



---

## Экспериментальные исследования способа получения высокодиспергированной водовоздушной смеси для осуществления флотационной очистки сточных вод

*M.A. Сафонов, Д.С. Жамков*

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

**Аннотация:** Проведены экспериментальные исследования способа получения высокодиспергированной водовоздушной смеси для осуществления флотационной очистки сточных вод с использованием вихревых смесительных устройств. В ходе проведения экспериментальных исследований определялись закономерности изменения окружных скоростей движения потока однофазной жидкости в кольцевом пространстве ствола вихревого смесительного устройства при различных диаметрах центрального стержня. Экспериментальные исследования осуществлялись при различных высотах ствола с эмалевым покрытием проточной части и без него.

**Ключевые слова:** флотация, диспергирование, вихревое смесительное устройство, осевая скорость, окружная скорость, угол падения траектории, эмалевое покрытие.

В процессе очистки нефтесодержащих сточных вод методом флотации могут быть использованы вихревые смесительные устройства (ВСУ), позволяющие получать газожидкостную смесь при сравнительно невысоких затратах энергии и сохранении высокой эффективности работы очистных станций [1-3].

В рамках данной статьи исследовался способ получения высокодиспергированной водовоздушной смеси с использованием ВСУ (рис. 1), которое представляет собой трубчатый смеситель с центральным телом в виде стержня, наличие которого способствует росту диссиpации энергии необходимой для диспергирования воздушных пузырьков при неизменной площади живого сечения [4,5]. Среди конструктивных особенностей исследуемого ВСУ можно также выделить, то что диаметр входной камеры значительно превышает диаметр ствола, в который поступает водовоздушная смесь, что способствует росту значения градиента скорости и соответственно обеспечивает вращательное движения водовоздушной смеси с высокими окружными скоростями [6-8].

В процессе исследований способа получения высокодиспергированной водовоздушной смеси устанавливалась зависимость между величиной диаметра центрального стержня и значениями радиальных скоростей движения жидкости в ВСУ при изменении высоты ствола от 0,5 до 2 м. Исследования проводились для случаев, когда проточная часть смесителя была покрыта слоем эмали и без этого слоя.

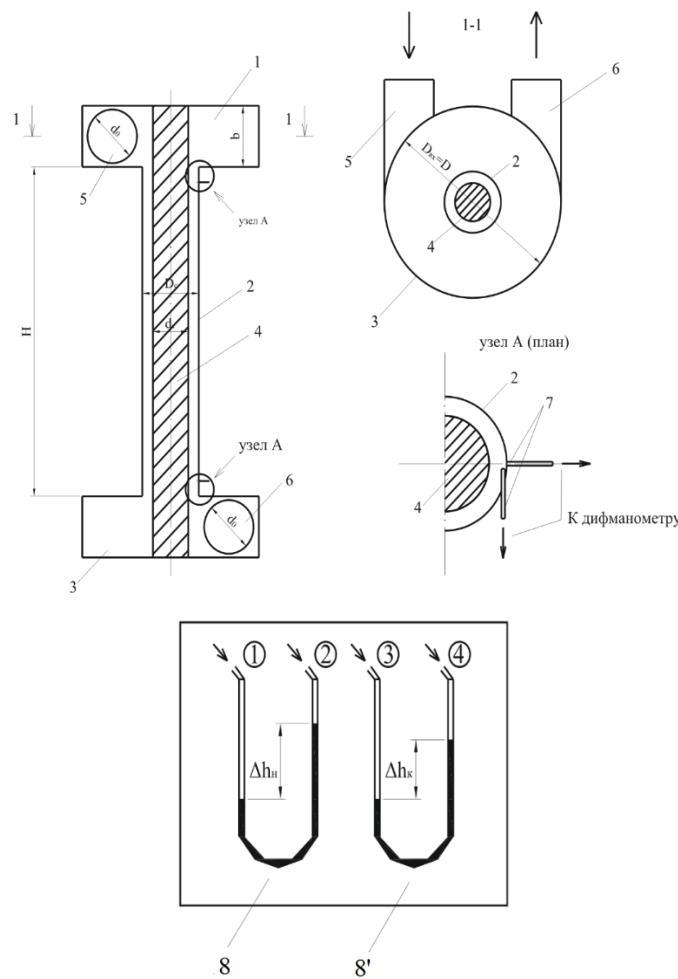


Рис. 1. – Схема исследуемого ВСУ: 1 – камера на вводе, 2 – ствол; 3 – камера на выпуске; 4 – центральный стержень; 5 – патрубок на вводе; 6 – патрубок на выпуске; 7 – трубка Пито-Прандтля; 8, 8' - дифманометры

В ходе исследований жидкость подавалась на ВСУ при давлении, создаваемом насосом, от 450 до 600 кПа, в количестве  $q_1=0,0014 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $q_2=0,001 \text{ м}^3/\text{с}$  и  $q_3=0,0006 \text{ м}^3/\text{с}$ .

При проведении исследований для определения параметров движения водовоздушной смеси использовалась методика, приведенная в [9, 10]: окружная скорость потока на начальных и конечных участках ствола определялась по показаниям дифманометров 8, 8', с учетом плотности жидкости; осевая скорость определялась как отношение расхода к площади поперечного сечения проточной части ствола; угол падения траектории находился как арктангенс отношения осевой и окружной скоростей; коэффициент скорости определялся с учетом геометрических параметров установки, как величина обратная тангенсу угла падения траектории.

Графики зависимостей изменения величины окружной скорости, угла падения траектории, а также коэффициента скорости в начале ствола смесителя  $v_{окр}$  от осевой скорости  $v_{ос}$  при пропуске жидкости без центрального стержня, а также при его наличии показаны на рис. 2, 3. Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что увеличение  $v_{окр}$  в начале ствола ВСУ приводит к увеличению  $v_{ос}$  по линейному закону. При этом угол падения траектории потока зависит от диаметра стержня и подаваемого расхода обратно пропорционально. При диаметре центрального стержня 0,25 м и расходе  $q_1$  величина  $v_{окр}$  имеет максимальное значение и составляет до 13,5 м/с, коэффициент скорости находится в пределах 0,89-0,94; при отсутствии центрального стержня и расходе  $q_3$  величина  $v_{окр}$  имеет минимальное значение и составляет 0,9 м/с, коэффициент скорости составляет 0,39-0,94. Максимальное значение углов падения ( $37^0$ - $39^0$ ) наблюдалось при отсутствии центрального стержня и осевых скоростях в интервале 0,75-1,74 м/с; минимальное ( $18,5^0$ - $20^0$ ) при диаметре центрального стержня 0,25 м и осевой скорости в интервале (2,0-4,5 м/с).

Таким образом при наличии центрального стержня в ВСУ диспергирование пузырьков воздуха происходит с лучшими гидродинамическими характеристиками, что подтверждается высокими

значениями окружных скоростей, в сравнении с отсутствием стержня при прочих равных условиях.

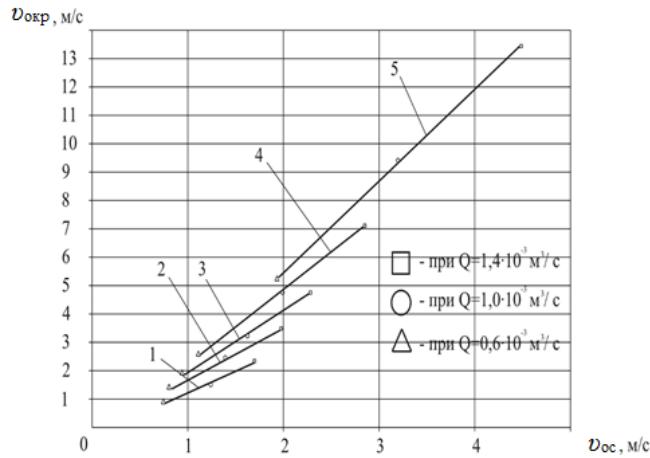


Рис. 2. – Графики зависимостей окружной и осевой скоростей в начале ствола ВСУ: 1 – без наличия центрального стержня; 2, 3, 4 и 5 – с центральным стержнем, при его диаметре 0,1; 0,15; 0,20 и 0,25 м.

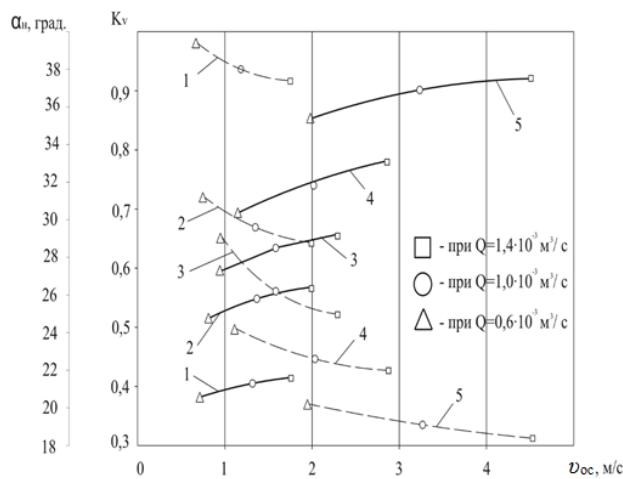


Рис. 3. – Графики зависимостей коэффициента скорости (сплошная) и угла падения траектории потока (пунктир) от величины осевой скорости в начале ствола ВСУ: 1 – без наличия центрального стержня; 2, 3, 4 и 5 – с центральным стержнем, при его диаметре 0,1; 0,15; 0,20 и 0,25 м.

На рис 4-8 представлены графики, полученные по результатам пропуска жидкости через ВСУ при различных высотах ствола и степени покрытия его эмалью. В ходе экспериментов изменялся диаметр центрального стержня и фиксировались значения окружных скоростей и угла

падения траектории потока. Следует также отметить, что высота ствола в ходе исследований была равна 2,0 м.

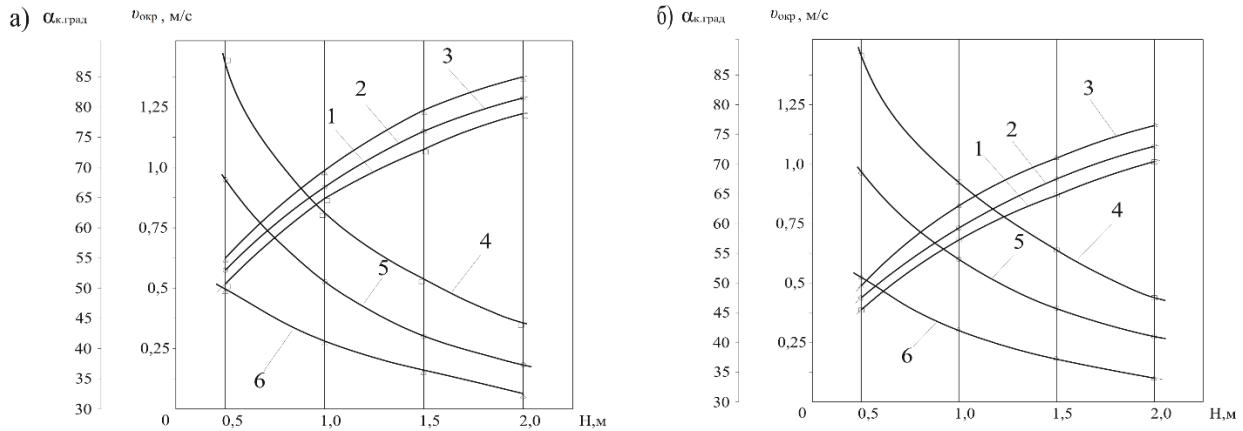


Рис. 4. – Графики зависимостей угла падения траектории потока (1,2,3) и окружной скорости (4,5,6) в конце ВСУ от высоты ствола при отсутствии центрального стержня: а) без эмалевого покрытия; б) с покрытием.

Значение осевой скорости:  $\square$  - 1,75 м/с;  $\circ$  - 1,25 м/с;  $\triangle$  - 0,75 м/с

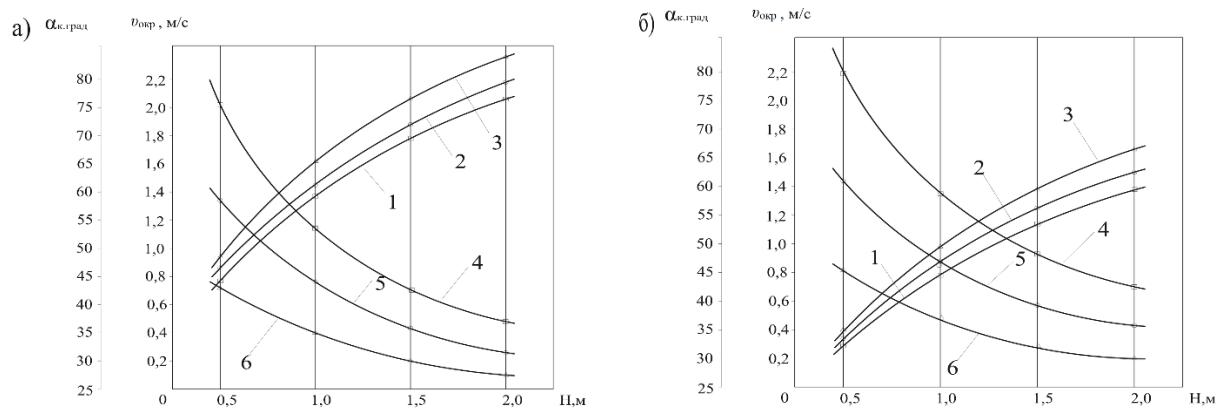


Рис. 5. – Графики зависимостей угла падения траектории потока (1,2,3) и окружной скорости (4,5,6) в конце ВСУ от высоты ствола при диаметре центрального стержня 0,1 м: а) без эмалевого покрытия; б) с покрытием.

Значение осевой скорости:  $\square$  - 1,94 м/с;  $\circ$  - 1,39 м/с;  $\triangle$  - 0,83 м/с

Проанализировав результаты полученных экспериментальных исследований, можем сделать следующие выводы.

Максимальные значения углов падения траектории потока были получены при прохождении ВСУ со стержнем, имеющим диаметр 0,25 м, а

также при полном его отсутствии. Объяснить это можно тем, что при отсутствии стержня угол  $\alpha$  имеет достаточно большое значение –  $37^0\text{--}39^0$ , а при диаметре ствола 0,25 м в узком кольцевом пространстве ствола возникают максимальные гидравлические сопротивления потоку.

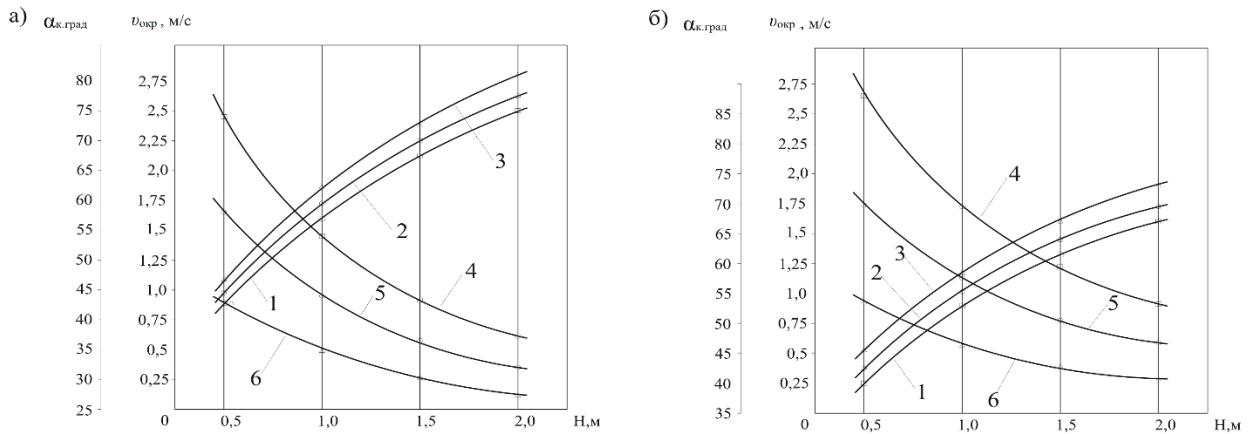


Рис. 6. – Графики зависимостей угла падения траектории потока (1,2,3) и окружной скорости (4,5,6) в конце ВСУ от высоты ствола при диаметре центрального стержня 0,15м: а) без эмалевого покрытия; б) с покрытием.

Значение осевой скорости:  $\square$  - 2,26 м/с;  $\circ$  - 1,6 м/с;  $\triangle$  - 0,97 м/с

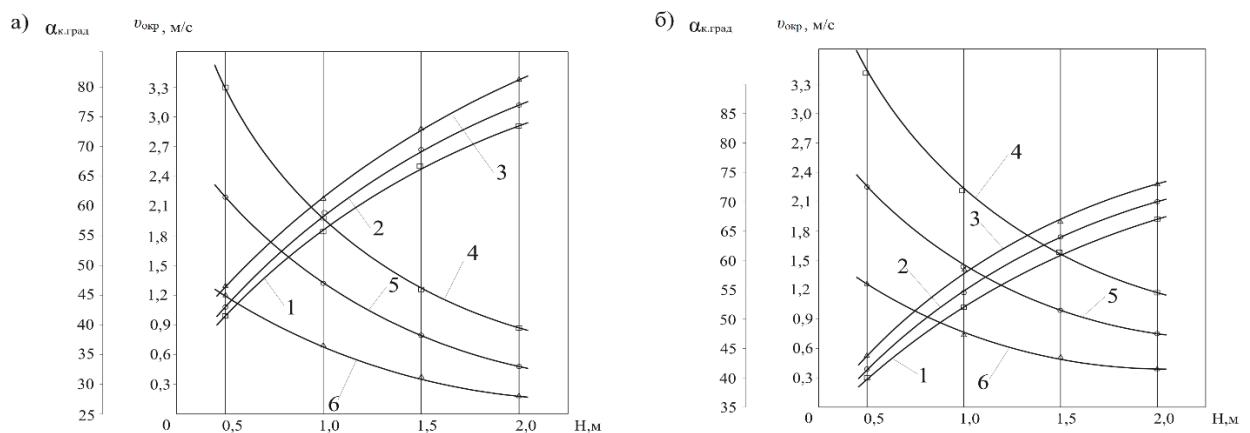


Рис. 7. – Графики зависимостей угла падения траектории потока (1,2,3) и окружной скорости (4,5,6) в конце ВСУ от высоты ствола при диаметре центрального стержня 0,2 м: а) без эмалевого покрытия; б) с покрытием.

Значение осевой скорости:  $\square$  - 2,86 м/с;  $\circ$  - 2,05 м/с;  $\triangle$  - 1,22 м/с

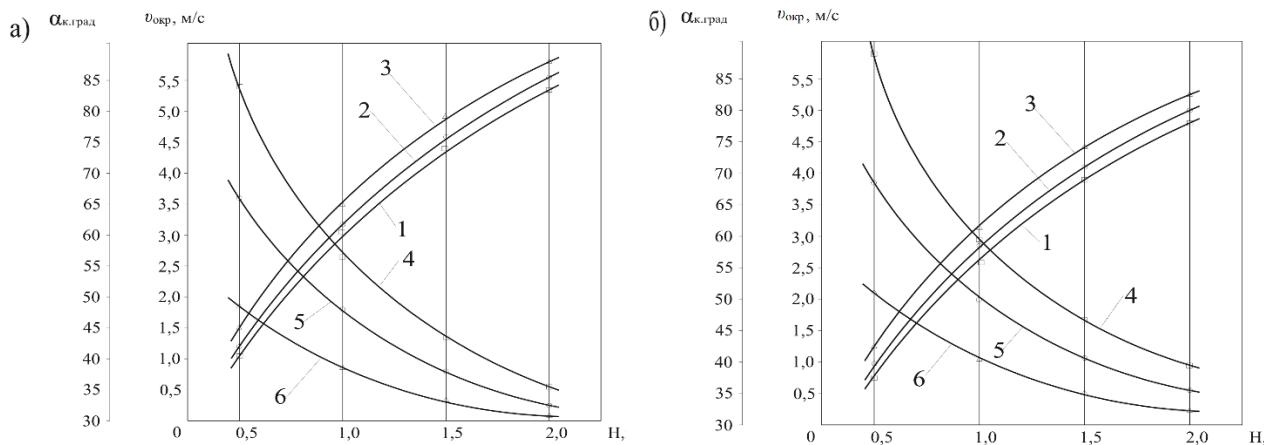


Рис. 8. – Графики зависимостей угла падения траектории потока (1,2,3) и окружной скорости (4,5,6) в конце ВСУ от высоты ствола при диаметре центрального стержня 0,25м: а) без эмалевого покрытия; б) с покрытием.

Значение осевой скорости:  $\square$  - 4,52 м/с;  $\circ$  - 3,23 м/с;  $\triangle$  - 1,94 м/с

Максимальное падение окружной скорости наблюдалось при прохождении ВСУ со стержнем, имеющим диаметр 0,25 м, что также объясняется значительным ростом значений гидравлических сопротивлений потоку в кольцевом пространстве ствола ВСУ, имеющего высокий гидравлический радиус.

Покрытие проточной части ВСУ слоем эмали положительно сказывается на процессе диспергирования воздушных пузырьков. Происходит это, очевидно, по причине того, что гидродинамические условия становятся гораздо более предпочтительными по сравнению с неэмалированными поверхностями в связи с возможностью более полного сохранения кинетической энергии потока водовоздушной смеси в стволе с меньшими гидравлическими сопротивлениями.

### Литература

- Гришин Б.М., Бикунова М.В., Ласьков Н.Н., Вилкова Н.Г., Перельгин Ю.П. Применение вихревых смесительных устройств в технологиях механической и физико-химической очистки сточных вод // Региональная архитектура и строительство. 2016. № 2(27). С. 112-117.

2. Андреев С.Ю., Гришин Б.М., Бикунова М.В., Гришин Л.Б. Исследование вихревых смесительных устройств с эмалевыми покрытиями для интенсификации работы флотационных установок // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2008. № 11-12. С. 43-49.
3. Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. Гидродинамика газожидкостных систем. Москва, 1976. 296 с.
4. Al-Shamrani A., James A., Xiao H. Destabilisation of oil-water emulsions and separation by dissolved air flotation // Water Research. 2002. №. 36 (6). pp. 1503-1512.
5. Jameson G.J. Hydrophobicity and floc density in induced-air flotation for water treatment // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 1999. vol. 151. № 1-2. pp. 269-281.
6. Адельшин А.Б. Энергия потока в процессах интенсификации очистки нефтесодержащих сточных вод. Казань, 1996. 200 с.
7. Рулев Н.Н., Карасев С.В. Гидродинамическое разрушение дисперсных систем // Химия и технология воды. 1990, т.12. № 10. С. 887-890.
8. Arnold S.R., Grubb T.P., Harvey P.J. Recent applications of dissolved air flotation pilot studies and full scale design // Water Science and Technology. 1995. vol. 31. № 3-4. pp. 327-340.
9. Гришин Б.М., Андреев С.Ю., Гарькина, И.А., Ишева Н.И., Бикунова М.В. Флотационная очистка нефтесодержащих производственных сточных вод. Пенза, 2012. 131 с.
10. Кафаров В.В., Глебов М.Е. Математическое моделирование основных процессов химических производств. Москва, 1991. 403 с.

### References

1. Grishin B.M., Bikunova M.V., Laskov N.N., Vilkova N.G., Perelygin Yu.P. Regionalnaya arkhitektura i stroitelstvo. 2016. № 2(27). pp. 112-117.



2. Andreyev S.Yu., Grishin B.M., Bikunova M.V., Grishin L.B. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitelstvo. 2008. № 11-12. pp. 43-49.
3. Kutateladze S.S., Styrikovich M.A. Gidrodinamika gazozhidkostnykh sistem [Hydrodynamics of gas-liquid systems]. Moskva, 1976. 296 p.
4. Al-Shamrani A., James A., Xiao H. Water Research. 2002. №. 36 (6). pp. 1503-1512.
5. Jameson G.J. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 1999. vol. 151. № 1-2. pp. 269-281.
6. Adelshin A.B. Energiya potoka v protsessakh intensifikatsii ochistki neftesoderzhashchikh stochnykh vod [Flow energy in the processes of intensification of oil-containing wastewater treatment]. Kazan, 1996. 200 p.
7. Rulev N.N., Karasev S.V. Khimiya i tekhnologiya vody. 1990, vol.12. № 10. pp. 887-890.
8. Arnold S.R., Grubb T.P., Harvey P.J. Water Science and Technology. 1995. vol. 31. № 3-4. pp. 327-340.
9. Grishin B.M., Andreyev S.YU., Garkina, I.A., Isheva N.I., Bikunova M.V. Flotatsionnaya ochistka neftesoderzhashchikh proizvodstvennykh stochnykh vod [Flotation treatment of oil-containing industrial wastewater]. Penza, 2012. 131 p.
10. Kafarov V.V., Glebov M.E. Matematicheskoye modelirovaniye osnovnykh protsessov khimicheskikh proizvodstv [Mathematical modeling of the main processes of chemical production]. Moskva, 1991. 403 p.

**Авторы согласны на обработку и хранение персональных данных.**

**Дата поступления: 29.11.2025**

**Дата публикации: 8.01.2026**