

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.128.96>

## ПРИМЕНЕНИЕ ЭЖЕКЦИОННОЙ СИСТЕМЫ АЭРАЦИИ ПРИ ФЛОТАЦИОННОЙ ОЧИСТКЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТОЧНЫХ ВОД

Научная статья

Антонова Е.С.<sup>1,\*</sup>, Карпикова В.О.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ORCID : 0000-0003-4632-7984;

<sup>1,2</sup>Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (e.s.antonova[at]bmstu.ru)

### Аннотация

В статье рассмотрен вопрос повышения эффективности флотационной очистки поверхностного стока. Описана проблема проектирования очистных систем поверхностных сточных вод. Представлены характерные загрязнения поверхностного стока в зависимости от территории водоотведения. Объяснена сущность способа очистки сточной воды с помощью флотации. Рассмотрена эжекционная система аэрации как одна из наиболее простых в эксплуатации и наименее энергозатратных систем, применяемых во флотационной технологии. Предложено использование аэратора и диспергатора для дробления пузырьков воздуха и их более равномерного распределения по камере аэрации с целью повышения эффективности очистки. Проведён эксперимент по очистке модельной сточной воды для определения времени процесса и параметров системы аэрации (характеристики аэратора, диспергатора). Приведены сравнительные данные, подтверждающие целесообразность использования диспергатора для повышения эффективности очистки поверхностных сточных вод.

**Ключевые слова:** флотационная очистка, поверхностные сточные воды, эжекционная система аэрации, диспергатор, эффективность очистки.

## THE APPLICATION OF AERATION EJECTOR SYSTEM FOR FLOTATION TREATMENT OF SURFACE WASTEWATER

Research article

Antonova E.S.<sup>1,\*</sup>, Karpikova V.O.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ORCID : 0000-0003-4632-7984;

<sup>1,2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

\* Corresponding author (e.s.antonova[at]bmstu.ru)

### Abstract

The article addresses the issue of improving the efficiency of flotation treatment of surface run-off. The problem of designing surface run-off treatment systems is described. The characteristic pollution of surface run-off depending on the territory of water disposal is presented. The essence of the method of wastewater flotation treatment is explained. The aeration ejector system as one of the simplest in operation and the least energy-consuming systems used in flotation technology is reviewed. The use of an aerator and disperser for crushing air bubbles and their more even distribution over the aeration chamber in order to increase the purification efficiency is proposed. An experiment on model wastewater treatment to determine the process time and aeration system parameters (characteristics of aerator, disperser) is carried out. Comparative data are presented, confirming the feasibility of using dispersant to improve the efficiency of surface wastewater treatment.

**Keywords:** flotation treatment, surface wastewater, aeration ejector system, disperser, treatment efficiency.

### Введение

Проблема проектирования систем очистки поверхностных сточных вод возникает, в первую очередь, из-за характерной неравномерности выпадения осадков и нестабильного состава загрязнений. По этой причине системы водосбора и обработки часто не справляются с поставленной задачей. Состав поверхностного стока зависит от территории водоотведения. Для территорий предприятий первой группы, например, автотранспортных предприятий, предприятий лёгкой, пищевой промышленности и т.д., и селитебных зон характерными загрязнениями являются взвешенные вещества и нефтепродукты [1], [2], [3]. Согласно [4] поверхностный сток с территории жилой застройки содержит 400-1000 мг/л взвешенных веществ и 7-15 мг/л нефтепродуктов; вблизи автомобильных магистралей содержание взвешенных веществ составляет 800-1400 мг/л, нефтепродуктов – 15-20 мг/л. Данные, приведённые в работе [1], показывают, что концентрации загрязнений в поверхностном стоке с автомагистралей с интенсивным движением грузового автомобильного транспорта, мостов и эстакад может изменяться в очень широких диапазонах: взвешенные вещества – 25-1000 мг/л, нефтепродукты – 1,5-125 мг/л. Поверхностные сточные воды предприятий второй группы (предприятия нефтеперерабатывающей, нефтехимической, микробиологической промышленности) имеют специфические загрязнения, например, тяжёлые металлы, фенолы, мышьяк [1], [2], [3]. В ожидаемый состав сточных вод также вносят изменения урбанизация и рост промышленного производства, что приводит к устареванию существующих систем очистки.

Примерный состав поверхностных сточных вод [5] и предельно-допустимые концентрации при сбросе в централизованные ливневые системы водоотведения согласно Постановлению Правительства РФ от 29.07.2013 № 644

«Об утверждении Правил холодного водоснабжения и водоотведения и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации» приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Показатели поверхностного стока

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.128.96.1>

Показатель	Единица измерения	Концентрация в стоке	Норматив
Взвешенные вещества	мг/л	50-1000	300
Нефтепродукты	мг/л	25-50	8
БПК <sub>20</sub>	мгО <sub>2</sub> /л	30-60	30
ХПК	мгО <sub>2</sub> /л	100-150	100

Анализ материалов, приведенных в [5], [6], [7], [8], показал, что схемы очистки поверхностных сточных вод являются многостадийными и, как правило, содержат следующие этапы: отстаивание, реагентная обработка воды, флотационная очистка, механическая фильтрация, сорбционная очистка. Очистка поверхностной сточной воды во флотационных аппаратах часто является основной стадией. Сущность флотационной очистки заключается в использовании свойства гидрофобности загрязнений: гидрофобные частицы прилипают к воздушным пузырькам и поднимаются вместе с ними, образуя пенный слой на поверхности. Эффективность флотационной очистки зависит от ряда факторов, которыми являются параметры системы аэрации (размер пузырьков, интенсивность аэрации, равномерность распределения пузырьков по камере), а также параметры загрязнений (гидрофобность, плотность, размер частиц загрязнений и др.) [9], [10], [11].

Совершенствование флотационной стадии является важным вопросом, так как повышение эффективности флотационной очистки позволяет уменьшать занимаемую очистным оборудованием площадь, снижать нагрузку на фильтры, что приводит к увеличению времени работы до регенерации.

При разработке систем очистки стремятся использовать более простые и дешёвые аппараты, позволяющие добиться необходимой эффективности. Одним из наиболее простых способов флотации считается эжекционная флотация. Насыщение воды пузырьками воздуха происходит за счет её прохождения через эжектор, имеющий сужение. В зону пониженного давления подсасывается воздух, что позволяет отказаться от дополнительных устройств, таких как компрессор. Полученные с помощью эжектора пузырьки имеют довольно крупные размеры (более 1000 мкм) и неравномерно распределены по камере, что является недостатком [12], [13]. Для повышения эффективности требуется дробление пузырьков до размеров, не превышающих 100 мкм [14].

В статье предлагается использование аэратора, устанавливаемого после эжектора, для увеличения скорости потока, что позволит уменьшить размер пузырьков. После аэратора может быть установлен диспергатор, представляющий из себя цилиндрическое тело с рифлёной поверхностью, который производит более эффективное дробление. Применение диспергатора также приводит к более равномерному распределению пузырьков по камере аэрации. Предлагаемая система позволяет получать полидисперсное распределение пузырьков, характеризующееся несколькими значениями средних размеров. Полученные в результате ранее проведённых исследований [12] размеры пузырьков представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Характеристики водовоздушной смеси

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.128.96.3>

Вид аэрирующего устройства	Параметр	1 группа пузырьков	2 группа пузырьков	3 группа пузырьков	4 группа пузырьков
Аэратор	Средний размер фракции, мкм	80±19	120±12	150±14	Более 300
	Процентное содержание, %	37,3	13,4	11,5	37,8
Аэратор и диспергатор	Средний размер фракции, мкм	70±15	120±15	Более 150	-
	Процентное содержание, %	68,7	27,4	3,9	-

Применение диспергатора позволяет добиться более мелких размеров пузырьков при повышении их процентного содержания. Пузырьки из первых двух фракций являются более эффективными для процессов флотации.

Целью данного исследования является определение целесообразности применения диспергатора при очистке поверхностной сточной воды.

**Методы и принципы исследования**

Экспериментальные исследования проводились на лабораторной установке, схема которой представлена на рисунке 1, а общий вид – на рисунке 2.

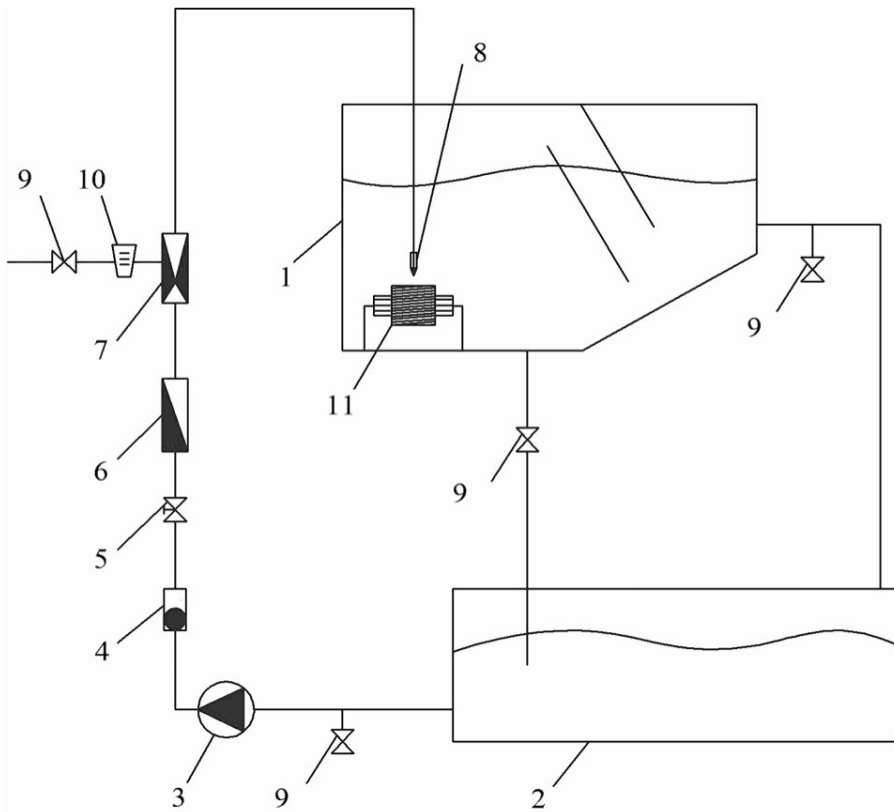


Рисунок 1 - Схема лабораторной установки

1 – камера аэрации; 2 – резервуар воды; 3 – насос; 4 – обратный клапан; 5 – регулирующий вентиль; 6 – водосчетчик; 7 – эжектор; 8 – аэратор; 9 – шаровой кран; 10 – ротаметр; 11 – диспергатор  
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.128.96.4>

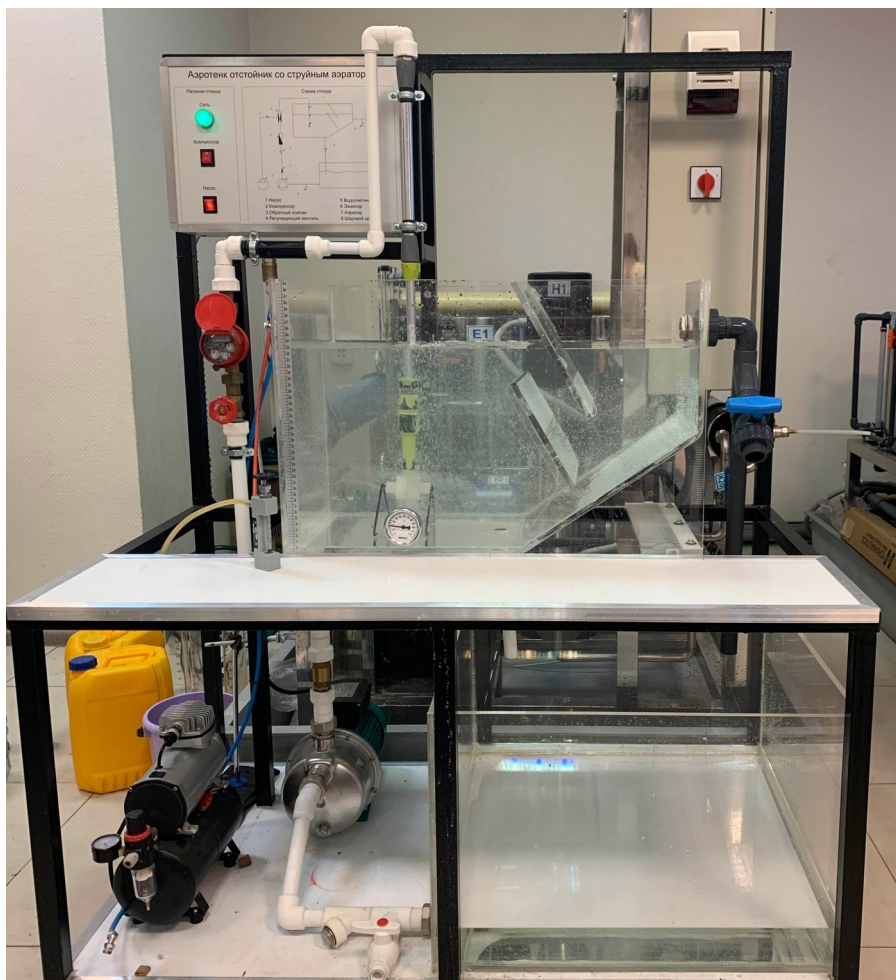


Рисунок 2 - Общий вид лабораторной установки  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.128.96.5>

Камера аэрации 1 и резервуар 2 заполняются водопроводной водой. Вода из резервуара 2 откачивается насосом 3 и подается в камеру аэрации 1. При этом поток проходит через эжектор 7 и аэратор 8. Эжектор имеет сужение, в котором возникает разрежение, за счет чего из окружающей среды подсасывается воздух. Для дробления пузырьков после аэратора 8 ставится диспергатор 11. В камере аэрации подготавливается рабочая жидкость. Для флотационной очистки воды предусмотрена отдельная емкость.

При проведении эксперимента расход воздуха составил  $0,06 \text{ м}^3/\text{ч}$ , расход воды –  $0,74 \text{ м}^3/\text{ч}$ . В эксперименте был использован диспергатор диаметром  $D_d = 40 \text{ мм}$  и длиной  $L_d = 40 \text{ мм}$ . Аэратор представлял из себя сопло с кольцевым отверстием, используемым для увеличения площади контакта струи с поверхностью диспергатора, с внутренним диаметром  $d_a = 4 \text{ мм}$  и наружным диаметром  $D_a = 6 \text{ мм}$ .

Эксперимент по очистке сточной воды проходил в периодическом режиме при соотношении объемов рабочей жидкости и очищаемой воды 1:3.

Масса химических веществ, используемых в эксперименте, была определена с помощью прецизионных весов OHAUS Pioneer PA213C. Измерительный прибор имеет 2 класс точности. Для измерения мутности воды был использован анализатор жидкости Флюорат-02-5М. Ротаметр лабораторного стенда, мерные лабораторные трубки, измерительные цилиндры, использованные в ходе эксперимента, имеют 2 класс точности.

Для исследования была приготовлена модельная сточная вода с характеристиками поверхностной сточной воды первой группы предприятий. Для приготовления 1 л модельной сточной воды в водопроводную воду были добавлены 1 г грунта и 0,075 мл моторного масла, после чего проводилось тщательное перемешивание.

В качестве коагулянта использовался 5 % водный раствор «Аква-Аурата 30». Для его приготовления к 100 мл воды было добавлено 5 г порошкообразного вещества. Флокулянт являлся 0,01% водный раствор Праестола 2540 (0,01 г вещества на 100 мл воды). Приготовление флокулянта аналогично приготовлению коагулянта.

Дозы реагентов были определены экспериментально: доза коагулянта – 3,5 мл/л стока, доза флокулянта – 1 мл/л стока.

Было проведено две серии опытов с использованием диспергатора и без диспергатора. Каждый опыт был повторён по три раза. Пробы воды для анализа мутности отбирались каждые 5 минут. Отсчёт времени был начат сразу после добавления рабочей жидкости к сточной воде, находящейся в отдельной емкости.

### Основные результаты и обсуждение

На рисунке 3 представлена зависимость мутности от времени очистки для эксперимента с использованием диспергатора и без него. Погрешность измерений не превысила 15 % с вероятностью 0,95.

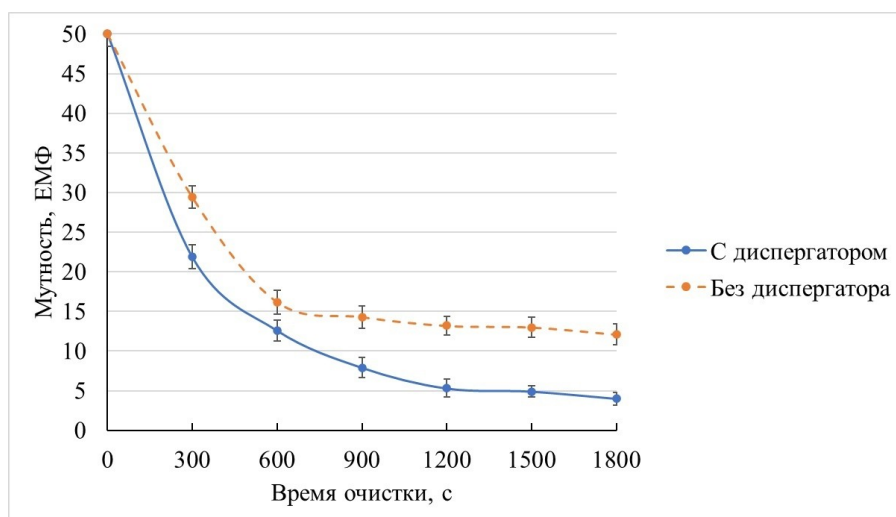


Рисунок 3 - Зависимость мутности от времени очистки  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.128.96.6>

Полученные результаты показали, что время флотационной очистки составило 20 минут. При дальнейшем увеличении времени мутность практически не изменялась. Эффективность очистки при времени флотации 20 минут составила: при использовании диспергатора – 89%, при отсутствии диспергатора – 73%. Применение диспергатора позволило повысить эффективность флотационной очистки на 16%.

Результаты получены при скорости истечения водовоздушной смеси из сопла 13 м/с, газосодержание составило 8%. При меньших скоростях истечения (при использовании аэраторов с отверстиями большего диаметра либо при уменьшении расхода воды) наблюдалось менее равномерное распределение пузырьков воздуха в камере аэрации. При скоростях менее 5 м/с всплытие пузырьков наблюдалось в радиусе 10-12 см от аэратора. Повышение скорости истечения приводило к увеличению равномерно аэрируемой площади. Наиболее равномерное распределение мелкодисперсных пузырьков во всей камере было получено при скоростях истечения 10-13 м/с при этом газосодержание составляло 6-8% соответственно. Также необходимо отметить, что при увеличении скорости за счёт увеличения расхода воды при использовании одного и того же аэратора происходит увеличение расхода воздуха, подсасываемого эжектором, при этом повышение газосодержания приводит к увеличению размеров пузырьков.

Для обеспечения высокой эффективности очистки при проектировании предлагаемой системы аэрации рекомендуется принимать следующие параметры: скорость истечения водовоздушной смеси из сопла – 10-13 м/с, газосодержание 6-8 %, соотношения размеров аэратора и диспергатора  $D_d/D_a$ ,  $L_d/D_a$  – 6-7.

### Заключение

В работе отмечено, что флотационный способ является наиболее распространённой основной стадией очистки поверхностных сточных вод. Наиболее простым способом флотации является флотация с применением эжектора. Рассмотрен вопрос очистки поверхностного стока с помощью эжекционной флотации. Приведены главные недостатки: большой размер пузырьков и их неравномерное распределение. Проведен эксперимент на лабораторной установке с эжектором и аэратором, позволяющим уменьшить размер пузырьков. Эффективность флотационной очистки определена в серии опытов с использованием диспергатора и без диспергатора. В результате эксперимента установлено, что диспергатор позволил повысить эффективность очистки на 16%. Требуемое время очистки составило 20 минут, эффективность – 89%. Даны рекомендации по определению параметров предлагаемой системы аэрации: скорость истечения водовоздушной смеси из сопла аэратора – 10-13 м/с, газосодержание 6-8 %, соотношения размеров аэратора и диспергатора  $D_d/D_a$ ,  $L_d/D_a$  – 6-7.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

### Список литературы / References

1. Феофанов Ю.А. Особенности формирования состава поверхностных сточных вод и выбор сооружений по их очистке. / Ю.А. Феофанов, Б.Г. Мишуков // Вода и экология: проблемы и решения. — 2017. — 3. — с. 49-66. — DOI: 10.23968/2305-3488.2017.21.3.49-66
2. СП 32.13330.2018 Канализация. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85

3. Рекомендации по расчету систем сбора, отведения и очистки поверхностного стока селитебных территорий, площадок предприятий и определению условий выпуска его в водные объекты. — М.: ВОДГЕО, 2015. — 146 с.
4. Яблокова М.А. Совершенствование процессов и агрегатов для локальной очистки поверхностных стоков. / М.А. Яблокова, Н.С. Зайцев, Р.А. Хасаев // Современные наукоемкие технологии. — 2019. — 7. — с. 110-113.
5. Каталог водоочистного оборудования. — М.: Экосистема, 2020. — 296 с.
6. Найман М.О. Установки для очистки поверхностных сточных вод / М.О. Найман, С.М. Найман // Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли-АКТО-2016; — Казань: Издательство Академии наук РТ, 2016. — с. 886-888.
7. Ксенофонтов Б.С. Флотационная очистка поверхностных сточных вод и почвы на предприятиях энергетики / Б.С. Ксенофонтов // Экология в энергетике-2005; — М.: Издательский дом МЭИ, 2005. — с. 143-147.
8. Маркевич С.Е. Методы предварительной очистки воды / С.Е. Маркевич, Е.И. Смыкал, Д.А. Хлопкова и др. // Актуальные проблемы энергетики: материалы 77-й научно-технической конференции студентов и аспирантов; — Минск: Белорусский национальный технический университет, 2021. — с. 89-93.
9. Kouachi S. Yoon-Luttrell collision and attachment models analysis in flotation and their application on general flotation kinetic model. / S. Kouachi, M. Bouhenguel, A. Amirech et al. // Desalination. — 2010. — 264(3). — p. 228-235. — DOI: 10.1016/j.desal.2010.06.057
10. Shahbazi B. The effect of bubble surface area flux on flotation efficiency of pyrite particles. / B. Shahbazi, B. Rezai, S.M.J. Koleini et al. // Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering. — 2013. — 32(2). — p. 109-118.
11. Shawwa A.R. Dissolved air flotation model for drinking water treatment. / A.R. Shawwa, D.W. Smith // Canadian Journal of Civil Engineering. — 2000. — 27(2). — p. 373-382.
12. Антонова Е.С. Повышение эффективности очистки воды в пневмогидравлических флотационных установках. / Е.С. Антонова, Д.В. Сазонов // Вода и экология: проблемы и решения. — 2019. — 1(77). — с. 3-9. — DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.1.3-9
13. Ксенофонтов Б.С. Исследование дисперсного состава водовоздушной смеси, генерируемой эжекционной системой аэрации, в процессе флотационной очистки сточной воды. / Б.С. Ксенофонтов, Е.С. Антонова // Безопасность в техносфере. — 2016. — 5(4). — с. 38-44.
14. Андреев С.Ю. Совершенствование флотационной очистки производственных сточных вод. / С.Ю. Андреев, И.А. Гарькина, А.А. Петрунин // Региональная архитектура и строительство. — 2014. — 2. — с. 157-162.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Feofanov Yu.A. Osobennosti formirovaniya sostava poverkhnostny'x stochny'x vod i vy'bor sooruzhenij po ix ochistke [Features of Formation of Surface Sewage Composition and Selection of Facilities for Their Purification]. / Yu.A. Feofanov, B.G. Mishukov // Voda i e'kologiya: problemy' i resheniya [Water and Ecology: Problems and Solutions]. — 2017. — 3. — p. 49-66. — DOI: 10.23968/2305-3488.2017.21.3.49-66 [in Russian]
2. SP 32.13330.2018 Kanalizaciya. Naruzhnye seti i sooruzheniya. Aktualizirovannaya redakciya SNIIP 2.04.03-85 [SP 32.13330.2018 Sewerage. External networks and structures. Updated edition SNIIP 2.04.03-85]. [in Russian]
3. Rekomendacii po raschetu sistem sbora, otvedeniya i ochistki poverkhnostnogo stoka selitebnyh territorij, ploshchadok predpriyatij i opredeleniyu uslovij vypuska ego v vodnye ob'ekty [Recommendations for the calculation of systems for collecting, diverting and surface wastewater treatment in residential areas, enterprise sites and determining the conditions for its release into water bodies.]. — М.: VODGEO, 2015. — 146 p. [in Russian]
4. Yablokova M.A. Sovershenstvovanie processov i agregatov dlya lokal'noj ochistki poverkhnostny'x stokov [Improvement of Processes and Units for Local Treatment of Surface Water]. / M.A. Yablokova, N.S. Zajcev, R.A. Xasaev // Sovremennyye naukoemkie tehnologii [Modern High Technologies]. — 2019. — 7. — p. 110-113. [in Russian]
5. Katalog vodoochistnogo oborudovaniya [Catalog of Water Treatment Equipment]. — М.: Экосистема, 2020. — 296 p. [in Russian]
6. Naiman M.O. Ustanovki dlya ochistki poverkhnostnykh stochnykh vod [Equipment for Cleaning of Surface Wastewater] / M.O. Naiman, S.M. Naiman // New technologies, Materials and Equipment of the Russian Aerospace Industry-ASTE-2016; — Kazan: Publishing House of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, 2016. — p. 886-888. [in Russian]
7. Ksenofontov B.S. Flotatsionnaya ochistka poverkhnostnykh stochnykh vod i pochvi na predpriyatiyakh energetiki [Flotation Treatment of Surface Wastewater and Soil at Energy Enterprise] / B.S. Ksenofontov // Ecology in Energy-2005; — М.: Publishing House of MEI, 2005. — p. 143-147. [in Russian]
8. Markevich S.E. Metodi predvaritel'noy ochistki vodi [Water Pretreatment Methods] / S.E. Markevich, Ye.I. Smikal, D.A. Khlopokova et al. // Actual Problems of Energy: materials of the 77th Scientific and Technical Conference of Students and Graduate Students; — Minsk: Belarusian National Technical University, 2021. — p. 89-93. [in Russian]
9. Kouachi S. Yoon-Luttrell collision and attachment models analysis in flotation and their application on general flotation kinetic model. / S. Kouachi, M. Bouhenguel, A. Amirech et al. // Desalination. — 2010. — 264(3). — p. 228-235. — DOI: 10.1016/j.desal.2010.06.057
10. Shahbazi B. The effect of bubble surface area flux on flotation efficiency of pyrite particles. / B. Shahbazi, B. Rezai, S.M.J. Koleini et al. // Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering. — 2013. — 32(2). — p. 109-118.
11. Shawwa A.R. Dissolved air flotation model for drinking water treatment. / A.R. Shawwa, D.W. Smith // Canadian Journal of Civil Engineering. — 2000. — 27(2). — p. 373-382.
12. Antonova E.S. Povyshenie effektivnosti ochistki vody' v pnevmogidravlicheskiykh flotatsionny'x ustanovkakh [Increasing Wastewater Treatment Efficiency in Pneumohydraulic Flotators]. / E.S. Antonova, D.V. Sazonov // Voda i e'kologiya: problemy' i resheniya [Water and Ecology: Problems and Solutions]. — 2019. — 1(77). — p. 3-9. — DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.1.3-9 [in Russian]

13. Ksenofontov B.S. Issledovanie dispersnogo sostava vodovozdushnoj smesi, generiruemoj e'zhekcionnoj sistemoj ae'racii, v processe flotacionnoj ochildki stochnoj vody' [Research of Disperse Composition of Air-and-water Mix Generated by Ejector Aeration System during Wastewater Flootation Treatment]. / B.S. Ksenofontov, E.S. Antonova // Bezopasnost' v texnosfere [Safety in the Technosphere]. — 2016. — 5(4). — p. 38-44. [in Russian]

14. Andreev S.Yu. Sovershenstvovanie flotacionnoj ochildki proizvodstvenny'x stochny'x vod [Improvement of Wastewater Flootation Purification]. / S.Yu. Andreev, I.A. Gar'kina, A.A. Petrunin // Regional'naya arxitektura i stroitel'stvo [Regional Architecture and Engineering]. — 2014. — 2. — p. 157-162. [in Russian]