ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

УДК 628.32:637.1-047

DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-6-174-185

*Е.И. ВЯЛКОВА¹, Е.С. ГЛУЩЕНКО¹, А.В. ШАЛАБОДОВ¹,
А.В. ШАЛАБОДОВ¹, Е.Ю. ОСИПОВА²,*

¹Тюменский индустриальный университет,

²Томский государственный архитектурно-строительный университет

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Проблемы очистки и утилизации производственных сточных вод предприятий молочной промышленности существуют в России и за рубежом. Сточные воды подобных производств по степени загрязненности и агрессивности не подлежат сбросу даже в систему бытовой канализации. Для проектирования локальных очистных сооружений таких предприятий необходимо подробно изучить качество сточных вод и режимы их поступления. В статье приведены результаты исследования состава образующихся сточных вод по таким показателям, как агрессивность среды, органические вещества, взвешенные вещества, жиры, нитраты, фосфаты и др. На основании полученных данных были сделаны выводы об изменении качественного состава стоков в зависимости от технологических процессов при производстве молочной продукции. Серьезную проблему при выборе технологии очистки представляет значительное содержание в образующихся производственных стоках органических веществ, жиров, аммония, нитратов и фосфатов. Кроме того, стоки характеризуются большими колебаниями качества при сбросе в производственную систему канализации сыворотки или реагентных растворов после промывки оборудования. Предлагается вариант рациональной технологической схемы водоотведения молокозавода с выполнением требований очистки воды для сброса в канализационную сеть населенного пункта.

Ключевые слова: молокозавод; состав сточных вод; органические загрязнения; pH воды; жиры; творожная и сырная сыворотка; залповый сброс; предварительная локальная очистка сточных вод.

Для цитирования: Вялкова Е.И., Глущенко Е.С., Шалабодов А.В., Шалабодов А.В., Осипова Е.Ю. Особенности проектирования локальных очистных сооружений // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 6. С. 174–185.

DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-6-174-185

E.I. VYALKOVA¹, E.S. GLUSHCHENKO¹, A.V. SHALABODOV¹,
A.V. SHALABODOV¹, E.Yu OSIPOVA²,

¹Tyumen State Oil and Gas University,

²Tomsk State University of Architecture and Building

LOCAL SEWAGE TREATMENT UNIT ENGINEERING

Problems of treatment and disposal of industrial wastewater from dairy enterprises exist in Russia and abroad. Industrial wastewater from dairy cannot be discharged even into the domestic sewage system. The local sewage treatment units of such enterprises require in detail studying the wastewater quality and supply modes. This article presents such parameters of the wastewater composition as environmental aggressiveness, organic matter, suspended solids, fats, nitrogen, phosphate, and others. It is shown that changes in the qualitative composition of effluents depend on the dairy production processes. A serious problem when choosing a treatment technology is the significant content of organic substances, fats, ammonium, nitrates and phosphates in the resulting effluent. In addition, effluents are characterized by large fluctuations in quality when dumped in a sewage treatment unit or reagent solutions generated by the equipment flushing. A production process flowchart is proposed for the dairy water disposal with the appropriate water treatment for discharge into sewage treatment units.

Keywords: dairy; wastewater composition; organic pollution; pH value; fats; curd and cheese whey; volley discharge; local sewage pre-treatment.

For citation: Vyalkova E.I., Glushchenko E.S., Shalabodov A.V., Shalabodov A.V., Osipova E.Yu. Osobennosti proektirovaniya lokal'nykh ochistnykh sooruzhenii [Local sewage treatment unit engineering]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2019. V. 21. No. 6. Pp. 174–185.

DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-6-174-185

Производственные сточные воды молокозаводов имеют специфический состав и отличаются высоким содержанием органических веществ и низкими значениями pH среды, что не позволяет сбрасывать их без предварительной очистки в централизованную систему хозяйственно-бытовой канализации населенного пункта. В отсутствии локальных очистных сооружений ряд предприятий вывозят производственные стоки в пруды-накопители, часто являющиеся негерметичными сооружениями, которые создают неблагоприятную экологическую обстановку, вызванную не только распространением неприятного запаха, но и фильтрацией сточных вод в грунт. В этом случае водоемы не соответствуют требованиям водопользования. В связи с постоянным ухудшением качества воды в водных объектах встает необходимость улучшения качества очистки сточных вод на таких предприятиях путем строительства или реконструкции локальных очистных сооружений.

В мировом научном сообществе большое внимание уделяется проблеме модернизации технологий очистки сточных вод молокозаводов.

Традиционные технологические схемы очистки стоков [1–3] включают: механическую очистку на решетках, барабанных фильтрах или процеживателях, усреднитель (где происходит удаление жиров и нейтрализация стоков), физико-химическую очистку методом напорной флотации (реагентной или нет) и биологическую очистку в аэротенках. Однако данные технологии сопровождаются рядом проблем, таких как высокое потребление электроэнергии

гии, образование большого количества труднообрабатываемого шлама, сложность эксплуатации сооружений аэробной биологической очистки.

Широкое распространение за рубежом получили технологии анаэробного сбраживания в различных UASB-реакторах, например, в виде емкостей закрытого типа, с перемешивающим устройством [4–7]. Кроме того, изучалась ферментативная предварительная очистка молочных жиров при анаэробном сбраживании с образованием метана [8]. Наиболее эффективным оказались ферменты, образованные *Candida rugosa*, при этом достигался максимальный выход метана при анаэробном сбраживании.

А. Mahvi и др. в своих работах описывает еще один вариант биологической очистки – последовательный реактор периодического действия SBR. Он представляет собой ряд реакторов, в которых сточная вода проходит 5 этапов: заполнение реактора, аэрация, осаждение, отвод сточных вод, отвод осадка. При этом некоторые этапы могут проходить в одних и тех же реакторах, значительно сокращаются объемы сооружений, гибкие параметры режима и автоматическое управление улучшают эффективность работы сооружения в целом [9].

Многие ученые [3, 10–16] проводят исследования по возможному применению мембранных установок (нанофильтрационные, ультрафильтрационные, обратноосмотические установки) для выделения из сточных вод ценных продуктов – протеинов, лактозы. В этом случае исследовалось не только применение какой-то одной мембраны, но и двухступенчатая ультра- и нанофильтрация сточных вод молокозаводов. На стадии ультрафильтрации задерживаются протеины и липиды, на наномембранах удаляются лактоза и соли [12]. Также рассматривались варианты устройства мембранного биореактора (МБР) и нанофильтрационных мембран [16], что позволяет повторно использовать сточную воду. В МБР происходит задержание органических примесей, а на наномембранах осуществляется задержание растворенных солей. В качестве мембран рассматривались различные материалы [17], в том числе полимерные вещества, а также бентонит.

Ряд ученых предлагают применять методы электрической и магнитной обработки сточных вод (электрохимическое окисление, электрокоагуляция) с использованием различных электродов: из износостойких материалов, алюминиевые электроды [18, 19]. При этом электрохимический обработке может предшествовать аэробная очистка сточных вод, а также может осуществляться процесс совместной анаэробной и магнитной обработки воды [20]. Однако данные технологии пока не нашли широкого применения на территории России.

Кроме того, особое внимание уделяется творожной и сырной сыворотке и ее вторичному использованию, предотвращающему сброс ценного белкового продукта в канализацию.

Наиболее широко распространенным методом обработки сыворотки является ферментативный гидролиз лактозы, полученный из сыворотки, с образованием мономеров – глюкозы и галактозы [21, 22].

Современные исследователи предлагают использование мембранных технологий для обработки сыворотки (ультрафильтрация, нанофильтрация) с возможной совместной предварительной обработкой (коагуляцией, флокуляцией, осаждением, тепловой, ультразвуковой обработкой). В качестве коа-

гулянта и флокулянта используются сернокислый алюминий, сернокислое железо, полиакриламид [23–25].

Целью данного исследования является изучение качественного состава сточных вод предприятия молочной промышленности, образующихся на разных этапах технологического процесса. На основании полученных результатов необходимо предложить рациональную схему отвода и обработки сточных вод.

Исследования проводились в лаборатории кафедры водоснабжения и водоотведения Тюменского индустриального университета с использованием стандартных методик на реальной сточной воде молокозавода, расположенного в Тюменской области.

Исходная сточная вода представляет собой смесь фекальных и производственных стоков, которые собираются в общий резервуар-накопитель, откуда периодически вывозятся ассенизаторской машиной. Для получения полного качественного анализа сточных вод пробы отбирались в разные дни и после изменения технологических процессов (табл. 1).

Таблица 1

Место взятия проб с целью исследования качества сточных вод

№ пробы	Место взятия пробы, технологический этап
1	Проба взята из резервуара-накопителя до начала рабочей смены
2	Проба взята из резервуара-накопителя после промывки оборудования щелочью
3	Проба взята из резервуара-накопителя после промывки оборудования кислотой
4	Проба взята из резервуара-накопителя через три дня после промывки кислотой до начала рабочей смены

Помимо определения качества смеси сточных вод от всего предприятия, были проведены исследования состава сточных вод, образующихся на каждом отдельном технологическом потоке: после щелочной или кислотной промывки оборудования, мойки тары, мойки автоцистерн с молоком, промывной воды после приготовления масла, сделан анализ творожной и сырной сыворотки.

Качество сточной воды оценивалось по специфическим для данной воды показателям: pH сточной воды; концентрация взвешенных веществ; химическое потребление кислорода (ХПК); биохимическое потребление кислорода (БПК₅); сухой остаток; железо общее; концентрация ионов аммония NH_4^+ ; концентрация нитритов NO_2^- ; концентрация нитратов NO_3^- ; жиры; концентрация фосфатов PO_4^{3-} ; нефтепродукты.

Измерение pH проводилось с использованием лабораторного pH-метра pH-150МИ стандартным электродом.

Измерение ХПК осуществлялось фотометрическим методом на анализаторе жидкости «ФЛЮОРАТ-02». Для этого виалу с пробой воды, бихроматом калия и серной кислотой в присутствии катализатора сульфата серебра выдерживают при 150 °С в предварительно нагретом термореакторе «ТЕРМИОН» в течение двух часов. После остывания виалы до комнатной температуры определялось значение ХПК.

Взвешенные вещества и сухой остаток определялись гравиметрическим методом путем высушивания осадка (при температуре 105 °С) после фильтрования (взвешенные вещества) или самой пробы (сухой остаток) до постоянной массы в сушильном шкафу.

Концентрации аммония, нитритов, нитратов и фосфатов определяются с помощью системы капиллярного электрофореза «Капель-105М». Пробу сточной воды, буферные растворы, гидроксид натрия и дистиллированную воду помещают в пробирки типа Эппендорф, подвергают предварительному центрифугированию и загружают в систему капиллярного электрофореза. Под действием электрического тока в капилляре происходит разделение смеси на составляющие компоненты. В зависимости от массы и заряда компоненты в разное время достигают зоны детектирования. При достижении зоны детектирования на экране компьютера появляется последовательность пиков, называемая электрофореграммой. По площади и высоте пика программа определяет концентрацию данного компонента смеси, а по последовательности пиков – качественную характеристику компонента.

Концентрация БПК₅ определялась манометрическим методом в специальных бутылках для инкубации с помощью БПК-системы Lovibond® OxiDirect. Также в бутылку помещают магнитный стерженек, а в резиновый уплотняющий колпачок – 3–4 капли 45% раствора гидроксида калия, затем вставляют колпачок в горлышко бутылки. Проба выдерживается при 20 °С в течение 5 сут, а затем определяется значение БПК₅ по сенсорному БПК-датчику.

Общее железо определялось с использованием сульфосалициловой кислоты фотометрическим методом. В пробу после кипячения с соляной кислотой (0,2 см³) добавлялись хлористый аммоний, сульфосалициловая кислота и аммиак (1 см³), а затем проводилось измерение концентрации общего железа на спектрофотометре ПЭ-5400ВИ. Для устранения мешающего влияния органических веществ предварительно в пробу добавляли серную (2 см³) и азотную (5 см³) кислоту, пробу кипятили до появления густого белого дыма, после чего охлаждали и разбавляли дистиллированной водой.

Содержание жиров определялось гравиметрическим методом путем экстракции петролейным эфиром с добавлением хлорида натрия. Экстракцию проводили 2–3 раза. Затем экстракт высушивают прокаленным сернокислым натрием, промывают петролейным эфиром и перемешивают. Аликвотную пробу экстракта (30 см³) переносят в стеклянный бюкс, нагревают на водяной бане и затем в сушильном шкафу. После этого бюкс взвешивают и определяют количество жиров.

Концентрация нефтепродуктов определялась флуориметрическим методом на «Флюорате-02» путем экстракции гексаном нефтепродуктов из пробы сточной воды.

Результаты лабораторных исследований по определению качественных показателей сточных вод, взятых из резервуара-накопителя, представлены в табл. 2.

Полученные результаты показали, что поступление сточных вод происходит в залповом режиме с высокой степенью неравномерности концентраций загрязнений. рН может изменяться от кислого до нейтрального, концентрации

взвешенных веществ могут возрастать в десятки раз. Большое содержание органических веществ, характеризуемое концентрациями ХПК и БПК₅, а также высокое содержание жиров свидетельствует о присутствии в сточных водах остатков продукции молокозавода. Концентрации органических загрязнений могут изменяться от 2,5 до 6 раз. Кроме того, смесь сточных вод характеризуется повышенными концентрациями нитратов, аммония, фосфатов, что говорит о присутствии в стоках творожной и сырной сывороток. Так как на процессы очистки стоков, а также на состояние трубопроводов и сооружений большое влияние оказывает реакция среды (рН), были произведены замеры рН в разное время работы предприятия. Значения рН в разные дни работы предприятия и при разных технологических процессах представлены на рис. 1 и 2.

Таблица 2

**Результаты лабораторных измерений сточных вод
из резервуара-накопителя**

Показатели качества	Пробы сточных вод, взятые из ассенизаторской машины при откачке из накопительного резервуара			
	1	2	3	4
рН	5,72	5,16	4,72	6,17
Взвешенные вещества, мг/дм ³	662,6	1143	9947	729,5
ХПК, мгО/дм ³	2777	5020	7860	3113
БПК ₅ , мгО/дм ³	1204	1932	3626	626
Сухой остаток, мг/дм ³	2050	2268	2341	1033,5
Железо общее, мг/дм ³	0,2	1,12	0,82	2,53
NH ₄ ⁺ , мг/дм ³	20,9	12,69	5,7	13,51
NO ₂ ⁻ , мг/дм ³	4,0	0,4	4	0,2
NO ₃ ⁻ , мг/дм ³	15,16	52,45	75,56	4,04
PO ₄ ³⁻ , мг/дм ³	90,65	147,25	675,9	63,05
Жиры, мг/дм ³	25	66	825	22
Нефтепродукты, мг/дм ³	2,4	4,5	6,67	18,1

Рис. 1. Изменение рН смеси сточных вод (производственных и хозяйственно-бытовых), отобранных в начале недели

Рис. 2. Изменение pH смеси сточных вод (производственных и хозяйственно-бытовых) после промывки оборудования раствором кислоты

Согласно рис. 1 и 2 значение pH сточных вод колеблется в широких пределах, поэтому необходимо осуществлять нейтрализацию стоков перед их очисткой.

Результаты исследования качества сточных вод по отдельным технологическим потокам представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Результаты исследования качества сточных вод
по отдельным технологическим потокам**

Показатели качества	Пробы производственных сточных вод от отдельных технологических потоков						
	СП-мойка щелочным раствором	Сыворотка творожная	Сыворотка сырная	Мойка оборудования	Мойка автоцистерн	Мойка тары	Маслобойка (после первого ополаскивания)
pH	11,85	5,30	5,56	4,46	7,24	4,77	8,72
Взвешенные вещества, мг/дм ³	95,5	383,5	29 646	528	35,5	2306	Не измерялись в связи с невозможностью фильтрации пробы
Сухой остаток, мг/дм ³	1793	10 063	68 092	1415	621	16 833	
Железо общее, мг/дм ³	0,097	0,78	0,2	0,1	0,9	0,1	
NH ₄ ⁺ , мг/дм ³	6,46	3,4	31,5	8,7	2,09	27,6	
NO ₃ ⁻ , мг/дм ³	97,16	26,14	42,72	56,84	26,36	51,88	
PO ₄ ³⁻ , мг/дм ³	2,63	442,45	551,75	144,15	3,45	18,83	14 900
ХПК, мгО/дм ³	457	10 493	119 200	3175	458	20 417	
БПК ₅ , мгО/дм ³	355	3312	67 500	1493	325	11 100	
Жиры, мг/дм ³	650	2340	1639	870	20	699	5897
Нефтепродукты, мг/дм ³	—	—	—	—	7,07	0,68	—

Также был определен pH сточной воды после СР-мойки оборудования раствором кислоты – 1,22.

Согласно табл. 2 все стоки имеют показатели, резко отличающиеся друг от друга. Так, например, содержание органических вещества (значение ХПК и БПК₅) у различных стоков может отличаться примерно в 200–300 раз (от сыворотки до СР-мойки щелочным раствором), а концентрации взвешенных веществ различных потоков сточных вод отличаются в 800 раз (сыворотка и мойка автоцистерн). В целом, наиболее высокие концентрации загрязнений присущи различным видам сывороток, а самые минимальные концентрации наблюдаются в стоках от мойки автоцистерн.

Таким образом, концентрации загрязнений в смеси производственных сточных вод молокозавода в десятки, а некоторые загрязнения и в сотни раз превышают предельно допустимые концентрации, разрешенные к сбросу в водные объекты. Также данные сточные воды не соответствуют российским нормативным требованиям, установленным для сброса в бытовую сеть канализации. Поэтому совместный отвод этих стоков без предварительной обработки отдельных стоков или сброс в хозяйственно-бытовую канализацию, водоем без очистки не представляется возможным. Творожная и сырная сыворотка должна утилизироваться отдельно от всех остальных стоков или отправляться на вторичное использование.

На основании полученных данных предлагается вариант обработки стоков, представленный на рис. 3.

Рис. 3. Возможный вариант обработки сточных вод предприятия молочной промышленности:
н/о – нефтеотделитель; ж – жироловитель; К1 – хозяйственно-бытовая сеть канализации; ЛОС – локальные очистные сооружения

Согласно табл. 2 и рис. 3, сточные воды от мойки автоцистерн после удаления нефтепродуктов в нефтеотделителе могут быть сброшены в сеть хозяйственно-бытовой канализации. Сыворотка, как источник ценных продуктов, должна отправляться на вторичную переработку и использование. Кислые и щелочные стоки, образующиеся соответственно при кислотной или щелочной промывке оборудования, отправляются на взаимную нейтрализацию, которая может осуществляться, например, в отстойниках. Затем нейтрализованные стоки совместно со стоками от мойки тары и производства масла направляются в жироловители и оттуда – на локальные очистные сооружения, где происхо-

дит очистка от органических загрязнений, нитратов, аммония, фосфатов. После ЛОС стоки должны иметь качество, соответствующее нормативным требованиям для сброса в сеть хозяйственно-бытовой канализации.

Выводы

На основании проведенных исследований качества производственных сточных вод молокозавода можно сделать следующие выводы:

Сточные воды, образующиеся в результате технологического процесса, имеют залповый характер поступления и отличаются повышенными концентрациями органических загрязнений, жиров, а также нитратов, аммония и фосфатов.

Значение pH сточных вод изменяется как в течение суток, так и по дням недели и может варьироваться от сильноокислой до сильнощелочной среды в зависимости от типа промывки оборудования и сброса в общий поток сыворотки. Стоки от производства молока и молочной продукции без очистки непригодны для сброса в водные объекты. По причине агрессивности и высокого содержания органических веществ такие сточные воды не соответствуют даже нормам сброса в бытовую сеть канализации.

Предлагается следующая организация системы водоотведения молокозавода: стоки после мойки автоцистерн могут быть сброшены в сеть хозяйственно-бытовой канализации только после нефтеотделителя; кислые и щелочные стоки для выравнивая pH направляются на взаимную нейтрализацию; наиболее жиросодержащие потоки должны пройти очистку на жироуловителе; стоки от мойки тары и оборудования по производству масла после жироуловителя направляются на локальные очистные сооружения, откуда сбрасываются в сеть канализации.

Вторичные продукты (сырная и творожная сыворотка), содержащие ценные белковые вещества, подлежат переработке с целью получения пищевых добавок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мазуряк О.Н. Очистка сточных вод молокозаводов // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2016. Т. 1. С. 432–440.
2. Дятлова Т.В., Федоровская Т.Г. Очистка сточных вод молокозаводов // Водоснабжение и санитарная техника. 2008. № 2. С. 12–17.
3. Данилович Д.А., Максимова А.А. Современные решения по локальной очистке сточных вод предприятий молочной промышленности // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения 2014. № 3. С. 55–63.
4. Mohan S.V., Babu V.L., Sarma P.N. Anaerobic biohydrogen production from dairy wastewater treatment in sequencing batch reactor (AnSBR): Effect of organic loading rate // Enzyme and Microbial Technology. 2007. 41. P. 506–515.
5. Birwal P., Deshmukh G., Priyanka, Saurabh S.P. Advanced Technologies for Dairy Effluent Treatment // Journal of Food, Nutrition and Population Health. 2017. V. 1. № 1:7.
6. Lauer M., Hansen J.K., Lamers P., Thrän D. Making money from waste: The economic viability of producing biogas and biomethane in the Idaho dairy industry // Applied Energy. 2018. V. 222. P. 621–636.
7. Escalante H., Castro L., Amaya M.P., Jaimes L., Jaimes-Estévez J. Anaerobic digestion of cheese whey: Energetic and nutritional potential for dairy sector in developing countries // Waste Management. 2018. V. 71. P. 711–718.

8. Domingues R.F., Sanches T., Silva G.S., Bueno B.E., Ribeiro R., Kamimura E., Franzolin R. Neto, Tommaso G. Effect of enzymatic pretreatment on the anaerobic digestion of milk fat for biogas production // Food Research International. 2015.
9. Mahvi A. Sequential batch reactor: A promising technology in waste water treatment // Iranian J En Health Sci Eng. 5: 79–90.
10. Luo J., Ding L. Influence of pH on treatment of dairy wastewater by nanofiltration using shear-enhanced filtration system // Desalination. 2011. 278. P. 150–156.
11. Kyrychuk I., Zmievskii Y., Myronchuk V. Treatment of Dairy Effluent Model Solutions by Nanofiltration and Reverse Osmosis // Ukrainian Food Journal. 2014. 3. P. 280–287.
12. Luo J., Ding L., Q. B., Jaffrin M.Y., Wan Y.A. Two-stage Ultrafiltration and Nanofiltration Process for Recycling Dairy Wastewater // Bioresource Technology. 2011. 102. P. 7437–7442.
13. Chen Z., Luo J., Wand Y., Cao W., Qi B., Wan Y. A novel membrane-based integrated process for fractionation and reclamation of dairy wastewaters // Chemical Engineering Journal. 2017. V. 333. P. 1061–1070.
14. Chen Z., Luo J., Hang X., Wan Y. Physicochemical characterization of tight nanofiltration membranes for dairy wastewater treatment // Journal of Membrane Science. 2018. V. 547. P. 51–63.
15. Kasmi M., Snoussi M., Dahmeni A., Amor M.B., Hamdi M., Trabelsi I. Use of thermal coagulation, separation, and fermentation process for dairy wastewater treatment // Desalination and Water Treatment. 2015. V. 57. I. 28. P. 13166–13174.
16. Andrade L.H., Mendes F.D.S., Espindola J.C., Amaral M.C.S. Reuse of dairy wastewater treated by membrane bioreactor and nanofiltration: technical and economic feasibility // Brazilian Journal of Chemical Engineering. 2015. V. 32. № 03. P. 735–747.
17. Pagidi A., Thuyavan Y.L., Arthanareeswaran G., Ismail A.F., Jaafar J., Paul D. Polymeric membrane modification using SPEEK and bentonite for ultrafiltration of dairy wastewater // Journal of Applied Polymer Science. 2015. P. 1–11.
18. Markou V., Kontogianni M., Frontistis Z., Tekerlekopoulou A.G., Katsaounis A., Vayenas D. Electrochemical treatment of biologically pre-treated dairy wastewater using dimensionally stable anodes // Journal of Environmental Management. 2017. 202. P. 217–224.
19. Aitbara A., Cherifi M., Hazourli S., Leclerc J. Continuous treatment of industrial dairy effluent by electrocoagulation using aluminum electrodes // Desalination and Water Treatment. 2014.
20. Zielinski M., Debowski M., Krzemieniewski M., Brudniak A. Effectiveness of Dairy Wastewater Treatment in Anaerobic Reactors with Magnetoactive Filling // Environmental Progress and Sustainable Energy. 2015. V. 34. № 2. P. 427–431.
21. Bhattacharjee S., Sarker D. Kinetic Study of Enzymatic Hydrolysis of Lactose in Whey // International Journal of Chemical Engineering Research. 2017. V. 9. № 2. P. 223–228.
22. Lindsay M.J., Walker T.W., Dumesic J.A., Rankin S.A., Huber G.W. Production of monosaccharides and whey protein from acid whey waste streams in the dairy industry // Green Chemistry. 2018. I. 8.
23. Ganju S., Gogate P. A review on approaches for efficient recovery of whey proteins from dairy industry effluents // Journal of Food Engineering. 2017. V. 215. P. 84–96.
24. Carvalho F., Prazeres A.R., Rivas J. Cheese whey wastewater: Characterization and treatment // Science of the Total Environment. 2013. 445–446. P. 385–396.
25. Vourch M., Balannec B., Chaufer B., Dorange G. Treatment of dairy industry wastewater by reverse osmosis for water reuse // Desalination. 2008. 219. P. 190–202.

REFERENCES

1. Mazuryak O.N. Ochistka stochnykh vod molokozavodov [Dairy wastewater treatment]. *Sovremennye tekhnologii v stroitel'stve. Teoriya i praktika*. 2016. V. 1. Pp. 432–440. (rus)
2. Dyatlova T.V., Fedorovskaya T.G. Ochistka stochnykh vod molokozavodov [Dairy wastewater treatment]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*. 2008. No. 2. Pp. 12–17. (rus)
3. Danilovich D.A., Maksimova A.A. Sovremennye resheniya po lokal'noi ochistke stochnykh vod predpriyatiy molochnoi promyshlennosti [Modern solutions for local wastewater treatment of dairy enterprises]. *Nailuchshie dostupnye tekhnologii vodosnabzheniya i vodoootvedeniya*. 2014. No. 3. Pp. 55–63 (rus)

4. Mohan S.V., Babu V.L., Sarma P.N. Anaerobic biohydrogen production from dairy wastewater treatment in sequencing batch reactor (AnSBR): Effect of organic loading rate. *Enzyme and Microbial Technology*. 2007. V. 41. Pp. 506–515.
5. Birwal P., Deshmukh G., Priyanka, Saurabh S.P. Advanced technologies for dairy effluent treatment. *Journal of Food, Nutrition and Population Health*. 2017. V. 1. No. 1:7.
6. Lauer M., Hansen J.K., Lamers P., Thrän D. Making money from waste: The economic viability of producing biogas and biomethane in the Idaho dairy industry. *Applied Energy*. 2018. V. 222. Pp. 621–636.
7. Escalante H., Castro L., Amaya M.P., Jaimes L., Jaimes-Estévez J. Anaerobic digestion of cheese whey: Energetic and nutritional potential for dairy sector in developing countries. *Waste Management*. 2018. V. 71. Pp. 711–718.
8. Domingues R.F., Sanches T., Silva G.S., Bueno B.E., Ribeiro R., Kamimura E., Franzolin Neto R., Tommaso G. Effect of enzymatic pretreatment on the anaerobic digestion of milk fat for biogas production. *Food Research International*. 2015.
9. Mahvi A. Sequential batch reactor: A promising technology in waste water treatment. *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*. V. 5. Pp. 79–90.
10. Luo J., Ding L. Influence of pH on treatment of dairy wastewater by nanofiltration using shear-enhanced filtration system. *Desalination*. 2011. V. 278. Pp. 150–156.
11. Kyrychuk I., Zmievskii Y., Myronchuk V. Treatment of dairy effluent model solutions by nanofiltration and reverse osmosis. *Ukrainian Food Journal*. 2014. V. 3. Pp. 280–287.
12. Luo J., Ding L., Qi B., Jaffrin M.Y., Wan Y.A. Two-stage ultrafiltration and nanofiltration process for recycling dairy wastewater. *Bioresource Technology*. 2011. V. 102. Pp. 7437–7442.
13. Chen Z., Luo J., Wand Y., Cao W., Qi B., Wan Y. A novel membrane-based integrated process for fractionation and reclamation of dairy wastewaters. *Chemical Engineering Journal*. 2017. V. 333. Pp. 1061–1070.
14. Chen Z., Luo J., Hang X., Wan Y. Physicochemical characterization of tight nanofiltration membranes for dairy wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*. 2018. V. 547. Pp. 51–63.
15. Kasmi M., Snoussi M., Dahmeni A., Amor M.B., Hamdi M., Trabelsi I. Use of thermal coagulation, separation, and fermentation process for dairy wastewater treatment. *Desalination and Water Treatment*. 2015. V. 57. No. 28. Pp. 13166–13174.
16. Andrade L.H., Mendes F.D.S., Espindola J.C., Amaral M.C.S. Reuse of dairy wastewater treated by membrane bioreactor and nanofiltration: technical and economic feasibility. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2015. V. 32. No. 03. Pp. 735–747.
17. Pagidi A., Thuyavan Y.L., Arthanareeswaran G., Ismail A.F., Jaafar J., Paul D. Polymeric membrane modification using SPEEK and bentonite for ultrafiltration of dairy wastewater. *Journal of Applied Polymer Science*. 2015. V. 1. No. 11.
18. Markou V., Kontogianni M., Frontistis Z., Tekerlekopoulou A.G., Katsaounis A., Vayenas D. Electrochemical treatment of biologically pre-treated dairy wastewater using dimensionally stable anodes. *Journal of Environmental Management*. 2017. V. 202. Pp. 217–224.
19. Aitbara A., Cherifi M., Hazourli S., Leclerc J. Continuous treatment of industrial dairy effluent by electrocoagulation using aluminum electrodes. *Desalination and Water Treatment*. 2014.
20. Zielinski M., Debowski M., Krzemieniewski M., Brudniak A. Effectiveness of dairy wastewater treatment in anaerobic reactors with magnetoactive filling. *Environmental Progress and Sustainable Energy*. 2015. V. 34. No. 2. Pp. 427–431.
21. Bhattacharjee S., Sarker D. Kinetic Study of Enzymatic Hydrolysis of Lactose in Whey. *International Journal of Chemical Engineering Research*. 2017. V. 9. No. 2. Pp. 223–228.
22. Lindsay M.J., Walker T.W., Dumesic J.A., Rankin S.A., Huber G.W. Production of monosaccharides and whey protein from acid whey waste streams in the dairy industry. *Green Chemistry*. 2018. No. 8.
23. Ganju S., Gogate P. A review on approaches for efficient recovery of whey proteins from dairy industry effluents. *Journal of Food Engineering*. 2017. V. 215. Pp. 84–96.
24. Carvalho F., Prazeres A.R., Rivas J. Cheese whey wastewater: Characterization and treatment. *Science of the Total Environment*. 2013. V. 445–446. Pp. 385–396.
25. Vourch M., Balannec B., Chaufer B., Dorange G. Treatment of dairy industry wastewater by reverse osmosis for water reuse. *Desalination*. 2008. V. 219. Pp. 190–202.

Сведения об авторах

Вялкова Елена Игоревна, канд. техн. наук, доцент, профессор, Тюменский индустриальный университет, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

Глуценко Екатерина Сергеевна, магистрант, Тюменский индустриальный университет, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

Шалабодов Александр Валерьевич, магистрант, Тюменский индустриальный университет, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

Шалабодов Александр Владимирович, магистрант, Тюменский индустриальный университет, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

Осипова Елена Юрьевна, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.

Authors Details

Elena I. Vyalkova, PhD, Professor, Tyumen State Oil and Gas University, 38, Volodarskii Str., 625000, Tyumen, Russia,

Ekaterina S. Glushchenko, Graduate Student, Tyumen State Oil and Gas University, 38, Volodarskii Str., 625000, Tyumen, Russia,

Aleksandr V. Shalabodov, Graduate Student, Tyumen State Oil and Gas University, 38, Volodarskii Str., 625000, Tyumen, Russia,

Aleksandr V. Shalabodov, Graduate Student, Tyumen State Oil and Gas University, 38, Volodarskii Str., 625000, Tyumen, Russia,

Elena Yu. Osipova, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia