



Экспериментальное исследование процесса седиментации твердых частиц разного происхождения

А.В. Бальчугов¹, А.А. Баранова²✉

^{1,2}Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, Россия

Аннотация. Седиментация является первым этапом очистки сточных вод от механических примесей. На ее скорость влияет плотность и размер частиц примесей, а также плотность и вязкость дисперсионной среды. В промышленных отстойниках осаждение частиц может происходить в ламинарном, переходном или турбулентном режимах. Цель исследования заключалась в установлении критериальных уравнений и их коэффициентов для процессов седиментации частиц песка, стекла и гранул полиамида. Осаждение частиц песка размером 0,001–0,003 м, сферических частиц стекла диаметром 0,0025–0,004 м и гранул полиамида со средним объемно-поверхностным диаметром 0,0022–0,003 м проводилось в мерном стеклянном цилиндре, заполненном дистиллированной водой. Для каждой твердой частицы измерялся диаметр, далее, с помощью пинцета она соприкасалась с уровнем поверхности воды, отпускалась и под действием силы тяжести начинала оседать на дно цилиндра. Секундомером засекалось время прохождения частицы между метками мерной емкости. Расчеты выполнялись на основе метода анализа размерностей. По результатам испытаний установлены зависимости критерия Рейнольдса от критерия Архимеда при осаждении частиц песка и гранул полиамида в переходном режиме и сферических частиц стекла в турбулентном режиме, выведены критериальные уравнения процесса осаждения твердых частиц в слое жидкости. Экспериментально определены коэффициенты для данных уравнений. Уравнения и коэффициенты, полученные в процессе исследования, могут быть полезны при проектировании отстойников, предназначенных для механической очистки сточных вод от частиц песка, стекла и полимеров.

Ключевые слова: осаждение, сточные воды, очистка стоков, критериальное уравнение, отстойники

Для цитирования: Бальчугов А.В., Баранова А.А. Экспериментальное исследование процесса седиментации твердых частиц разного происхождения // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2024. Т. 14. № 3. С. 513–523. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2024-3-513-523>. EDN: OCIGHE.

Original article

Experimental study into the sedimentation process of solids of different origin

Alexey V. Balchugov¹, Albina A. Baranova²✉

^{1,2}Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, Россия

Abstract. Abstract. Sedimentation refers to the first stage of wastewater treatment from mechanical impurities. Its rate depends on the density and particle size of impurities, as well as the density and viscosity of dispersion medium. In industrial sedimentation tanks, particle settling can occur in laminar, transient or turbulent modes. **Aim.** To establish the criterion equations and their coefficients for sedimentation processes of sand, glass and polyamide granules. Sedimentation of sand particles of 0.001–0.003 m, spherical glass particles with the diameter of 0.0025–0.004 m and polyamide granules with the volume-surface mean diameter of 0.0022–0.003 m was carried out in a measured glass cylinder filled with distilled water. Each solid particle was measured, then, it came into contact with the water surface by means of tweezers, and released, starting to settle to the bottom of the cylinder under the

action of gravity. A stopwatch was used to time the particle passing between the marks of the measured cylinder. Calculations were performed using dimensional analysis. According to the test results, the dependences of the Reynolds number on the Archimedes number were established for the sedimentation of sand particles and polyamide granules in the transient mode, while spherical glass particles in the turbulent mode. In addition, the criterion equations of the solid particles sedimentation in the liquid were derived. The coefficients for these equations were experimentally determined. The equations and coefficients obtained in the study can be used in the design of settling tanks for mechanical treatment of wastewater to remove sand, glass and polymer particles.

Keywords: precipitation, wastewater, wastewater treatment, criterion equation, settling tanks

For citation: Balchugov A.V., Baranova A.A. Experimental study into the sedimentation process of solids of different origin. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2024;14(3):513-523. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2024-3-513-523>. EDN: OCIGHE.

ВВЕДЕНИЕ

Жизненный цикл жилых и промышленных объектов предусматривает наличие инженерных систем для сбора и отведения сточных вод к очистным сооружениям.

Сточные воды представляют собой двухфазную систему «жидкое – твердое» и технология их очистки заключается в удалении твердой фазы. Удельные энергозатраты на очистку сточных вод зависят от концентрации загрязнений и неоднородности их состава. По условиям образования стоки подразделяют на промышленные, бытовые и поверхностные, что обуславливает диапазон изменения дисперсности содержащихся в них взвешенных веществ, их адгезионные свойства и способность к осаждению.

Очистка стоков включает в себя четыре этапа: механический, биологический, физико-химический, дезинфицирующий. На первом этапе сточные воды подвергаются механической очистке, т. е. в процессе седиментации стоки разделяются на фракции в зависимости от плотности примесей. Отстаивание является самым простым и наименее энергозатратным способом удаления грубодисперсных нерастворимых веществ из сточных вод.

На скорость осаждения твердых частиц влияет их плотность и размер, а также плотность и вязкость дисперсионной среды. Седиментация протекает тем медленнее, чем меньше размеры частицы дисперсной фазы и чем меньше значение разности плотностей твердой и жидкой фаз. Если плотность дисперсной фазы больше плотности дисперсионной среды, то взвешенные частицы оседают на дно сосуда. Большая часть грубодисперсных примесей оседает в течение первых двух часов, при этом продолжительность отстаивания зависит от дальнейшего метода очистки сточных вод.

До 60 % нерастворимых загрязнений за-

держивается в процессе механической очистки сточных вод, что позволяет подготовить стоки к последующим этапам очистки.

Для исследователей [1–28], занимающихся вопросами водоснабжения и водоотведения, очистка стоков является важной задачей, препятствующей загрязнению окружающей среды.

В промышленных отстойниках седиментация частиц может происходить в ламинарном, переходном или турбулентном режиме. Целью исследования было установление критериев уравнений для процессов осаждения частиц песка, стекла и гранул полиамида на основе метода анализа размерностей и определение их коэффициентов [29, 30].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследованиях использовался речной песок, сферические частицы стекла, гранулы полиамида и дистиллированная вода.

Методика исследования заключалась в следующем. Осаждение твердых частиц проводилось в мерном стеклянном цилиндре, заполненном дистиллированной водой до высоты 40 см. Предварительно, у каждой частицы замерялся диаметр. Далее, с помощью пинцета она соприкасалась с уровнем поверхности воды точно по центру стеклянного цилиндра, отпускалась и под действием силы тяжести оседала, исключая касания о стенки сосуда. Время прохождения частицы между метками мерной емкости фиксировалось с помощью секундомера. Верхняя метка располагалась на 3 см ниже уровня воды. Опыт с каждой частицей повторялся трижды.

Критерии вычислялись по средним значениям диаметра частиц и скорости их осаждения.

Параметрами, влияющими на скорость осаждения (седиментации) твердой частицы в воде (V_{oc} , м/с), являются: d – диаметр твердой

частицы, м; ρ – плотность твердой частицы, кг/м³; ρ_w – плотность воды, кг/м³; $(\rho - \rho_w)$ – разность плотностей твердой частицы и воды, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; μ_w – динамический коэффициент вязкости воды, Па·с.

Скорость осаждения твердой частицы есть функция от перечисленных параметров:

$$V_{oc} = f(d, \rho_w, (\rho - \rho_w), \mu_w, g) \quad (1)$$

Основными единицами измерения процесса седиментации являются килограммы (единица измерения массы [M]), метры (единица измерения длины [L]), секунды (единица измерения времени [T]). Единица измерения скорости осаждения частицы через основные единицы измерения может быть записана в виде:

$$[V_{oc}] = [L]^1 [M]^0 [T]^{-1}, \quad (2)$$

$$\frac{M}{C} = M^1 \cdot K \cdot C^{-1}. \quad (3)$$

Единицы измерения остальных параметров процесса записываются как:

$$[d] = [L]^1 [M]^0 [T]^0, \quad (4)$$

$$[\rho_w] = [L]^{-3} [M]^1 [T]^0, \quad (5)$$

$$[\rho - \rho_w] = [L]^{-3} [M]^1 [T]^0, \quad (6)$$

$$[g] = [L]^1 [M]^0 [T]^{-2}, \quad (7)$$

$$[\mu_w] = [L]^{-1} [M]^1 [T]^{-1}. \quad (8)$$

Табл. 1 содержит сведения об единицах измерения параметров процесса седиментации.

Таблица 1. Единицы измерения параметров процесса седиментации.

Table 1. Units of measurement for the parameters of the sedimentation process.

Параметр	Единица измерения	Формула единицы измерения	Показатели степени		
			[L]	[M]	[T]
V_{oc}	м/с	$[V_{oc}] = [L]^1 [M]^0 [T]^{-1}$	1	0	-1
d	м	$[d] = [L]^1 [M]^0 [T]^0$	1	0	0
ρ_w	кг/м ³	$[\rho_w] = [L]^{-3} [M]^1 [T]^0$	-3	1	0
$\rho - \rho_w$	кг/м ³	$[\rho - \rho_w] = [L]^{-3} [M]^1 [T]^0$	-3	1	0
g	м/с ²	$[g] = [L]^1 [M]^0 [T]^{-2}$	1	0	-2
μ_w	Па·с	$[\mu_w] = [L]^{-1} [M]^1 [T]^{-1}$	-1	1	-1

За основные параметры принимаются диаметр твердой частицы d , плотность воды ρ_w , коэффициент динамической вязкости воды μ_w . Их число равняется числу первичных единиц измерения: кг, с, м. Из формул (4), (5), (8) для единиц измерения d , ρ_w , μ_w составляется система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} [d] &= [L]^{t_1} [M]^{m_1} [T]^{t_1} \\ [\rho_w] &= [L]^{t_2} [M]^{m_2} [T]^{t_2} \\ [\mu_w] &= [L]^{t_3} [M]^{m_3} [T]^{t_3} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Прологарифмировав, получаем:

$$\left. \begin{aligned} \lg[d] &= l_1 \lg[L] + m_1 \lg[M] + t_1 \lg[T] \\ \lg[\rho_w] &= l_2 \lg[L] + m_2 \lg[M] + t_2 \lg[T] \\ \lg[\mu_w] &= l_3 \lg[L] + m_3 \lg[M] + t_3 \lg[T] \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Система уравнений (10) будет иметь единственное решение при определителе матрицы не равном нулю [29].

Для параметров d , ρ_w , μ_w методом треугольника, используя данные табл. 1, вычисляем определитель матрицы:

$$\Delta = \begin{vmatrix} l_1 & m_1 & t_1 \\ l_2 & m_2 & t_2 \\ l_3 & m_3 & t_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -3 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & -1 \end{vmatrix} = -1 \neq 0. \quad (11)$$

Определитель матрицы не равен нулю (11), т. е. основные параметры процесса седиментации d , ρ_w , μ_w выбраны правильно.

Количество переменных величин (параметров процесса) равно $z=6$, а основных единиц измерения $q=3$. Согласно теореме подобия, число критериев подобия, описывающих процесс седиментации, равно $z-q=3$.

Значения критериев подобия определяются как отношение каждой величины (V_{oc} , $(\rho - \rho_w)$, g) к произведению основных величин (d , ρ_w , μ_w), возведенных в степень. Формулы для расчета критериев подобия будут иметь вид:

$$\Pi_1 = \frac{V_{oc}}{d^a \cdot \rho_w^b \cdot \mu_w^c}, \quad (12)$$

$$\Pi_2 = \frac{\rho - \rho_w}{d^k \cdot \rho_w^l \cdot \mu_w^m}, \quad (13)$$

$$\Pi_3 = \frac{g}{d^e \cdot \rho_w^p \cdot \mu_w^f}. \quad (14)$$

Если представить зависимость (1) в виде, отражающем связь между безразмерными критериями, получаем:

$$\frac{V_{oc}}{d^a \cdot \rho_w^b \cdot \mu_w^c} = \varphi \left(\frac{\rho - \rho_w}{d^k \cdot \rho_w^l \cdot \mu_w^m}; \frac{g}{d^e \cdot \rho_w^p \cdot \mu_w^f} \right), \quad (15)$$

т. е.

$$\Pi_1 = \varphi(\Pi_2; \Pi_3).$$

Левая часть уравнения (15) является безразмерной величиной, поэтому справедливы выражения

$$\frac{[V_{oc}]}{[d]^a \cdot [\rho_w]^b \cdot [\mu_w]^c} = 1 \quad (16)$$

или

$$\frac{[L]^1 [T]^{-1}}{[L]^a \cdot ([M][L]^{-3})^b \cdot ([M][L]^{-1} [T]^{-1})^c} = 1 \quad (17)$$

Тогда

$$[M]^{-b-c} [L]^{1-a+3b+c} [T]^{-1+c} = 1 \quad (18)$$

Равенство (18) будет выполняться при

$$\left. \begin{aligned} -b - c &= 0 \\ 1 - a + 3b + c &= 0 \\ -1 + c &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (19)$$

откуда

$$b = -1, c = 1, a = -1$$

Критерий подобия (12) будет иметь вид

$$\Pi_1 = Re = \frac{V_{oc} \cdot d \cdot \rho_w}{\mu_w}$$

Критерий $\Pi_1 = Re$ называется критерием Рейнольдса.

В уравнении (15) безразмерным является выражение

$$\frac{\rho - \rho_w}{d^k \cdot \rho_w^l \cdot \mu_w^m}, \quad (20)$$

поэтому

$$\frac{[\rho - \rho_w]}{[d]^k \cdot [\rho_w]^l \cdot [\mu_w]^m} = 1 \quad (21)$$

или

$$\frac{[M][L]^{-3}}{[L]^k \cdot ([M][L]^{-3})^l \cdot ([M][L]^{-1} [T]^{-1})^m} = 1 \quad (22)$$

$$[M]^{1-l-m} [L]^{-3-k+3l+m} [T]^m = 1 \quad (23)$$

Равенство (23) будет выполняться при

$$\left. \begin{aligned} 1 - l - m &= 0 \\ -3 - k + 3l + m &= 0 \\ m &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (24)$$

откуда

$$m = 0, l = 1, k = 0.$$

Тогда безразмерный критерий подобия (13) примет вид

$$\Pi_2 = \frac{\rho - \rho_w}{\rho_w}$$

В уравнении (15) безразмерным является выражение

$$\frac{g}{d^e \cdot \rho_w^p \cdot \mu_w^f},$$

тогда

$$\frac{[g]}{[d]^e \cdot [\rho_w]^p \cdot [\mu_w]^f} = 1 \quad (25)$$

или

$$\frac{[L][T]^{-2}}{[L]^e \cdot ([M][L]^{-3})^p \cdot ([M][L]^{-1} [T]^{-1})^f} = 1 \quad (26)$$

$$[M]^{-p-f} [L]^{1-e+3p+f} [T]^{f-2} = 1 \quad (27)$$

Равенство (27) выполняется в том случае, если

$$\left. \begin{aligned} -p - f &= 0 \\ 1 - e + 3p + f &= 0 \\ f - 2 &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (28)$$

откуда

$$f = 2, p = -2, e = -3$$

Безразмерный критерий подобия (14) будет иметь вид

$$\Pi_3 = \frac{g \cdot d^3 \cdot \rho_w^2}{\mu_w^2}$$

Произведение критериев Π_2 и Π_3 называется критерием Архимеда

$$\begin{aligned} Ar &= \Pi_2 \cdot \Pi_3 = \frac{\rho - \rho_w}{\rho_w} \cdot \frac{g \cdot d^3 \cdot \rho_w^2}{\mu_w^2} = \\ &= \frac{g \cdot d^3 \cdot (\rho - \rho_w) \cdot \rho_w}{\mu_w^2} \end{aligned} \quad (29)$$

Зависимость между безразмерными критериями подобия для процесса осаждения примет вид

$$\frac{V_{oc} \cdot d \cdot \rho_w}{\mu_w} = \varphi \left(\frac{g \cdot d^3 \cdot (\rho - \rho_w) \cdot \rho_w}{\mu_w^2} \right) \quad (30)$$

или

$$Re = \phi(Ar) \quad (31)$$

Зависимость (31) можно представить в виде

$$Re = m \cdot Ar^n \quad (32)$$

Уравнение (32) соответствует уравнению, полученному аналитическим методом. Вид функции (32) можно определить только экспериментально [31].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты экспериментов по осаждению единичных частиц песка, сферических частиц стекла и гранул полиамида в воде приведены в табл. 2, 3 и 4 и изображены на рис. 1, 2.

Диаметры частиц песка d находились в диапазоне от 0,001 м до 0,003 м, плотность твердых частиц песка $\rho = 2650$ кг/м³, высота слоя воды $h = 0,4$ м, температура дистиллированной воды составляла 17 °С, коэффициент динамической вязкости воды $\mu_w = 0,001083$.

Диаметры сферических частиц стекла располагались в диапазоне от 0,0025 до 0,004 м, плотность частиц $\rho = 2550$ кг/м³.

Гранулы полиамида имели неправильную форму, близкую к цилиндрической, поэтому в расчетах использовался их средний объемно-поверхностный диаметр d_{cp} , диапазон которого составил от 0,0022 м до 0,003 м, плотность твердых частиц полиамида $\rho=1080$ кг/м³. Графические зависимости критерия Рейнольдса от критерия Архимеда при осаждении частиц песка размером 0,001-0,003 м (рис. 1а) и гранул полиамида (рис. 1б) в переходном режи-

ме, т. е. при $2 < Re < 500$ описываются уравнениями

$$\text{для частиц песка:} \\ Re = 2,7675 \cdot Ar^{0,3964}, \quad (33)$$

$$\text{для гранул полиамида:} \\ Re = 0,9317 \cdot Ar^{0,4872} \quad (34)$$

Величина достоверности аппроксимации уравнения (33) составляет 0,94, уравнения (34) – 0,91.

Таблица 2. Результаты экспериментов по осаждению частиц песка в переходном режиме
Table 2. The results of experiments on the deposition of sand particles in the transient regime

№ п/п	Диаметр частиц песка, d , м	Время осаждения частиц, t , с	Скорость осаждения частиц, V_{oc} , м/с	Критерий Рейнольдса, Re	Критерий Архимеда, Ar
1	0,0025	2,32	0,172414	397,6024	215548,34
2	0,0025	2,42	0,165289	381,1726	215548,34
3	0,0017	2,23	0,179372	281,2814	67775,30
4	0,0025	2,75	0,145455	335,4319	215548,34
5	0,0030	2,03	0,197044	545,2834	372467,53
6	0,0015	2,55	0,156863	217,0442	46558,44
7	0,0020	2,56	0,156250	288,2618	110360,75
8	0,0020	2,43	0,164609	303,6832	110360,75
9	0,0015	2,43	0,164609	227,7624	46558,44
10	0,0011	3,05	0,131148	133,0730	18361,27
11	0,0015	3,27	0,122324	169,2546	46558,44
12	0,0015	2,68	0,149254	206,5159	46558,44
13	0,0011	2,66	0,150376	152,5837	18361,27
14	0,0012	2,82	0,141844	157,0107	23837,92
15	0,0013	3,01	0,132890	159,3580	30307,82
16	0,0011	3,09	0,129450	131,3503	18361,27
17	0,0010	3,64	0,109890	101,3668	13795,09
18	0,0010	2,88	0,138889	128,1163	13795,09
19	0,0011	3,47	0,115274	116,9662	18361,27
20	0,0013	2,95	0,135593	162,5992	30307,82
21	0,0029	2,88	0,138889	371,5374	336448,54
22	0,0025	2,64	0,151515	349,4082	215548,34
23	0,0023	3,16	0,126582	262,7196	157134,74
24	0,0023	2,69	0,148699	308,6223	157134,74
25	0,0030	2,56	0,156250	432,3927	372467,53

Экспериментальная зависимость критерия Рейнольдса от критерия Архимеда при осаждении сферических частиц стекла размером 0,0025-0,004 м в турбулентном режиме, т. е. при $Re > 500$ (рис. 1в) описывается уравнением

$$Re = 0,7519 \cdot Ar^{0,5573} \quad (35)$$

Достоверность аппроксимации уравнения (35) составляет 0,9. Зависимость времени

осаждения t , сек. твердых частиц диаметром 2,5 мм от их плотности (рис. 2) описывается уравнением

$$t = 15,964 - 0,0054 \cdot \rho, \quad (36)$$

где ρ – плотность твердых частиц, кг/м³. Величина достоверности аппроксимации уравнения (36) составляет 0,97.

Таблица 3. Результаты экспериментов по осаждению гранул полиамида в переходном режиме
Table 3. The results of experiments on the deposition of polyamide granules in the transient regime

№ п/п	Средний объемно-поверхностный диаметр частиц полиамида, d_{cp} , м	Время осаждения частиц, t , с	Скорость осаждения частиц, V_{oc} , м/с	Критерий Рейнольдса, Re	Критерий Архимеда, Ar
1	0,0027	10,19	0,039254	95,8488	12553,17
2	0,0029	10,28	0,038911	102,5501	15785,51
3	0,0029	10,22	0,039139	103,1521	15785,51
4	0,0023	11,44	0,034965	72,5694	7709,22
5	0,0027	10,2	0,039216	95,7548	12553,17
6	0,0029	10,44	0,038314	100,9784	15785,51
7	0,0025	10,68	0,037453	84,4775	9894,84
8	0,0028	10,07	0,039722	101,2449	14278,41
9	0,0029	10,04	0,039841	105,6148	16063,74
10	0,0025	11,49	0,034813	79,5217	10277,53
11	0,0027	10,97	0,036463	90,8688	13345,54
12	0,0024	11,77	0,033985	74,5616	9106,39
13	0,0029	10,21	0,039177	106,3702	17258,73
14	0,0027	10,02	0,039920	100,1528	13616,45
15	0,0029	10,25	0,039024	102,8502	15785,51
16	0,0027	10,8	0,037037	92,5311	13446,41
17	0,0023	9,89	0,040445	86,5936	8462,87
18	0,0030	9,72	0,041152	115,1190	18876,08
19	0,0022	11,82	0,033841	68,0778	7020,06
20	0,0025	11,49	0,034813	78,8221	10008,66

Таблица 4. Результаты осаждения сферических частиц стекла в турбулентном режиме
Table 4. The results of the deposition of spherical glass particles in a turbulent regime

№ п/п	Средний диаметр частиц стекла, d_{cp} , м	Время осаждения частиц, t , с	Скорость осаждения частиц, V_{oc} , м/с	Критерий Рейнольдса, Re	Критерий Архимеда, Ar
1	0,0029	1,18	0,338983	906,8031	316070,07
2	0,0026	1,38	0,289855	695,1704	227776,77
3	0,0031	1,25	0,320000	915,0582	386077,47
4	0,0032	1,18	0,338983	1000,6104	424658,01
5	0,0029	1,25	0,320000	856,0222	316070,07
6	0,0029	1,25	0,320000	856,0222	316070,07
7	0,0025	1,38	0,289855	668,4331	202492,72
8	0,0030	1,18	0,338983	938,0722	349907,41
9	0,0030	1,47	0,272109	753,0104	349907,41
10	0,0030	1,18	0,338983	938,0722	349907,41
11	0,0031	1,05	0,380952	1089,3550	386077,47
12	0,0039	1,05	0,380952	1370,4789	768746,59
13	0,0039	0,99	0,404040	1453,5382	768746,59
14	0,0030	1,12	0,357143	988,3261	349907,41
15	0,0030	1,12	0,357143	988,3261	349907,41
16	0,0035	0,99	0,404040	1304,4573	555640,01
17	0,0031	1,12	0,357143	1021,2703	386077,47
18	0,0040	1,05	0,380952	1405,6193	829410,17
19	0,0031	1,12	0,357143	1021,2703	386077,47
20	0,0030	1,18	0,338983	938,0722	349907,41

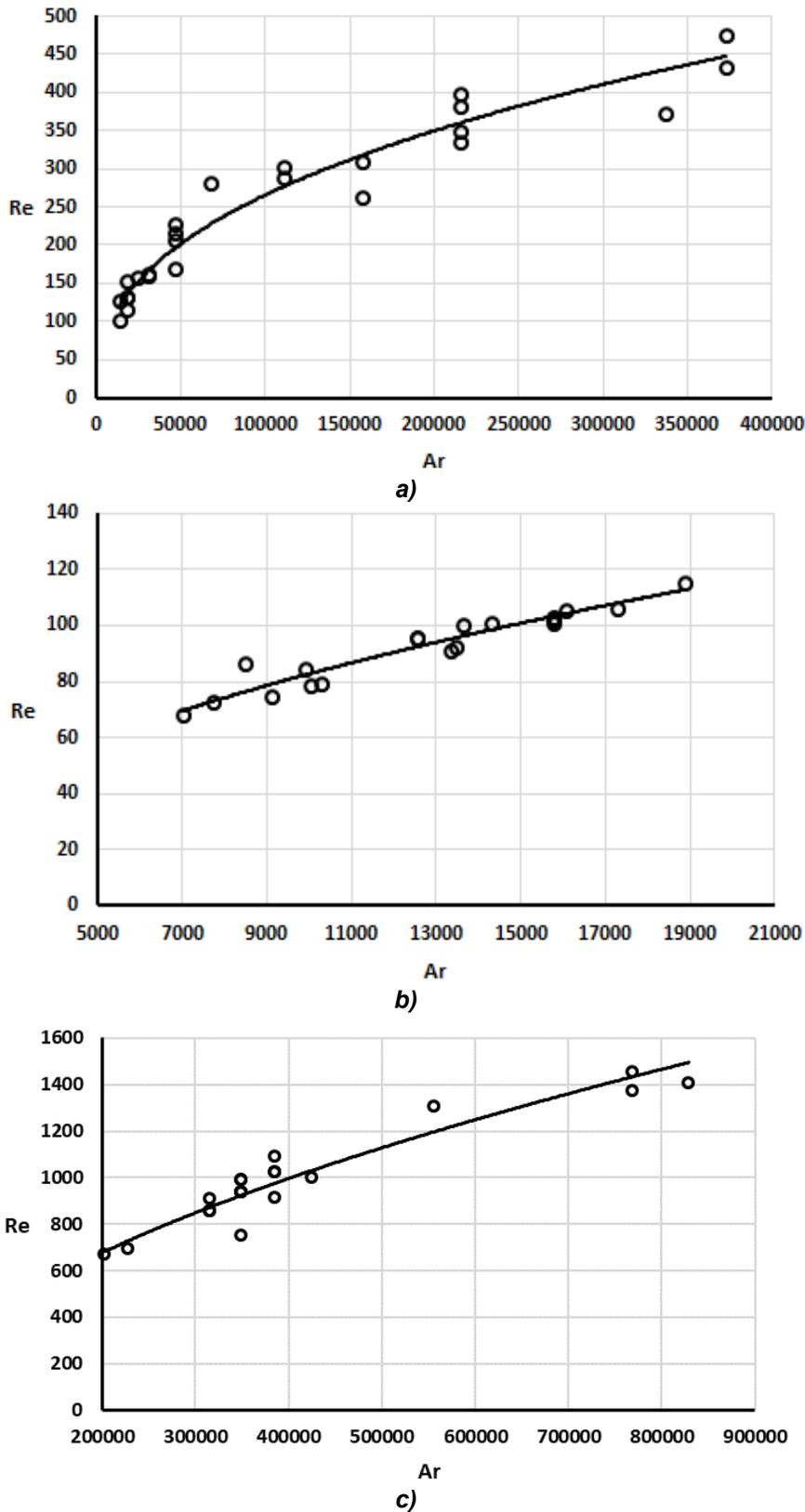


Рис. 1. Экспериментально установленные зависимости критерия Рейнольдса (Re) от критерия Архимеда (Ar) при осаждении частиц песка: а) и гранул полиамида; б) в переходном режиме, сферических частиц стекла; в) в турбулентном режиме
Fig. 1. Experimentally established dependences of the Reynolds criterion (Re) on the Archimedes criterion (Ar) in the deposition of sand particles: a) and polyamide granules; b) in the transient regime, spherical glass particles; c) in turbulent regime

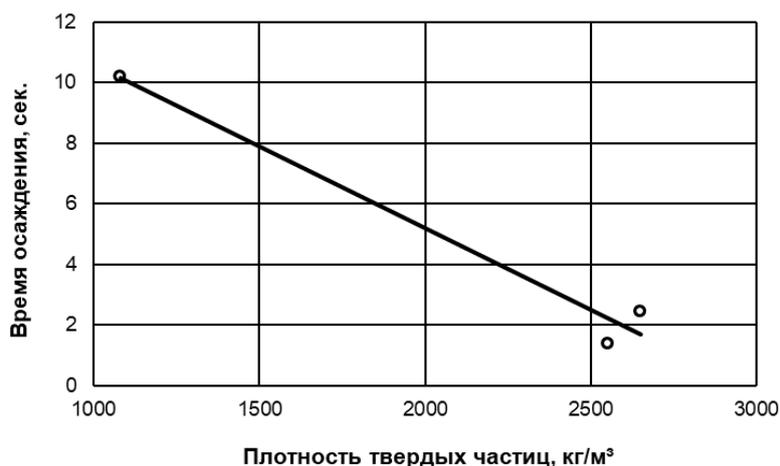


Рис. 2. Зависимость времени осаждения твердых частиц от их плотности
Fig. 2. Dependence of the deposition time of solid particles on their density

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в процессе исследования критериальные уравнения (33–35) и их коэффициенты, а также зависимость (36), могут быть

полезны при проектировании отстойников для механической очистки сточных вод от частиц песка, стекла и полимеров.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Галкин Ю.А., Уласовец Е.А., Басков Е.М., Болтаев В.А., Селицкий Г.А. Совершенствование конструкции и интенсификация работы сооружений для механической очистки промышленных и ливневых сточных вод // Водочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2008. № 1 (1). С. 42–48. EDN: IYEMTM.
2. Буренин В.В. Новые технологии очистки сточных вод от нефтепродуктов и механических примесей // Транспорт и хранение нефтепродуктов. 2007. № 4. С. 19–21. EDN: KXASUN.
3. Новоселов А.М., Новоселова Е.Б. Механическое обезвоживание осадка в процессе очистки сточных вод // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации. Сб. науч. трудов XII-ой Междунар. науч.-практ. конф.: в 4-х т. (г. Курск, 19–20 марта 2015 г.). Курск, 2015. Т. 3. С. 248–250. EDN: TRBEVR.
4. Кадырова А.М. Механические и физико-химические методы очистки сточных вод // Наука в современных условиях: от идеи до внедрения. 2015. № 1. С. 81–85. EDN: WHJNUN.
5. Ильин П.П. Новые возможности в механической очистке сточных вод // Мясные технологии. 2016. № 11 (167). С. 34–35. EDN: XSFBVL.
6. Попов А.В., Назимко Е.И. Механическая очистка сточных вод // Молодой исследователь: вызовы и перспективы. Сб. статей по материалам XXXI Междунар. науч.-практ. конф. М., 2017. № 6 (31). С. 99–102. EDN: YKBRDJ.
7. Варезкин Ю.М., Михайлова А.Н., Сеницына И.Н. Очистка сточных вод. М.: НИИТЭХИМ, 1989. 54 с.
8. Татевосян Г. Применение автономных систем канализации в процессах очистки сточных вод // Водочистка. 2020. № 1. С. 9–17. EDN: DFUCUD.
9. Myrzaliev S.K., Pratama G.N.I.P., Khamidulla A.G. Wastewater Treatment Using Natural Zeolite Materials // Комплексное использование минерального сырья. 2021. № 2 (317). С. 64–68. <https://doi.org/10.31643/2021/6445.19>. EDN: AYQITV.
10. Ксенофонтов Б.С. Проблемы очистки сточных вод промышленных предприятий // Безопасность жизнедеятельности. 2011. № 3. С. 1–24. EDN: NDXPVJ.
11. Tchobanoglous G., Stensel H.D., Tsuchihashi R., Burton F.L. Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. New York: McGraw-Hill, 2013. 2048 p.
12. Дудоров В.Е., Хисматулина Д.Н., Исхакова Э.Р. Методы очистки сточных вод, виды очистных сооружений и инновации в области очистки сточных вод // Наука среди нас. 2019. № 4 (20). С. 43–48. EDN: PREGZQ.
13. Manar Elsayed A.-R., Nermine E M., Reem K.F., Abdul-Raheim Mahmoud A.-R. Wastewater Treatment Methodologies // International Journal of Environment and Agricultural Science. 2019. Vol. 3. Iss. 1. P. 1–25.

14. Zăbavă B.S., Voicu Gh., Ungureanu N., Dincă M., Safta V.V. Basic Equipment for The Mechanical Treatment of Wastewater // International Symposium ISB-INMA TEH, Agricultural and Mechanical Engineering. 2015. P. 349–356.
15. Aqeel A., Zafar J. Comprehensive Note on Various Wastewater Treatment Strategies // Aquatic Contamination: Tolerance and Bioremediation. Hoboken: John Wiley & Sons, 2023. P. 345–365. <https://doi.org/10.1002/9781119989318.ch20>.
16. Nurahuda A.J., Hamidi A.A. The Design for Wastewater Treatment Plant (WWTP) With GPS X Modelling // Cogent Engineering. 2020. Vol. 7. Iss. 1. P. 1–33. <https://doi.org/10.1080/23311916.2020.1723782>.
17. Avijit Mallik, Md. Arman Arefin, Mhia Md. Zaglul Shahadat Design and Feasibility Analysis of a Low-Cost Water Treatment Plant for Rural Regions of Bangladesh // AIMS Agriculture and Food. 2018. Vol. 3. Iss. 3. P. 181–204. <https://doi.org/10.3934/agrfood.2018.3.181>.
18. Чеботарева А.А., Бариева Э.Р., Серазеева Е.В. Особенности очистки городских сточных вод и повышение эффективности очистки // Академический вестник ELPIT. 2021. Т. 6. № 4. С. 12–17. EDN: VFBIQA.
19. Bourgin M., Beck B., Boehler M., Borowska E., Fleiner J., Salhi E. [et al.] Evaluation of A Full-Scale Wastewater Treatment Plant Upgraded with Ozonation and Biological Post-Treatments: Abatement of Micropollutants, Formation of Transformation Products and Oxidation By-Products // Water Research. 2018. Vol. 129. Iss. 1. P. 486–498. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.10.036>.
20. Alaa Fahad, Radin Maya Saphira Mohamed, Bakar Radhi, Mohammed Al-Sahari Wastewater and its Treatment Techniques: An Ample Review // Indian Journal of Science and Technology. 2019. Vol. 12. Iss. 25. P. 1–13. <https://doi.org/10.17485/ijst/2019/v12i25/146059>.
21. Архипов В.А., Усанина А.С., Золоторев Н.Н., Маслов Е.А. Динамика процесса осаждения твердых частиц в жидкости // Материалы XX Юбилейной Междунар. конф. по вычислительной механике и современным прикладным системам (ВМСППС 2017) (г. Алушта, 24–31 мая 2017 г.). Москва, 2017. С. 612–613. EDN: ZSLZTV.
22. Кадирова Г.О., Азизова У.Х., Дехканов З.К. Исследование процесса осаждения и укрупнения твердых частиц на промышленных предприятиях Наманганской области // Universum: химия и биология. 2020. № 4 (70). С. 67–70. EDN: VCCICY.
23. Гасанов А.А., Гамзаева Н.Х. Моделирование процесса осаждения твердой частицы из потока жидкости в горизонтальном гравитационном сепараторе // Химическая технология. 2020. Т. 21. № 5. С. 230–235. <https://doi.org/10.31044/1684-5811-2020-21-5-230-235>. EDN: KWXISI.
24. Вороненко Б.А., Пеленко В.В., Поляков С.В. К вопросу об описании гидромеханического процесса осаждения твердых частиц в жидкой среде // Процессы и аппараты пищевых производств. 2013. № 4. С. 1–6. EDN: SXIRML.
25. Кырлан В.В., Блазнов А.Н., Фролов А.В. Исследование осаждения твердых частиц в процессах очистки сточных флотационных вод // Водоочистка. 2013. № 5. С. 28–33. EDN: PZVQMP.
26. Блазнов А.Н., Кырлан В.В., Фролов А.В., Бажин В.Е., Иванова Д.Б. Экспериментальные исследования осаждения твердых частиц под действием гравитационных и центробежных сил в процессах очистки сточных флотационных вод // Ползуновский вестник. 2013. № 3. С. 293–299. EDN: RDDXUN.
27. Тарасенко А.С., Губанов Н.Д. Направления модернизации схемы механической очистки сточных вод АО «Ангарская нефтехимическая компания» // Молодежный вестник ИрГТУ. 2019. Т. 9. № 1. С. 89–94. EDN: OQODHP.
28. Вайцель А.А. Механические методы очистки сточных вод // Наука, образование и культура. 2019. № 3 (37). С. 13–14. EDN: QJBYEN.
29. Бальчугов А.В., Бадеников А.В., Баранова А.А. Критериальное уравнение процесса седиментации в переходном режиме // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2023. № 17. С. 53–56. EDN: LLJJCP.
30. Бальчугов А.В., Бадеников А.В., Баранова А.А. Экспериментальное исследование процесса седиментации частиц песка в турбулентном режиме // Современные технологии и научно-технический прогресс. 2024. № 11. С. 3–4. EDN: GENIDV.

REFERENCES

1. Galkin Yu.A., Ulasovets E.A., Baskov E.M., Boltaev V.A., Selitskii G.A. Improving The Design and Intensifying the Operation of Structures for The Mechanical Treatment of Industrial and Storm Wastewater. *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie*. 2008;1(1):42-48. (In Russ.). EDN: IYEMTM.
2. Burenin V.V. New Technologies for Treating Wastewater from Petroleum Products and Mechanical Impurities. *Transport i khranenie nefteproduktov*. 2007;4:19-21. (In Russ.). EDN: KXASUN.
3. Novoselov A.M., Novoselova E.B. Mechanical Dewatering of Sludge During Wastewater Treatment. In: *Sovremennye instrumental'nye sistemy, informacionnye tehnologii i innovacii. Sbornik nauchnyh trudov XII-oy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii: v 4-h t = Modern Instrumental Systems, Information*

Technologies and Innovations. Collection of Scientific Papers of The XII International Scientific and Practical Conference: In 4 Volumes. 19–20 March 2015, Kursk. Kursk; 2015. Vol. 3. p. 248–250. (In Russ.). EDN: TRBEVR.

4. Kadyrova A.M. The Mechanical and Physico-Chemical Methods of Sewage Treatment. *Nauka v sovremennykh usloviyakh: ot idei do vnedreniya.* 2015;1:81–85. (In Russ.). EDN: WHJNUN.

5. Il'in P.P. New Opportunities in Mechanical Wastewater Treatment. *Meat Technology.* 2016;11(167):34–35. (In Russ.). EDN: XSFBVL.

6. Popov A.V., Nazimko E.I. Mechanical Wastewater Treatment. In: *Molodoi issledovatel': vyzovy i perspektivy. Sbornik statei po materialam XXXI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Young Researcher: Challenges and Prospects. Collection of Articles Based On the Materials of The XXXI International Scientific and Practical Conference.* Moscow; 2017. Iss. 6 (31). p. 99–102. (In Russ.). EDN: YKBRDJ.

7. Varezkin Yu.M., Mikhailova A.N., Sinityna I.N. *Wastewater Treatment.* Moscow: NIITEKHIM, 1989. 54 p. (In Russ.).

8. Tatevosyan G. Application of Autonomous Sewerage Systems in Wastewater Treatment Processes. *Vodochistka.* 2020;1:9–17. (In Russ.). EDN: DFUCUD.

9. Myrzaliev S.K., Pratama G.N.I.P., Khamidulla A.G. Wastewater Treatment Using Natural Zeolite Materials. *Complex Use of Mineral Resources.* 2021;2(317):64–68. <https://doi.org/10.31643/2021/6445.19>. EDN: AYQITV.

10. Ksenofontov B.S. Purification of Waste Water from Industrial Enterprises. *Scientific, Practical and Educational-Methodical Journal Life Safety.* 2011;3:1–24. EDN: NDXPVJ.

11. Tchobanoglous G., Stensel H.D., Tsuchihashi R., Burton F.L. *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery.* New York: McGraw-Hill, 2013. 2048 p.

12. Dudorov V.E., Khismatulina D.N., Iskhakova E.R. Methods of Wastewater Treatment, Types of Treatment Facilities and Innovations in The Field of Wastewater Treatment. *Nauka sredi nas.* 2019;4(20):43–48. (In Russ.). EDN: PREGZQ.

13. Manar Elsayed A.-R., Nermine E M., Reem K.F., Abdul-Raheim Mahmoud A.-R. Wastewater Treatment Methodologies. *International Journal of Environment and Agricultural Science.* 2019;3(1):1–25.

14. Zăbavă B.S., Voicu Gh., Ungureanu N., Dincă M., Safta V.V. Basic Equipment for The Mechanical Treatment of Wastewater. In: *International Symposium ISB-INMA TEH, Agricultural and Mechanical Engineering.* 2015. P. 349–356.

15. Aqeel A., Zafar J. Comprehensive Note on Various Wastewater Treatment Strategies. In: *Aquatic Contamination: Tolerance and Bioremediation.* Hoboken: John Wiley & Sons, 2023. P. 345–365. <https://doi.org/10.1002/9781119989318.ch20>.

16. Nuralhuda A.J., Hamidi A.A. The Design for Wastewater Treatment Plant (WWTP) With GPS X Modeling. *Cogent Engineering.* 2020;7(1):1–33. <https://doi.org/10.1080/23311916.2020.1723782>.

17. Avijit Mallik, Md. Arman Arefin, Mhia Md. Zaglul Shahadat Design and Feasibility Analysis of a Low-Cost Water Treatment Plant for Rural Regions of Bangladesh. *AIMS Agriculture and Food.* 2018;3(3):181–204. <https://doi.org/10.3934/agrfood.2018.3.181>.

18. Chebotareva A.A., Barieva E.R., Serazeeva E.V. Features of Urban Wastewater Treatment and Increasing Treatment Efficiency. *Akademicheskii vestnik ELPIT.* 2021;6(4):12–17. (In Russ.). EDN: VFBIQA.

19. Bourgin M., Beck B., Boehler M., Borowska E., Fleiner J., Salhi E. [et al.] Evaluation of A Full-Scale Wastewater Treatment Plant Upgraded with Ozonation and Biological Post-Treatments: Abatement of Micropollutants, Formation of Transformation Products and Oxidation By-Products. *Water Research.* 2018;129(1):486–498. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.10.036>.

20. Alaa Fahad, Radin Maya Saphira Mohamed, Bakar Radhi, Mohammed Al-Sahari Wastewater and its Treatment Techniques: An Ample Review. *Indian Journal of Science and Technology.* 2019;12(25):1–13. <https://doi.org/10.17485/ijst/2019/v12i25/146059>.

21. Arkhipov V.A., Usanina A.S., Zolotorev N.N., Maslov E.A. Dynamics of The Process of Sedimentation of Solid Particles in Liquid. In: *Materialy XX Jubilejnoj Mezhdunarodnoj konferencii po vychislitel'noj mehanike i sovremennym prikladnym sistemam (VMSPPS 2017) = Proceedings of the XX Anniversary International Conference on Computational Mechanics and Modern Applied Systems (VMSPPS 2017).* 24–31 May 2017, Alushta. Moscow; 2017. p. 612–613. (In Russ.). EDN: ZSLZTV.

22. Kadirova G.O., Azizova U.Kh., Dekhkanov Z.K. Investigation of The Process of Subsidizing and Fixing Insolvent Demands in Industrial Enterprises of the Namanagan Area. *Universum: khimiya i biologiya.* 2020;4(70):67–70. (In Russ.). EDN: VCCICY.

23. Gasanov A.A., Gamzaeva N.Kh. Imulation of Sedimentation Process of Solid Particle from Liquid Flow in Horizontal Gravity Separator. *Khimicheskaya tekhnologiya.* 2020;21(5):230–235. <https://doi.org/10.31044/1684-5811-2020-21-5-230-235>. (In Russ.). EDN: KWXISI.

24. Voronenko B.A., Pelenko V.V., Polyakov S.V. On The Deposition Process Herein Hydromechanical Solids in A Liquid Medium. *Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv.* 2013;4:1-6. (In Russ.). EDN: SXIRML.
25. Kyrlan V.V., Blaznov A.N., Frolov A.V. Study of Solids Sedimentation in Flotation Wastewater Treatment Processes. *Vodoочистка.* 2013;5:28-33. (In Russ.). EDN: PZVQMP.
26. Blaznov A.N., Kyrlan V.V., Frolov A.V., Bazhin V.E., Ivanova D.B. Experimental Studies of Solid Particle Sedimentation Under the Influence of Gravitational and Centrifugal Forces in Flotation Wastewater Treatment Processes. *Polzunovskii vestnik.* 2013;3:293-299. (In Russ.). EDN: RDDXUN.
27. Tarasenko A.S., Gubanov N.D. Direction of Modernization Scheme for Mechanical Wastewater Treatment of JSC Angarsk Petrochemical Company. *Young Researchers' Journal of ISTU.* 2019;9(1):89-94. (In Russ.). EDN: OQODHP.
28. Vaitsel' A.A. Mechanical Methods of Wastewater Treatment. *Nauka, obrazovanie i kul'tura.* 2019;3(37):13-14. (In Russ.). EDN: QJBYEN.
29. Balchugov A.V., Badenikov A.V., Baranova A.A. Criterion Equation for The Sedimentation Process in The Transition Regime. *Bulletin of The Angarsk State Technical University.* 2023;17:53-56. (In Russ.). EDN: LLJJCP.
30. Balchugov A.V., Badenikov A.V., Baranova A.A. Experimental Study of the Sedimentation Process Sand Particles in Turbulent Regime. *Sovremennye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress.* 2024;11:3-4. (In Russ.). EDN: GENIDV.

Информация об авторах

Бальчугов Алексей Валерьевич,

д.т.н., доцент, проректор,
Ангарский государственный
технический университет,
665835, г. Ангарск, квартал 85а, дом 5, Россия,
e-mail: balchug@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0008-7713-1814>
Author ID: 268365

Баранова Альбина Алексеевна,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры промышленного
и гражданского строительства,
Ангарский государственный
технический университет,
665835, г. Ангарск, квартал 85а, дом 5, Россия,
✉e-mail: baranova2012aa@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5939-3334>
Author ID: 680451

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 05.06.2024.
Одобрена после рецензирования 19.06.2024.
Принята к публикации 24.06.2024.

Information about the authors

Aleksej V. Balchugov,

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Vice-Rector,
Angarsk State Technical University,
5, 85A district, Angarsk 665835,
Russia,
e-mail: balchug@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0008-7713-1814>
Author ID: 268365

Albina A. Baranova,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Industrial and Civil Engineering,
Angarsk State Technical University,
5, 85A district, Angarsk 665835, Russia,
✉e-mail: baranova2012aa@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5939-3334>
Author ID: 680451

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

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

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 05.06.2024.
Approved after reviewing 19.06.2024.
Accepted for publication 24.06.2024.