

УДК 628.31
DOI: 10.18799/24131830/2025/6/4733
Шифр специальности ВАК: 1.5.15
Обзорная статья

Разработка технологии физико-химической очистки сточных вод пищевых производств

С.В. Азопков, Ю.Д. Пересунко[✉], Н.Е. Кручинина

Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, Россия, г. Москва

[✉]yperesunko@mail.ru

Аннотация. Актуальность. Традиционные коагулянты для водоочистки на основе солей алюминия или железа уже не способны решать поставленные перед ними задачи, а ужесточение требований к очищенной воде диктует необходимость в поиске новых методов и реагентов для процессов водоочистки. Наиболее перспективным направлением повышения эффективности очистки воды является внедрение комплексных титансодержащих реагентов, продемонстрировавших высокую эффективность в процессах очистки сточных вод сложного состава. **Цель.** Основной целью работы является сравнение коагуляционной эффективности традиционных и комплексных титансодержащих коагулянтов в процессах очистки сточных вод молочной и масложировой промышленности. **Результаты и выводы.** Исследованы эффективности традиционных алюминийсодержащих коагулянтов (оксихлорид алюминия, хлорид железа (III)) и комплексного сульфатно-хлоридного коагулянта на базе солей алюминия, модифицированного соединениями титана. Показано, что применение комплексного сульфатно-хлоридного коагулянта позволяет наиболее эффективно снижать показатель химического потребления кислорода, отражающий содержание органических соединений в воде, в то время как традиционные коагулянты значительно уступают в эффективности снижения данного показателя. Применение комплексного реагента позволило значительно минимизировать остаточное содержание взвешенных веществ при меньших эффективных дозах коагулянта (60–80 мг/дм³ для комплексного сульфатно-хлоридного коагулянта – эффективность очистки 95–98 % против 80 мг/дм³ – не более 44–52,5% для традиционных реагентов) для исследуемых образцов сточных вод по сравнению с традиционными реагентами. Доказано, что совмещение процессов коагуляционной очистки с применением комплексного сульфатно-хлоридного коагулянта и процесса флотации позволяет достичь установленных Водоканалом нормативов сброса по содержанию жиров и взвешенных веществ.

Ключевые слова: коагуляция, флотация, сточные воды производства шоколада, шоколадных изделий, пищевых масел

Для цитирования: Азопков С.В., Пересунко Ю.Д., Кручинина Н.Е. Разработка технологии физико-химической очистки сточных вод пищевых производств // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 6. – С. 36–45. DOI: 10.18799/24131830/2025/6/4733

UDC 628.31
DOI: 10.18799/24131830/2025/6/4733
Review article

Development of technology for physico-chemical treatment of food production wastewater

S.V. Azopkov, Yu.D. Peresunko[✉], N.E. Kruchinina

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

[✉]yperesunko@mail.ru

Abstract. Relevance. Traditional coagulants for water treatment based on aluminum or iron salts are no longer able to solve the tasks assigned to them, and stricter requirements for purified water dictate the need to search for new methods and reagents for water treatment. The most promising direction for improving the efficiency of water purification is the introduction of complex titanium-containing reagents that have demonstrated high efficiency in wastewater treatment of complex composition. **Aim.** To compare the coagulation efficiency of traditional and complex titanium-containing coagulants in the wastewater treatment of the dairy and fat-and-oil industry. **Results and conclusions.** The paper investigates the effectiveness of traditional aluminum-containing coagulants (aluminum oxychloride, iron (III) chloride) and a complex sulfate-chloride coagulant based on aluminum salts modified with titanium compounds. It is shown that the use of complex sulfate-chloride coagulant allows the most effective reduction of the chemical oxygen consumption index, reflecting the content of organic compounds in water, while traditional coagulants are significantly inferior in the effectiveness of reducing this indicator. The use of a complex reagent made it possible to significantly minimize the residual content of suspended solids at lower effective doses of coagulant (60–80 mg/dm³ for complex sulfate-chloride coagulant – 95–98% purification efficiency versus 80 mg/dm³ – no more than 44–52.5% for traditional reagents) for the wastewater samples under study compared with traditional reagents. It is proved that the combination of coagulation purification with the use of complex sulfate-chloride coagulant and the flotation makes it possible to achieve the discharge standards established by the Vodokanal for the content of fats and suspended solids.

Keywords: coagulation, flotation, waste water of chocolate production, chocolate products, edible oils

For citation: Azopkov S.V., Peresunko Y.D., Kruchinina N.E. Development of technology for physico-chemical treatment of food production wastewater. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 6, pp. 36–45. DOI: 10.18799/24131830/2025/6/4733

Введение

В связи с неуклонным ростом населения возрастает потребность в производстве и расширении перечня пищевых продуктов. Пищевой сектор характеризуется одним из самых высоких потреблений пресной воды и в то же время является самым крупным источником формирования сточных вод на единицу выпускаемой продукции [1, 2]. Ярким примером «грязного» производства является молочная промышленность. Перечень производимой продукции весьма разнообразен и включает в себя различные молочные и кисломолочные продукты, шоколадные изделия, разнообразные виды растительных и животных масел (рапсовое, сливочное, подсолнечное и т. д.) [3].

По некоторым данным [4–7] водопотребление молочных предприятий может колебаться от 4 до 7 м³ на тонну перерабатываемого сырья, при этом объем образующихся сточных вод составляет от 20 до 85 % от общего объема водопотребления.

Разнообразие продуктов и неравномерность объемов производств приводит к тому, что образующиеся сточные воды существенно различаются по составу и объемам. Так, коэффициент часовой неравномерности сточных вод (отношение максимального расхода к среднему) может варьироваться от 1,5 до 2,5 в зависимости от нагрузки на отдельную технологическую линию производства [6].

Сточные воды предприятий молочной промышленности разделяют на технологические (до 70 %) и хозяйственно-бытовые (до 30 %). Сильно загрязненные технологические сточные воды образуются не только в процессе производства пищевых продуктов, но также и в результате мойки технологического оборудования, трубопроводов и различных емкостей (СIP мойки оборудования), мытья полов и производственных помещений [7].

В случае сброса неочищенных сточных вод в городскую систему канализации нарушается работа городских сооружений глубокой биологической очистки, а в результате попадания подобных стоков в водоемы возможно ускорение эвтрофикации или гибель отдельных представителей флоры и фауны. Помимо ужесточения законодательства существует ряд стимулирующих мер с целью внедрения различных технологий защиты гидросферы [8, 9].

Технологии очистки сточных вод молочной промышленности входят в перечень наилучших доступных технологий (НДТ), действующих на территории РФ [10, 11]. Основой НДТ является предварительная очистка сточных вод на локальных очистных сооружениях, что позволяет снизить негативное воздействие на природную среду и минимизировать экономические затраты на доочистку сточных вод на городских сооружениях глубокой биологической очистки.

Основными поллютантами для сточных вод молокоперерабатывающего и связанных с ним производств являются растительные и животные жиры, сахара, остатки исходного сырья, поверхностно-активные вещества, формирующие высокие показатели химического (ХПК) и биохимического потребления кислорода (БПК₅). Так, значения ХПК и БПК₅ могут колебаться от 1500 до 12000 мгО/дм³ и более, а содержание жиров варьироваться от 100 до 1000 мг/дм³ и выше, в зависимости от объемов производства и видов выпускаемой продукции [10–12].

Острая необходимость в очистке подобных сточных вод заключается в жестких нормативах сбросов на городские очистные сооружения как на территории РФ, так и на территории некоторых зарубежных стран (табл. 1) [13–15].

Таблица 1. Нормативы сбросов очищенных сточных вод на городские очистные сооружения

Table 1. Standards for discharges of treated wastewater to urban wastewater treatment plants

Показатель Indication	Россия Russia	Европа Europe
ХПК, мг(О)/дм ³ /COD, mg(O)/dm ³	500	125
БПК ₅ , мг(О)/дм ³ /BOD, mg(O)/dm ³	300	25

COD – chemical oxygen demand, *BOD* – biochemical oxygen demand.

В мировой практике [16–24] в области очистки сточных вод молочной и масложировой промышленности представлено множество работ и реализованных технологий, где основным методом очистки является физико-химическая обработка и, в частности, коагуляция/флокуляция в сочетании с флотацией. При этом эффективность очистки при использовании традиционных алюминий- или железосодержащих коагулянтов совместно с флокулянтами достигает не более 20–30 % по показателям ХПК и БПК₅ [21, 25].

Применяемые в настоящее время коагулянты оксихлорид или сульфат алюминия позволяют снизить ХПК сточной воды в среднем на 5–10 %, а соединения железа малоэффективны ввиду образования комплексов с органическими лигандами.

Применение комплексных коагулянтов, содержащих соединения титана, позволяет снизить расход традиционных коагулянтов (до 30 %) [26–29]. Авторскими коллективами из Китая [30–32] получены данные о перспективности использования титаносодержащих коагулянтов в процессах очистки сточных вод, содержащих значительные количества растворенных органических соединений.

Основной целью данной работы является сравнение коагуляционной эффективности традиционных и комплексных коагулянтов в процессах очистки сточных вод молочной и масложировой промышленности.

Объекты и методика исследования

В качестве объекта исследования выбраны сточные воды молочного производства Московской области.

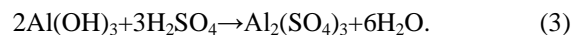
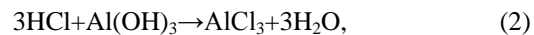
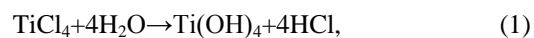
Состав исследуемых сточных вод оценивали по показателям: рН, ХПК и БПК₅, взвешенным веществам (ВВ), жирам, нефтепродуктам (НП), общему органическому углероду, остаточному алюминию.

Коагуляционную очистку в процессе исследований проводили на лабораторном флокуляторе фирмы VЕLP [33]. Проводимый процесс коагуляции-флокуляции на лабораторном флокуляторе состоял из трех основных этапов [35–37]:

1. Быстрая коагуляция – введение коагулянта и флокулянта при скорости перемешивания 150 об/мин. Время быстрой коагуляции в экспериментах составляло 2 минуты.
2. Медленная коагуляция. Проводился при скорости перемешивания 10–15 об/мин. Известно, что данный этап является основным лимитирующим фактором в процессе коагуляционной очистки. В это время происходит формирование устойчивых хлопьев, параллельно протекают процессы сорбции загрязняющих веществ на их поверхности. Время медленной коагуляции в экспериментах составляло 8 минут.
3. Напорная флотация (давление для сатурации 6–7 бар). На данном этапе происходит окончательное формирование устойчивых хлопьев коагулянта и загрязняющих веществ с последующим всплытием сформировавшегося коагуляционного шлама. Время флотации в экспериментах составляло 10 минут.

В качестве образцов коагулянтов использовали водные растворы оксихлорида алюминия (произв. Аква-Аураг, ТУ 2163-077-00205067-2013), хлорида железа (ТУ 2152-004-00750907-2015, 40 %-ный раствор по FeCl₃), комплексный сульфатно-хлоридный коагулянт (далее КСХК, содержащий до 90 % Al₂(SO₄)₃·18H₂O, до 10 % AlCl₃·6H₂O и до 3 % растворимых соединений титана в пересчете на TiO₂), водные растворы полимерного катионного флокулянта (марка Zetag), а также 10 %-ные растворы NaOH и HCl.

Процесс синтеза (реакции (1)–(3)) КСХК разработан на кафедре промышленной экологии РХТУ им. Д.И. Менделеева и включает в себя процесс прегидролиза тетрахлорида титана с получением 50 %-го водного раствора (38 %-я HCl), её частичную нейтрализацию избытком гидроксида алюминия и последующей нейтрализацией непрореагировавшего Al(OH)₃ 50–60 %-й серной кислотой в форму Al₂(SO₄)₃:



Получаемый продукт поглощает свободную влагу из раствора до образования наиболее стабильной формы 18-водного кристаллогидрата. Полученный процесс носит название «химическая дегидратация» и позволяет получать твердые продукты минуя стадию сушки [38].

В процессе предварительной коагуляции дозы традиционных и комплексных коагулянтов варьировали от 20 до 80 мг/дм³ соответственно (в пересчете на оксиды металлов или на сумму оксидов Al и Ti). Для эффективного применения хлорида железа дополнительно корректировали рН до 8,5–8,8.

Таблица 2. Состав сточных вод производств

Table 2. Composition of industrial wastewater

Показатель Indication	Шоколад и шоколадные изделия Chocolate and chocolate products	Пищевые масла Edible oils	Норматив сброса на городские биологические очистные сооружения Discharge standard for urban biological treatment plants
Водородный показатель (рН) pH units of pH	6,7±0,5	8,2±0,5	6,0–9,0
ХПК, мг(О)/дм ³ COD, mg(O)/dm ³	8650±165	32410±374	500
БПК ₅ , мг(О)/дм ³ BOD, mg(O)/dm ³	6410±131	61200±1450	300
Взвешенные вещества, мг/дм ³ Suspended solids, mg/dm ³	875±12,1	9100±47,1	300
Жиры, мг/дм ³ Fats, mg/dm ³	231±3,5	6570±11,7	50
Нефтепродукты, мг/дм ³ Petroleum products, mg/dm ³	175±0,5	36,3±0,5	10
Общий органический углерод, мг/дм ³ Total organic carbon, mg/dm ³	1075±15	451±9	Не норм. Not standardized

Результаты исследования и их обсуждение

Состав сточных вод производства шоколада (шоколадных изделий) и пищевых масел представлен в табл. 2.

Данные по составу сточных вод производства шоколада и шоколадных изделий (табл. 1) позволяют сделать вывод, что соотношение БПК₅/ХПК для исследуемых видов сточных вод, превышающее 0,5, объясняется нахождением значительной части органических соединений в виде легкоокисляемых биологическим методом веществ (например, различные сахара и сахарозаменители). Превышения нормативов для сброса по показателям ХПК, БПК₅, жирам и НП не позволяют направлять сточные воды в городской коллектор без предварительной очистки.

Основные процессы производства шоколада и шоколадных изделий происходят при температурах

от 33 до 50 °С [3–9], сточные воды от таких производств также характеризуются повышенной температурой.

Данные по составу сточных вод производства пищевых масел, представленные в табл. 1, характеризуются крайне высоким содержанием жиров, превышающих норматив сброса более чем в 130 раз. Высокое содержание ВВ (превышение более чем в 30 раз), вероятнее всего, объясняется присутствием нерастворимых жирных кислот и эмульсированных жиров.

Подбор эффективной дозы коагулянта

Эффективность коагуляционной очистки при выбранных дозах оценивали по содержанию ВВ и остаточному ХПК в осветленной части очищенной воды. Результаты подбора эффективной дозы оксихлорида алюминия представлены в табл. 3, 4.

Таблица 3. Эффективность очистки сточных вод производства шоколада и шоколадных изделий

Table 3. Efficiency of wastewater treatment in the production of chocolate and chocolate products

Коагулянт Coagulant	ХПК, мгО/дм ³ /COD, mg(O)/dm ³				Взвешенные вещества, мг/дм ³ /Suspended solids, mg/dm ³			
	Доза коагулянта по оксиду (Me _x O _y), мг/дм ³ /Dose of the coagulant by oxide (Me _x O _y), mg/dm ³							
	20	40	60	80	20	40	60	80
	Эффективность очистки/Effectiveness, %							
Al ₂ (OH) ₅ Cl	2,2	3,8	5,6	5,8	46,3	49,8	51,1	52,5
FeCl ₃	1,8	2,3	4,6	5,1	31,2	35,6	46,2	48,5
КСХК	12,1	18,6	28,4	30,3	51,2	71,2	87,1	89,2

Таблица 4. Эффективность очистки сточных вод производства пищевых масел

Table 4. Efficiency of wastewater treatment in edible oils production

Коагулянт Coagulant	ХПК, мгО/дм ³ /COD, mg(O)/dm ³				Взвешенные вещества, мг/дм ³ /Suspended solids, mg/dm ³			
	Доза коагулянта по оксиду (Me _x O _y), мг/дм ³ /Dose of the coagulant by oxide (Me _x O _y), mg/dm ³							
	20	40	60	80	20	40	60	80
	Эффективность очистки/Effectiveness, %							
Al ₂ (OH) ₅ Cl	24,3	31,5	39,4	41,0	35,3	39,7	43,5	44,2
FeCl ₃	22,8	25,3	35,7	39,5	31,2	36,6	42,1	43,1
КСХК	58,4	61,5	96,1	97,5	64,1	72,1	95,6	98,2

На основании полученных результатов, представленных в табл. 3, 4, видно, что наибольшая эффективность очистки по ХПК и ВВ достигается при использовании КСХК. При этом эффективные дозы составляют 60 мг/дм³ для очистки сточной воды производства шоколада и 80 мг/дм³ для очистки сточной воды производства пищевых масел. Дальнейшее увеличение дозы коагулянтов нецелесообразно, что, вероятнее всего, объясняется наличием растворенных органических соединений, которые не могут быть удалены коагуляцией.

Пониженная эффективность алюминийсодержащих коагулянтов обусловлена узким рабочим диапазоном рН для образования широко спектра продуктов гидролиза и их слаборазвитой поверхностью, а следовательно, и низкой сорбционной активностью.

Пониженную эффективность железосодержащих коагулянтов можно объяснить образованием хорошо растворимых железо-органических комплексов (например, с винной кислотой, аскорбиновой и т. д.), которые не образуют продуктов гидролиза, ввиду чего соединения железа теряют коагуляционные свойства.

Повышенную эффективность комплексных титансодержащих реагентов обусловлена несколькими взаимодополняющими процессами. Первичное увеличение эффективности обусловлено развитием (увеличением) сорбционной поверхности продуктов гидролиза комплексного реагента, содержащей в своем составе несколько активных форм титана и алюминия. Помимо этого, добавка соединений титана расширяет рабочий диапазон рН и позволяет образовывать мицеллярные структуры большего размера с повышенной адсорбционной способностью. Дополнительное увеличение эффективности очистки объясняется также процессом зародышеобразования первичных мицелл отрицательно заряженных нерастворимых соединений титана (в частности, мета- и ортотитановых кислот $TiO_2 \cdot nH_2O$) и положительно заряженных коллоидных частиц гидроксида алюминия. Процесс зародышеобразования приводит к нейтрализации заряда, образуются первичные мицеллы более развитой структуры. Наиболее ярко выраженный вклад в увеличение эффективности очистки вносят процессы поликонденсации/полимеризации продуктов гидролиза соединений титана (флокуляция) [34, 35].

Подбор эффективной дозы флокулянта для повышения эффективности очистки

Как известно [35–37], совместное применение коагулянта и флокулянта в процессе очистки способствует не только дополнительному увеличению эффективности удаления загрязняющих веществ, но также приводит к образованию плотного быстрооседающего и легко удаляемого коагуляционно-

го шлама, что в свою очередь снижает нагрузку на технологическое оборудование (отстойники или флотационные установки). Результаты предварительных экспериментов доказали эффективность применения катионного флокулянта марки Zetag.

Эффективность совместного применения комплексного коагулянта КСХК и катионного флокулянта оценивали по содержанию ВВ в осветлённой части очищенной воды. Дозы катионного флокулянта изменяли от 1 до 4 мг/дм³ при эффективных дозах КСХК 60 и 80 мг/дм³ для сточных вод производства шоколада, шоколадных изделий и пищевых масел. Результаты эксперимента представлены в табл. 5.

Таблица 5. Изменение содержания ВВ в осветлённой части с применением раствора флокулянта

Table 5. Change in the content of explosives in the clarified part using a flocculant solution

Доза коагулянта (в пересчете на сумму оксидов) Coagulant dose (in terms of the amount of oxides)	Доза флокулянта Flocculant dose	Остаточное содержание ВВ Residual content of SS
мг/дм ³ /mg/dm ³		
Сточные воды производства шоколада и шоколадных изделий Wastewater from the production of chocolate and chocolate products		
60	0	112,26±11,3
	1	31±3,1
	2	18±1,8
	3	23±2,3
	4	29±2,9
Сточные воды производства пищевых масел Wastewater from the production of edible oils		
80	0	163,80±16,4
	1	90±9,0
	2	64±6,4
	3	35±3,5
	4	23±2,3

Представленные в табл. 5 данные свидетельствуют о том, что эффективная доза катионного флокулянта составляет 3 мг/дм³ для сточной воды производства шоколада и шоколадных изделий и 4 мг/дм³ для сточной воды производства пищевых масел. Данные по остаточным содержаниям загрязняющих веществ представлены в табл. 6.

Из данных табл. 6 видно, что применение КСХК совместно с катионным флокулянтом в процессе коагуляционной очистки исследуемых сточных вод позволяет снизить концентрацию ВВ более чем на 97–99 %, жиров на 99 %. Оба показателя после очистки соответствуют требованиям сброса в городскую канализацию, в отличие от показателей ХПК и БПК₅, что требует стадии доочистки, проводимой методом напорной флотации.

Таблица 6. Состав сточной воды после коагуляционной очистки

Table 6. Composition of wastewater after coagulation treatment

Показатель Indication	До очистки Before	После очистки After	Норматив сброса на городские биологические очистные сооружения Discharge standard for urban biological treatment plants	Эффективность очистки Effectiveness, %
Производство шоколада и шоколадных изделий Production of chocolate and chocolate products				
рН	6,7±0,5	6,8±0,5	6,0–9,0	–
ХПК, мг(О)/дм ³ COD, mg(O)/dm ³	8650±165	6192,5±141	500	28,41
БПК ₅ , мг(О)/дм ³ BOD, mg(O)/dm ³	6410±131	4710,0±17	300	26,50
Взв. в-ва, мг/дм ³ Suspended solids, mg/dm ³	875±12,1	25,1±9,0	300	97,13
Жиры, мг/дм ³ Fats, mg/dm ³	231±3,5	0,7±0,05	50	99,70
Нефтепродукты, мг/дм ³ Petroleum products, mg/dm ³	175±0,5	0,1±0,05	10	99,9
Общий органический углерод, мг/дм ³ Total organic carbon, mg/dm ³	1075±15	883±7,3	Не норм. Not standardized	17,90
Производство пищевых масел/Production of edible oils				
рН	8,2±0,5	6,8±0,5	6,0 – 9,0	–
ХПК, мг(О)/дм ³ COD, mg(O)/dm ³	32410±374	1263,9±23,5	500	96,1
БПК ₅ , мг(О)/дм ³ BOD, mg(O)/dm ³	61200±1450	2570,4±47,8	300	95,8
Взв. в-ва, мг/дм ³ Fats, mg/dm ³	9100±47,1	27,0±1,5	300	99,7
Жиры, мг/дм ³ Fats, mg/dm ³	6570±11,7	13,1±1,5	50	99,8
Нефтепродукты, мг/дм ³ Petroleum products, mg/dm ³	36,3±0,5	0,1±0,05	10	99,7
Общий органический углерод, мг/дм ³ Total organic carbon, mg/dm ³	451±9	130,0±2,7	Не норм. Not standardized	71,18

Процесс флотации на лабораторной установке (рисунок) протекает с использованием водопроводной воды, которая поступает в сатуратор. Сатурация протекает при давлении 6–7 бар. Варьирование количества сатурированной воды, подаваемой во флотационную колбу, помогает регулировать процесс флотации сточной воды. В результате флотации образуется флотошлам, который можно отобрать из пробоотборника – 1, и осветленная вода, отбираемая из пробоотборника – 2. Подбор количества сатурированной воды для флотации сточной воды, предварительно обработанной эффективной дозой комплексного титансодержащего коагулянта совместно с эффективной дозой катионного флокулянта, проводили, варьируя процент сатурированной воды от 10 до 40 % (от общего объема сточной воды). Суммарный объем сатурированной и сточной воды во флотационной камере составляет не более 3,5 дм³. Эффективность протекания процесса напорной флотации определяли по остаточным концентрациям взвешенных веществ и ХПК после 10 минут флотации, отбирая пробы из пробоотборника – 2 (рисунок).

Однако при изменении объема сатурированной воды от 10 до 40 % в условиях работы на конкрет-

ной лабораторной установке напорной флотации эффекта положительной динамики снижения ХПК и БПК₅ не было достигнуто. В этом случае необходимо продолжить исследования по поиску оптимальных условий доочистки сточных вод производства шоколада, шоколадных изделий и пищевых масел.

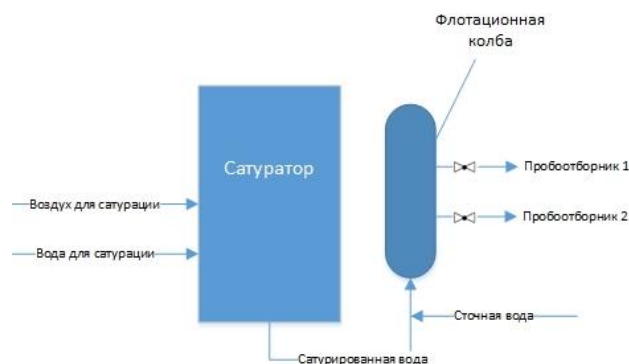


Рисунок. Схема лабораторной установки напорной флотации

Figure. Diagram of the laboratory pressure flotation plant

Заключение

Исследована эффективность коагуляционной очистки сточных вод производства шоколада, шоколадных изделий и пищевых масел традиционными и комплексным титансодержащим коагулянтом.

Продемонстрирована высокая эффективность коагуляционной очистки комплексным сульфатно-хлоридным коагулянтом в сравнении с традиционными коагулянтами (оксихлорида алюминия и хлорида железа) в отношении показателей взвешенных веществ и ХПК.

Установлено, что применение комплексного титансодержащего коагулянта в процессах очистки сточных вод производства пищевых масел позволяет снизить расход реагентов на 25–30 % при эффективности удаления жиров 99,8 %, взвешенных веществ на 99,7 % и ХПК на 96,1 %.

Показано, что стадия доочистки, проводимая методом напорной флотации, с целью дополнительного снижения показателей ХПК и БПК₅ в исследуемых сточных водах, не продемонстрировала положительного эффекта в данной работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ramjeawon T. Cleaner production in mauritian cane-sugar factories // *Journal of cleaner production*. – 2000. – Vol. 8. – P. 503–510. DOI: 10.1016/S0959-6526(00)00020-2.
2. Чирикова М.С., Глушень Е.М. Экологически безопасный способ очистки жиросодержащих сточных вод с помощью биофлокулянтов и микроорганизмов-деструкторов жиров и масел // *Science and innovation*. – 2023. – Т. 2. – № 8. – С. 173–174. DOI: 10.528/zenodo.8353528.
3. Драгилев А.И., Хамидулин Ф.М. Технологическое оборудование кондитерского производства. – СПб: Троицкий мост, 2011. – 360 с.
4. Драгилев А.И., Лурье И.С. Технология кондитерских изделий. – М.: Дели принт, 2003. – 226 с.
5. Зубченко А.В. Технология кондитерского производства. – Воронеж: ВГТА, 2001. – 432 с.
6. Калинина-Шувалова С.Ф., Крицкая А.В. Технологические схемы очистки жиросодержащих сточных вод // *Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса*. – 2013. – № 1. – С. 313–319.
7. ИТС 45-2017. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Производство напитков, молока и молочной продукции. – М.: Бюро НДТ, 2017. – 199 с.
8. Anerobic-aerobic treatment of Dairy waste water with national technology in Mexico: the case of "El Sanz" / H.O. Monroy, M. Vazquez, J.C. Derramadero, Guyot J.P. // *3rd international symposium on waste management problems in Agro-industries*. – Mexico City, 4–6 October 1995. – P. 202–209.
9. Постановление Правительства РФ от 29.07.2013 № 644 (ред. от 22.05.2020) "Об утверждении Правил холодного водоснабжения и водоотведения и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации" (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.07.2020).
10. Ульрих Е.В. Выделение белков и жира из молочных смывных вод // *Техника и технология пищевых производств*. – 2011. – № 2 (21). – С. 69–72.
11. Солкина О.С. Биологическая очистки сточных вод предприятий молочной промышленности с применением биомембранной технологии: дис. ... канд. техн. наук. – Пенза, 2018. – 140 с.
12. Гарзанов А.Л., Клячко А.А. Эффективные технологии очистки сточных вод современных молочных производств // *Молочная промышленность*. – 2017. – № 4. – С. 29–31.
13. Федеральный закон "О внесении изменений в Федеральный закон "О водоснабжении и водоотведении" и отдельные законодательные акты Российской Федерации" от 29.07.2017 № 225-ФЗ.
14. Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ (ред. от 09.03.2021) "Об охране окружающей среды" (Статья 28.1. Наилучшие доступные технологии).
15. 91/271/ЕЕС. Council Directive concerning urban waste-water treatment. – Brussels, 2014. – 52 p.
16. Лоренц В.И. Очистка сточных вод предприятий пищевой промышленности. – Киев: Будивельник, 1972. – 250 с.
17. Zajda M., Aleksander-Kwaterczak U. Wastewater treatment methods for effluents from the confectionery industry – an overview // *Journal of Ecological Engineering*. – 2019. – Vol. 9. – P. 293–304. DOI: 10.12911/22998993/112557.
18. Березин М.А., Фисунов Д.И. Очистка стоков молокоперерабатывающих предприятий в тюменской области // *Вестник магистратуры*. – 2023. – Т. 10. – № 2. – С. 32–35.
19. Ульрих Е.В., Баркова А.С. Использование флокулянтов для очистки сточных вод // *Трансформация экосистем*. – 2023. – Т. 6. – № 1 (19). – С. 168–187. DOI: 10.23859/ester-220525.
20. Шумилова М.А., Суксин Н.Е. Технология процесса утилизации отходов, содержащих органические компоненты // *Химическая физика и мезоскопия*. – 2023. – Т. 25. – № 3. – С. 425–433. DOI: 10.15350/17270529.2023.3.38
21. COD discharge limits for urban wastewater. Treatment plants in China based on statistical methods / Yuhua Zhou, Ning Duan, Xuefang Wu, Hao Fang // *Water*. – 2018. – Vol. 10. – P. 1–10. DOI: 10.3390/w10060777.
22. Gugala M., Zarzecka K., Sikorska A. Wastewater management in food processing enterprises – a case study of the Ciechanów dairy cooperative // *Journal of Ecological Engineering*. – 2015. – Vol. 16. – P. 178–183. DOI: 10.12911/22998993/605.
23. Problems, control, and treatment of Fat, Oil, and Grease (FOG): a review / E. Mohamed, Mirghani S., Zaki Bin Zainudin, Asif Hoda // *Journal of Oleo Science*. – 2014. – Vol. 63 (8). – P. 747–752. DOI: 10.5650/jos.ess13182.
24. Кузин Е.Н., Кручинина Н.Е. Получение отвержденных форм аломокремниевых коагулянтов и их использование в процессах водоочистки и водоподготовки // *Цветные металлы*. – 2016. – № 10. – С. 8–13. DOI: 10.17580/tsm.2016.10.01.
25. Titanium-containing coagulants in wastewater treatment processes in the alcohol industry / E. Kuzin, Y. Averina, A. Kurbatov, N. Kruchinina, V. Boldyrev // *Processes*. – 2022. – Vol. 10 (3). – P. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10030440>
26. Kuzin E.N., Kruchinina N.E. Titanium-containing coagulants for foundry wastewater treatment // *CIS Iron and Steel Review*. – 2020. – Vol. 20. – № 2. – P. 66–69. DOI: 10.17580/cisir.2020.02.14

27. Кузин Е.Н., Кручинина Н.Е. Получение комплексных коагулянтов на основе минеральных концентратов и их использование в процессах очистки воды // Обогащение руд. – 2019. – № 3. – С. 43–48. DOI: 10.17580/or.2019.03.07
28. Очистка сточных вод гальванического производства с использованием комплексных коагулянтов-восстановителей / Е.Н. Кузин, Ю.М. Аверина, А.Ю. Курбатов, П.А. Сахаров // Цветные металлы. – 2019. – № 10. – С. 91–96. DOI: 10.17580/tsm.2019.10.15
29. Coagulation performance and floc characteristics of polytitanium tetrachloride and titanium tetrachloride compared with ferric chloride for coal mining wastewater treatment / J. Galloux, L. Chekli, S. Phuntsho, L.D. Tijjing, S. Jeong, Y.X. Zhao, B.Y. Gao, S.H. Park, H.K. Shon // Separation and Purification Technology. – 2015. – Vol. 152. – P. 94–100. DOI: 10.1016/j.seppur.2015.08.009.
30. Aqueous arsenite removal by simultaneous ultraviolet photocatalyticoxidation-coagulation of titanium sulfate / W. Yuxia, D. Jinming, L. Wei, B. Simon, M. Dennis // Journal of Hazardous Materials. – 2016. – Vol. 303. – P. 162–170. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.10.021.
31. Anionic polymer compound bioflocculant as a coagulant aid with aluminum sulfate and titanium tetrachloride / Y.X. Zhao, B.Y. Gao, H.K. Shon, Y. Wang, J.-H. Kim, Q.Y. Yue, X.W. Bo // Bioresource Technology. – 2012. – Vol. 108. – P. 45–54. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.01.012.
32. Guo J. et al. Comparison analysis of cationic-polyacrylamide as flocculant aid in titanium salt coagulants // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2023. – Vol. 669. – P. 131537. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2023.131537.
33. ГОСТ Р 51642-2000 Коагулянты для хозяйственно-питьевого водоснабжения. Общие требования и метод определения эффективности. – М.: Госстандарт России, 2000. – 15 с.
34. Kuzin E.N. Titanium coagulants in water purification and water treatment processes in additive manufacturing // Metallurgical and Materials Engineering. – 2024. – Vol. 30 (2). – P. 25–33. DOI: 10.56801/MME1042.
35. Гетманцев С.В., Нечаев И.А., Гандурина Л.В. Очистка производственных сточных вод коагулянтами и флокулянтами. – М.: АСВ, 2008. – 272 с.
36. Гетманцев С.В., Гетманцев В.С. Комбинированная технология производства высокоэффективных коагулянтов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2001. – № 3. – С. 8–10.
37. Бабенков Е.Д. Очистка воды коагулянтами. – М.: Изд-во «Наука», 1977. – 356 с.
38. Кузин Е.Н., Кручинина Н.Е. Получение комплексных титансодержащих коагулянтов методом химической дегидратации // Известия высших учебных заведений. Серия «Химия и химическая технология». – 2022. – Т. 65. – № 5. – С. 103–111. DOI: 10.6060/ivkkt.20226505.6578

Информация об авторах

Сергей Валерьевич Азопков, кандидат технических наук, заведующий лабораторией кафедры промышленной экологии Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева, Россия, 125480, г. Москва, ул. Героев Панфиловцев, 20. sergej.azopkov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3422-3443>

Юлия Дмитриевна Пересунько, магистрант кафедры промышленной экологии Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева, Россия, 125480, г. Москва, ул. Героев Панфиловцев, 20. yurgesunko@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-6977-5792>

Наталья Евгеньевна Кручинина, доктор технических наук, профессор, декан факультета биотехнологии и промышленной экологии, заведующий кафедрой промышленной экологии Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева, Россия, 125480, г. Москва, ул. Героев Панфиловцев, 20. kruchinina.n.e@muctr.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7597-1993>

Поступила в редакцию: 13.06.2024

Поступила после рецензирования: 16.07.2024

Принята к публикации: 08.04.2025

REFERENCES

1. Ramjeawon T. Cleaner Production in Mauritian Cane-sugar factories. *Journal of cleaner production*, 2000, vol. 8, pp. 503–510. DOI: 10.1016/S0959-6526(00)00020-2.
2. Chirikova M.S., Glushen E.M. An environmentally safe method for cleaning fatty wastewater using bioflocculants and microorganisms that destroy fats and oils. *Science and innovation*, 2023, vol. 2, no. 8, pp. 173–174. (In Russ.) DOI: 10.528/zenodo.8353528.
3. Dragilev A.I., Khamidulin F.M. *Technological equipment of confectionery production*. St. Petersburg, Troitsky Bridge Publ., 2011. 360 p. (In Russ.)
4. Dragilev A.I., Lourier I.S. *Confectionery technology*. Moscow, Deli Print, 2003. 226 p. (In Russ.)
5. Zubchenko A.V. *Technology of confectionery production*. Voronezh, VGTA Publ., 2001. 432 p. (In Russ.)
6. Kalinina-Shuvalova S.F. Technological schemes of purification of fatty wastewater. *The Far East: problems of the development of the architectural and construction complex*, 2013, no. 1, pp. 313–319. (In Russ.)
7. *ITS 45-2017. An information and technical guide to the best available technologies. Production of beverages, milk and dairy products*. Moscow, Bureau of NDT, 2017. 199 p. (In Russ.)
8. Monroy H.O., Vazquez M., Derramadero J.C., Guyot J.P. Anerobic-aerobic treatment of Dairy waste water with national technology in Mexico: the case of “El Sanz”. *3rd international symposium on waste management problems in Agro-industries*. Mexico City, 4–6 October 1995. pp. 202–209.

9. *Resolution of the Government of the Russian Federation dated 07/29/2013 No. 644 (ed. dated 05/22/2020) "On Approval of the Rules of Cold-water supply and Sanitation and on Amendments to Certain Acts of the Government of the Russian Federation" (with amendments. And an additional introduction. Effective from 07.01.2020).* (In Russ.)
10. Ulrich E.V. Isolation of proteins and fat from milk flushing waters. *Technique and technology of food production*, 2011, no. 2 (21), pp. 69–72. (In Russ.)
11. Solkina O.S. *Biological wastewater treatment of dairy industry enterprises using biomebrane technology*. Cand. Dis. Penza, 2018. 140 p. (In Russ.)
12. Garzanov A.L., Klyachko A.A. Effective wastewater treatment technologies of modern dairy industries. *Dairy industry*, 2017, no. 4, pp. 29–31. (In Russ.)
13. *Federal Law "On Amendments to the Federal Law "On Water Supply and Sanitation" and Certain Legislative Acts of the Russian Federation" dated 29.07.2017 No. 225-FZ.* (In Russ.)
14. *Federal Law No. 7-FZ of 10.01.2002 (as amended on 09.03.2021) "On Environmental Protection" (Article 28.1. The best available technologies).* (In Russ.)
15. 91/271/EEC. *Council Directive concerning urban waste-water treatment*. Brussels, 2014. 52 p.
16. Lorenz V.I. *Wastewater treatment of food industry enterprises*. Kiev, Budevelnik Publ., 1972. 250 p. (In Russ.)
17. Zajda M., Aleksander-Kwaterczak U. Wastewater treatment methods for effluents from the confectionery industry – an overview. *Journal of Ecological Engineering*, 2019, vol. 9, pp. 293–304. DOI: 10.12911/22998993/112557.
18. Berezin M.A., Fisunov D.I. Wastewater treatment of dairy processing enterprises in the Tyumen region. *Bulletin of the Magistracy*, 2023, vol. 10, no. 2, pp. 32–35. (In Russ.)
19. Ulrich E.V., Barkova A.S. The use of flocculants for wastewater treatment. *Transformation of ecosystems*, 2023, vol. 6, no. 1 (19), pp. 168–187. (In Russ.) DOI: 10.23859/ester-220525.
20. Shumilova M.A., Suksin N.E. Technology of the waste disposal process containing organic components. *Chemical physics and mesoscopy*, 2023, vol. 25, no. 3, pp. 425–433. (In Russ.) DOI: 10.15350/17270529.2023.3.38
21. Yuhua Zhou, Ning Duan, Xuefang Wu, Hao Fang. COD discharge limits for urban wastewater. treatment plants in china based on statistical methods. *Water*, 2018, vol. 10, pp. 1–10. DOI: 10.3390/w10060777.
22. Gugala M., Zarzecka K., Sikorska A. Wastewater management in food processing enterprises – a case study of the ciechanów dairy cooperative. *Journal of Ecological Engineering*, 2015, vol. 16, pp. 178–183. DOI: 10.12911/22998993/605.
23. Mirghani E.S., Zaki Bin Zainudin, Asif Hoda Mohamed. Problems, control, and treatment of Fat, Oil, and Grease (FOG): a review. *Journal of Oleo Science*, 2014, vol. 63 (8), pp. 747–752. DOI: 10.5650/jos.ess13182.
24. Kuzin E.N., Kruchinina N.E. Obtaining cured forms of aluminosilicon coagulant and their use in water treatment and water treatment processes. *Non-ferrous metals*, 2016, no. 10, pp. 8–13. (In Russ.) DOI: 10.17580/tsm.2016.10.01.
25. Kuzin E., Averina Y., Kurbatov A., Kruchinina N., Boldyrev V. Titanium-containing coagulants in wastewater treatment processes in the alcohol industry. *Processes*, 2022, vol. 10 (3), pp. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10030440>
26. Kuzin E.N., Kruchinina N.E. Titanium-containing coagulants for foundry wastewater treatment. *CIS Iron and Steel Review*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 66–69. DOI 10.17580/cisr.2020.02.14.
27. Kuzin E.N., Kruchinina N.E. Obtaining complex coagulants based on mineral concentrates and their use in water purification processes. *Ore enrichment*, 2019, no. 3, pp. 43–48. (In Russ.) DOI: 10.17580/or.2019.03.07
28. Kuzin E.N., Averina Yu.M., Kurbatov A.Yu., Sakharov P.A. Wastewater treatment of galvanic production using complex coagulants-reducing agents. *Non-ferrous metals*, 2019, no. 10, pp. 91–96. (In Russ.) DOI: 10.17580/tsm.2019.10.15
29. Galloux J.L., Phuntsho Ch.S., Tijing L.D., Jeong S., Zhao Y.X., Gao B.Y., Park S.H., Shon H.K. Coagulation performance and floc characteristics of polytitanium tetrachloride and titanium tetrachloride compared with ferric chloride for coal mining wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 2015, vol. 152, pp. 94–100. DOI: 10.1016/j.seppur.2015.08.009.
30. Yuxia W., Jinming D., Wei L., Simon B., Dennis M. Aquatic arsenite removal by simultaneous ultraviolet photocatalytic oxidation-coagulation of titanium sulfate. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, vol. 303, pp. 162–170. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.10.021.
31. Zhao Y.X., Gao B.Y., Shon H.K., Wang Y., Kim J.-H., Yue Q.Y., Bo X.W. Anionic polymer compound bioflocculant as a coagulant aid with aluminum sulfate and titanium tetrachloride. *Bioresource Technology*, 2012, vol. 108, pp. 45–54. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.01.012.
32. Guo J. Comparison analysis of cationic-polyacrylamide as flocculant aid in titanium salt coagulants. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2023, vol. 669, pp. 131537. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2023.131537.
33. *SS R 51642-2000 Coagulants for household drinking water supply. General requirements and a method for determining effectiveness*. Moscow, Gosstandart of Russia Publ., 2000. 15 p. (In Russ.)
34. Kuzin E.N. Titanium coagulants in water purification and water treatment processes in additive manufacturing. *Metallurgical and Materials Engineering*, 2024, vol. 30 (2), pp. 25–33. DOI: 10.56801/MME1042.
35. Getmantsev S.V., Nechaev I.A., Gandurina L.V. *Purification of industrial wastewater with coagulants and flocculants*. Moscow, DIA Publ., 2008. 272 p. (In Russ.)
36. Getmantsev S.V., Getmantsev V.S. Combined technology of production of highly effective coagulants. *Water supply and sanitary engineering*, 2001, no. 3, pp. 8–10. (In Russ.)
37. Babenkov E.D. *Water purification with coagulants*. Moscow, Nauka Pub., 1977. 356 p. (In Russ.)
38. Kuzin E.N., Kruchinina N.E. Obtaining complex titanium-containing coagulants by the method of chemical dehydration. *News of higher educational institutions. Chemistry and Chemical Technology Series*, 2022, vol. 65, no. 5, pp. 103–111 (In Russ.) DOI: 10.6060/ivkkt.20226505.6578

Information about the authors

Sergey V. Azopkov, Cand. Sc., Head of the Laboratory, D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 20, Geroev Panfilovtsev street, Moscow, 125480, Russian Federation. sergej.azopkov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3422-3443>

Yulia D. Peresunko, Master Student, D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 20, Geroev Panfilovtsev street, Moscow, 125480, Russian Federation. yperesunko@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-6977-5792>

Natalia E. Kruchinina, Dr. Sc., Professor, Dean of the Faculty of Biotechnology and Industrial Ecology, Head of the Department of Industrial Ecology, D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 20, Geroev Panfilovtsev street, Moscow, 125480, Russian Federation. kruchinina.n.e@muctr.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7597-1993>

Received: 13.06.2024

Revised: 16.07.2024

Accepted: 08.04.2025