{np,0} = 0,5 \text{ мг/м}^3.$$

Для оценки достоверности измерений использован вероятностный метод обработки полученных результатов [15, 16]. Данный метод позволяет получить полное представление о всех концентрациях пыли в воздухе рабочей зоны с помощью логарифмической вероятностной сетки. Чтобы исследовать соответствие данных нормальному распределению, применили метод гистограммы частот, который является одним из способов графического представления распределения данных (рис. 5).

Полученная гистограмма имеет колоколообразную форму и напоминает график нормальной кривой, что позволяет предположить, что данные следуют нормальному закону [17]. Данные для вероятностной обработки приведены в табл. 2, в которой значения отдельных измерений концентраций ранжировали в порядке возрастания с определением накопленных частот.

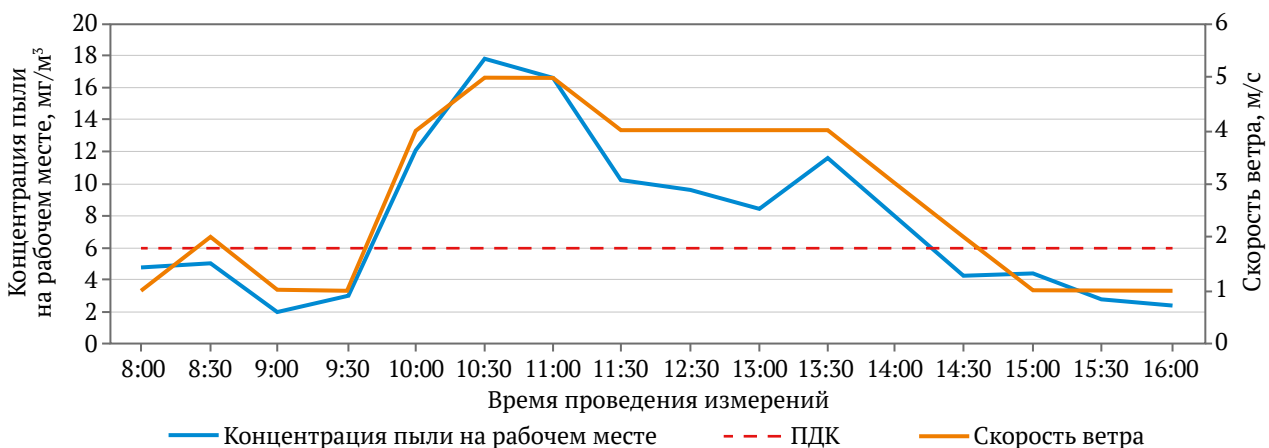


Рис. 3. Изменение концентрации пыли на рабочем месте на различных этапах испытания

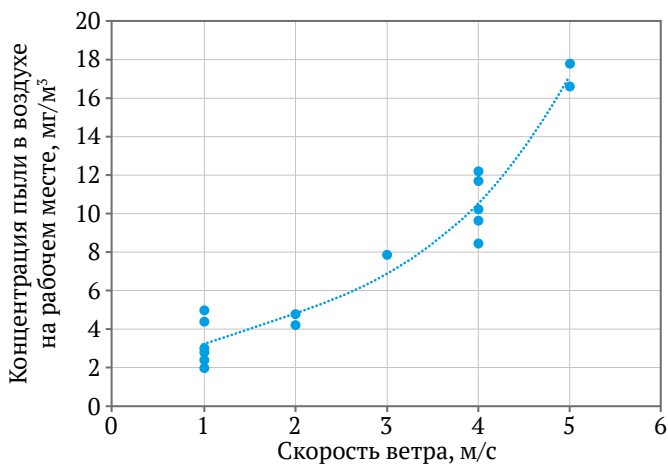


Рис. 4. Зависимость концентрации пыли на рабочем месте от скорости ветра

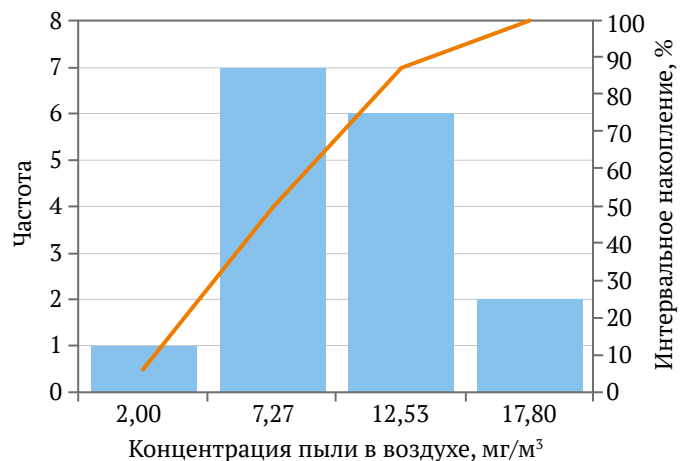


Рис. 5. График нормального распределения при $n = 16$

На вероятностную сетку (рис. 6) нанесены результаты концентраций, соответствующие накопительные частоты и построена через точки интегральная прямая, по которой определены: медиана $Me = 6$ и значения концентраций для 84 и 16% ($K_{84} = 12,1 \text{ мг/м}^3$; $K_{16} = 3,2 \text{ мг/м}^3$).

Для проверки предположения соответствия модели нормальному закону распределения рассчитаем критерий Шапиро–Уилка:

$$W = \frac{\left(\sum_{i=1}^n a_i x_i\right)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0,91, \quad (18)$$

где n – количество наблюдений; x_i – значения упорядоченной выборки; a_i – табличные коэффициенты, зависящие от количества испытаний.

Таблица 2

Расчет среднесменной концентрации пыли в воздухе рабочей зоны вероятностным методом

| № п/п | Частные значения концентрации пыли в воздухе K в порядке ранжирования, мг/м^3 | Время измерения T , мин | Длительность отбора пробы от общей продолжительности проведения испытания, % | Накопленная частота, % | Среднесменная концентрация пыли в воздухе $K_{сс}$, мг/м^3 | Медиана Me | Стандартное геометрическое отклонение σ_g |
|-------|--|---------------------------|--|------------------------|--|--------------|--|
| 1 | 2,00 | 25 | 6,25 | 6,25 | 7,6 | 6,00 | 1,94 |
| 2 | 2,40 | 25 | 6,25 | 12,50 | | | |
| 3 | 2,80 | 25 | 6,25 | 18,75 | | | |
| 4 | 3,00 | 25 | 6,25 | 25,00 | | | |
| 5 | 4,22 | 25 | 6,25 | 31,25 | | | |
| 6 | 4,41 | 25 | 6,25 | 37,50 | | | |
| 7 | 4,79 | 25 | 6,25 | 43,75 | | | |
| 8 | 4,99 | 25 | 6,25 | 50,00 | | | |
| 9 | 7,86 | 25 | 6,25 | 56,25 | | | |
| 10 | 8,45 | 25 | 6,25 | 62,50 | | | |
| 11 | 9,64 | 25 | 6,25 | 68,75 | | | |
| 12 | 10,23 | 25 | 6,25 | 75,00 | | | |
| 13 | 11,69 | 25 | 6,25 | 81,25 | | | |
| 14 | 12,19 | 25 | 6,25 | 87,50 | | | |
| 15 | 16,61 | 25 | 6,25 | 93,75 | | | |
| 16 | 17,80 | 25 | 6,25 | 100,00 | | | |

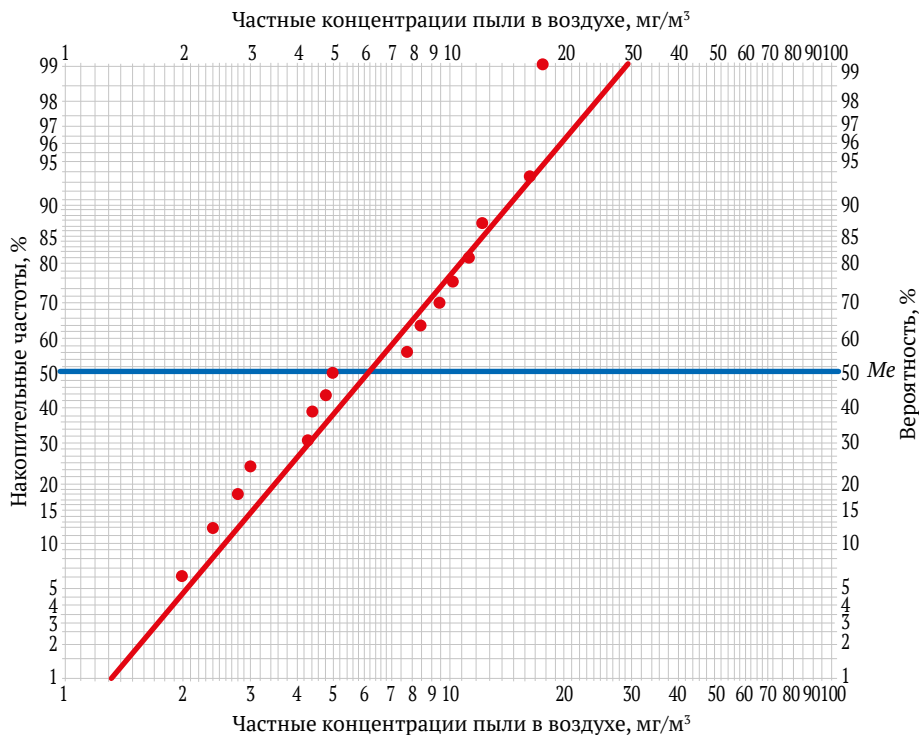


Рис. 6. Вероятностная координационная сетка

Таблица 3

Результаты промежуточных расчетов критерия Шапиро–Уилка

| \tilde{x} | x_i | $(x_i - \tilde{x})^2$ | a_i | $a_i \cdot x_i$ |
|-------------|--------|-----------------------|-------|-----------------|
| 7,69 | 2,00 | 32,38 | 0,51 | 1,02 |
| | 2,40 | 27,98 | 0,33 | 0,79 |
| | 2,80 | 23,91 | 0,25 | 0,70 |
| | 3,00 | 22,00 | 0,19 | 0,57 |
| | 4,22 | 12,04 | 0,15 | 0,63 |
| | 4,41 | 10,76 | 0,10 | 0,44 |
| | 4,79 | 8,41 | 0,06 | 0,29 |
| | 4,99 | 7,29 | 0,02 | 0,10 |
| | 7,86 | 0,03 | -0,02 | -0,16 |
| | 8,45 | 0,58 | -0,06 | -0,51 |
| | 9,64 | 3,80 | -0,10 | -0,96 |
| | 10,23 | 6,45 | -0,15 | -1,53 |
| | 11,69 | 16,00 | -0,19 | -2,22 |
| | 12,19 | 20,25 | -0,25 | -3,05 |
| | 16,61 | 79,57 | -0,33 | -5,48 |
| 17,80 | 102,21 | -0,51 | -9,08 | |
| Сумма | – | 373,66 | – | -18,45 |

В табл. 3 приведены промежуточные расчеты критерия Шапиро–Уилка.

Рассчитанный критерий W больше табличного значения $W_t = 0,887$ (уровень значимости $\alpha = 0,05$), что с вероятностью 0,95 подтверждает соответствие модели распределения нормальному закону.

Полученная среднесуточная концентрация пыли при вероятностном методе составила 7,6 мг/м³. Отклонение в 0,1 мг/м³ доказывает точность и адекватность проведенных испытаний, т.к. доверительный интервал согласно выражению (8) равен $\pm 1,85$ мг/м³. За результат принимаем расчетное значение:

$$K_{cc} = 7,7 \pm 1,85 \text{ мг/м}^3.$$

Сводные результаты по определению класса (подкласса) условий труда представлены в табл. 4. Пыль от производства щебня относится к аэрозолям преимущественно фиброгенного действия, что соответствует 3-му классу опасности. Полученный результат

выше предельно допустимой концентрации (ПДК) в 1,28 раза, что относится к классу 3.1 (подклассу) условий труда и требует установления дополнительных выплат за вредность.

Заключение

Полученные результаты определения запыленности рабочего места оператора дробильно-сортировочного завода свидетельствуют о превышении ПДК в 1,28 раз, что относится к классу 3.1 (подклассу) условий труда. Среднесуточная концентрация пыли в воздухе рабочего места оператора равна 7,7 мг/м³, однако, стоит отметить, что средние концентрации этапов различаются в 3–4 раза, что связано с интенсивностью и направлением ветра на производственной площадке.

По полученным данным спрогнозированы концентрации пыли $K_{пр}$ на рабочем месте в зависимости от скорости ветра V на производственной площадке с величиной достоверности аппроксимации $R^2 = 0,95$. Установлено, что максимально допустимая скорость ветра на производственной площадке не должна быть выше 2,6 м/с.

При превышении ПДК пыли в воздухе рабочих мест согласно законодательству⁴ работодатель должен приостановить производство и принять меры для снижения содержания пыли в воздухе до минимально возможного уровня.

Для снижения запыленности рабочего места оператора необходимы комплексные мероприятия по сокращению пылеобразования на дробильно-сортировочном заводе, включающие [18–22]:

- мойку колес автомобильного транспорта при въезде на производственную площадку и выезде из неё;
- установку стационарных или мобильных систем подавления пыли с помощью распыления воды форсунками низкого и среднего давления, создающими туман.
- замену открытого ленточного конвейера на закрытый.

Кроме того, рекомендуется замена фильтров климатического оборудования на угольные, способствующие более качественному очищению воздуха.

С помощью аппроксимированных данных спрогнозировано, что при отсутствии ветра на произ-

⁴ «Трудовой кодекс Российской Федерации» от 30.12.2001 № 197-ФЗ

Таблица 4

Результаты оценки условий труда рабочего места

| Профессия / должность | Величина ПДК* пыли в воздухе на рабочем месте, мг/м ³ | Класс опасности | Особенности действия на организм | Среднесуточная концентрация пыли в воздухе рабочего места, мг/м ³ | Отклонение от ПДК | Класс (подкласс) условий труда** |
|--|--|-----------------|--|--|-------------------|----------------------------------|
| Оператор дробильно-сортировочного цеха | 6 | 3 | Аэрозоли преимущественно фиброгенного действия | 7,7 | 1,28 | 3.1 |

Источники: * ГН 2.2.5.3532-18 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны»; ** ГОСТ Р 54578–2011 «Воздух рабочей зоны. Аэрозоли преимущественно фиброгенного действия. Общие принципы гигиенического контроля и оценки воздействия».



водственной площадке концентрация пыли в воздухе рабочего места оператора сохранится на уровне 0,5 мг/м³. Вдыхание кристаллического диоксида кремния может привести к образованию узелков соединительной ткани в лёгких и рубцеванию области вокруг частиц. Естественные защитные клетки организма не могут удалить токсичную пыль, что приводит к постоянному воспалению и возможному повреждению клеток лёгких. У некоторых людей при контакте с пылью возможны проявления аллергии

в виде кожных высыпаний и/или зуда. Для предотвращения развития профессиональных заболеваний операторам рекомендуется использовать средства индивидуальной защиты органов дыхания, кожи и глаз на протяжении всей смены.

Представленные результаты могут быть использованы для прогнозирования концентрации пыли на рабочих местах операторов других щебеночных заводов с учетом полученных индивидуальных эмпирических данных.

Список литературы / References

1. Nikulin A., Nikulina A. Y. Assessment of occupational health and safety effectiveness at a mining company. *Ecology, Environment and Conservation*. 2017;23(1);351–335.
2. Король Е.А., Дегаев Е.Н., Конюхов Д.С. Обеспечение безопасных условий труда при перекладке подземных инженерных коммуникаций. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024;(2):129–139. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_2_0_129
Korol E. A., Degaev E. N., Konyukhov D. S. Labor safety in laying of underground utilities. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024; (2):129–139. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_2_0_129
3. Лапшин Н.С. Виноградов И.П., Дзюрич Н.С. Анализ тенденций развития рынка нерудных строительных материалов в Российской Федерации. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018;(7):205–211. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-7-0-205-211>
Lapshin N. S. Vinogradov I. P., Dzurich N. S. Analysis of development trend in the market of nonmetallic constructional materials in the Russian Federation. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2018;(7):205–211. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-7-0-205-211>
4. Буткевич Г.Р. Промышленность нерудных строительных материалов. Взгляд в будущее. *Строительные материалы*. 2019;(11):32–36. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-776-11-32-36>
Butkevich G. R. Industry of non-metallic building materials. Prospection. *Building Materials*. 2019;(11):32–36. (In Russ.) <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-776-11-32-36>
5. Баловцев С.В. Мониторинг аэрологических рисков аварий на угольных шахтах. *Горные науки и технологии*. 2023;8(4):350–359. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-10-163>
Balovtsev S. V. Monitoring of aerological risks of accidents in coal mines. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(4):350–359. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-10-163>
6. Растанина Н.К., Колобанов К.А. Воздействие техногенного пылевого загрязнения на экосферу и здоровье человека закрытого горного предприятия Приамурья. *Горные науки и технологии*. 2021;6(1):16–22. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-16-22>
Rastanina N. K., Kolobanov K. A. Impact of technogenic dust pollution from the closed mining enterprise in the Amur Region on the ecosphere and human health. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(1):16–22. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-16-22>
7. Rathebe P. Occupational exposure to silicon dioxide and prevalence of chronic respiratory symptoms in the cement manufacturing industries: *Journal of Public Health Research*. 2023;12(4):1–10. <https://doi.org/10.1177/22799036231204316>
8. Суламанидзе Л. Ф. Кузнецов Л. Ф. Оценка пылевого загрязнения атмосферы при переработке нерудных материалов. В: *Шаг в будущее: теоретические и прикладные исследования современной науки: материалы XVII молодежной международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных*. СПб.: Lulu Press; 2019. С. 38–41.
Sulamanidze L. F. Kuznetsov L. F. Assessment of dust pollution of the atmosphere during the processing of non-metallic materials. In: *Step into the future: theoretical and applied research of modern science: materials of the XVII Youth International Scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists*. St. Petersburg: Lulu Press; 2019. Pp. 38–41. (In Russ.)
9. Ahadzi D. F., Afitiri A. R., Ekumah B. et al. Self-reported disease symptoms of stone quarry workers exposed to silica dust in Ghana. *Health Science Reports*. 2020;3(4):189. <https://doi.org/10.1002/hsr2.189>
10. Anlimah F., Gopaldasani V., MacPhail C. et al. A systematic review of the effectiveness of dust control measures adopted to reduce workplace exposure. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023;30(19):54407–54428. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26321-w>
11. Liu Z., Ao Z., Zhou W. et al. Research on the physical and chemical characteristics of dust in open pit coal mine crushing stations and closed dust reduction methods. *Sustainability*. 2023;15(16):12202. <https://doi.org/10.3390/su151612202>



12. Пахомова Л.А., Олейник П.П. Выбор и оценка параметров аттестации рабочих мест СОУТ (специальная оценка условий труда). *Строительное производство*. 2019;(1);49–52. https://doi.org/10.54950/26585340_2019_1_49
Pakhomova L., Oleynik P. Selection and evaluation of work place certification parameters (special assessment of labor conditions). *Construction Production*. 2019;(1);49–52. (In Russ.) https://doi.org/10.54950/26585340_2019_1_49
13. Занина И.А., Макеева Л.А., Жабаяева М. У и др. Выявление причин травматизма в угольной промышленности и меры по снижению рисков (на примере ТОО «Богатырь комир»). *Наука и реальность*. 2023;4(16):90–95.
Zanina I.A., Makeeva L.A., Zhabaeva M.U. et al. Identification of the causes of injuries in the coal industry and measures to reduce risks (using the example of Bogatyr Komir LLP). *Science & Reality*. 2023;4(16):90–95. (In Russ.)
14. Матюшинец Т.В., Яцкевич Ю.В., Чичко А.Н. Математическое моделирование распределения пылевых выбросов в пространственной структуре цеха. *Литье и металлургия*. 2018;(4):107–113. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2018-4-107-113>
Matyushinets T.V., Jatskevich Yu.V., Chychko A.N. Mathematical modeling of the distribution of dust emissions in the spatial structure of the workshop. *Foundry Production and Metallurgy*. 2018;(4):107–113. (In Russ.) <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2018-4-107-113>
15. Веревкина О.И. О гибридном методе прогнозирования рисков на железнодорожном транспорте на основании общего логико-вероятностного метода. *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2017;14(4):615–627.
Verevkina O.I. On the hybrid method of forecasting the risks on railway transport based on the general logical-and-probabilistic method. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2017;14(4):615–627.
16. Kuligin D., Shkoliar F. Influence of the probabilistic method to summarize loads on the reliability and material consumption of building structures. *Architecture and Engineering*. 2023;8(2):49–57. <https://doi.org/10.23968/2500-0055-2023-8-2-49-57>
17. Дуплякин В.М. Особенности идентификации нормального закона распределения. Вестник Самарского университета. *Экономика и управление*. 2020;11(3):176–183. <https://doi.org/10.18287/2542-0461-2020-11-3-176-183>
Duplyakin V.M. Nuances of identification for normal distribution. Vestnik of Samara University. *Economics and Management*. 2020;11(3):176–183. <https://doi.org/10.18287/2542-0461-2020-11-3-176-183>
18. Zeng L.-M., Yang X.-Y., Wang L.-H. et al. Determination of weight concentration of free silicon dioxide for dust using X-ray diffraction technique and Rietveld refinement method. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*. 2008;(36):599–603.
19. Jing D., Ma J., Dong Z. et al. Research on factors affecting the spread of dust pollution in conveyor belt workshop and research on wet dust reduction technology. *PLoS One*. 2024;19(2):e0299328. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0299328>
20. Jing D., Ma J., Zhang T. et al. Numerical simulation of the fine kinetics of dust reduction using high-speed aerosols. *PLoS One*. 2023;18(12):e0286101. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0286101>
21. Bajracharya N., Magar P., Karki S. et al. Occupational health and safety issues in the construction industry in south asia: a systematic review and recommendations for improvement. *Journal of Multidisciplinary Research Advancements*. 2023;1(1):27–31. <https://doi.org/10.3126/jomra.v1i1.55101>
22. Климов И.Ю. Анализ эффективности реализации компетентностного подхода в программе опережающего обучения горнодобывающей компании. *Горные науки и технологии*. 2020; 5(1):56–68. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-1-56-68>
Klimov I.Yu. Analysis of Soft Skills-Based Approach Effectiveness in Advanced Training Program for Mining Company. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(1):56–68. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-1-56-68>

Информация об авторах

Елена Анатольевна Король – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой жилищно-коммунального комплекса, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-5019-3694](https://orcid.org/0000-0002-5019-3694), Scopus ID [57197844794](https://scopus.com/authorid/57197844794), ResearcherID [C-2635-2019](https://orcid.org/C-2635-2019), AuthorID [678276](https://orcid.org/678276); e-mail KorolEA@mgsu.ru

Евгений Николаевич Дегаев – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры жилищно-коммунального комплекса, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-6384-8277](https://orcid.org/0000-0001-6384-8277), Scopus ID [57195225439](https://scopus.com/authorid/57195225439), ResearcherID [S-1854-2018](https://orcid.org/S-1854-2018), AuthorID [798266](https://orcid.org/798266); e-mail degaev@inbox.ru

Дмитрий Сергеевич Конюхов – доктор технических наук, АО «Мосинжпроект», г. Москва, Российская Федерация; МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-8635-232X](https://orcid.org/0000-0001-8635-232X), Scopus ID [6507981388](https://scopus.com/authorid/6507981388), AuthorID [350235](https://orcid.org/350235); e-mail gidrotehnik@inbox.ru



Information about the authors

Elena A. Korol – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Housing and Communal Services, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0002-5019-3694](https://orcid.org/0000-0002-5019-3694), Scopus ID [57197844794](https://scopus.com/authid/detail.url?authorID=57197844794), ResearcherID [C-2635-2019](https://orcid.org/C-2635-2019), AuthorID [678276](https://orcid.org/678276); e-mail KorolEA@mgsu.ru

Evgeniy N. Degaev – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Housing and Communal Complex, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0001-6384-8277](https://orcid.org/0000-0001-6384-8277), Scopus ID [57195225439](https://scopus.com/authid/detail.url?authorID=57195225439), ResearcherID [S-1854-2018](https://orcid.org/S-1854-2018), AuthorID [798266](https://orcid.org/798266); e-mail degaev@inbox.ru

Dmitry S. Konyukhov – Dr. Sci. (Eng.), Mosinzhproekt JSC, Moscow, Russian Federation; MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0001-8635-232X](https://orcid.org/0000-0001-8635-232X), Scopus ID [6507981388](https://scopus.com/authid/detail.url?authorID=6507981388), AuthorID [350235](https://orcid.org/350235); e-mail gidrotehnik@inbox.ru

| | | | |
|--------------------------------|------------|----------|------------|
| Поступила в редакцию | 27.03.2024 | Received | 27.03.2024 |
| Поступила после рецензирования | 23.05.2024 | Revised | 23.05.2024 |
| Принята к публикации | 01.06.2024 | Accepted | 01.06.2024 |