

УДК 628.1:628.19
AGRIS F40

<https://doi.org/10.33619/2414-2948/120/10>

НЕГАТИВНОЕ ВЛИЯНИЕ ФАКТОРА БИООБРАСТАНИЯ НА ПРОЦЕСС ОЧИСТКИ ВОДЫ НА ДЖЕЙРАНБАТАНСКОМ КОМПЛЕКСЕ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

©Гусейнова Н. Х., ORCID: 0009-0002-8752-4183, Научно-исследовательский институт воды и мелиорации, г. Баку, Азербайджан, narminhuseynova92@gmail.com

THE NEGATIVE IMPACT OF BIOFOULING FACTOR OF WATER TREATMENT PROCESS AT CEYRANBATAN WATER TREATMENT PLANT COMPLEX

©Huseynova N., ORCID: 0009-0002-8752-4183, Water and Amelioration Scientific Research Institute, Baku, Azerbaijan, narminhuseynova92@gmail.com

Аннотация. Проблема биообрастания в системах водоподготовки считается серьезной технологической проблемой. Так, накопление различных видов микроорганизмов, водорослей и их остатков на поверхностях существенно снижает эффективность работы трубопроводов, различных типов фильтров и мембранных систем. Эти условия приводят к увеличению гидравлического сопротивления (в основном в системах фильтрации) и, как следствие, к увеличению энергопотребления. Фактор биообрастания также отрицательно влияет на показатели качества очищенной воды. Для предотвращения образования биообращаний и разрушения уже образовавшихся биообращаний могут быть использованы различные химические, физические и биологические методы. Перед применением важно определить факторы образования биообращаний и биологические характеристики для оценки эффективности каждого из упомянутых методов. Рассматриваются причины образования биообращаний на Джейранбатанском комплексе ультрафильтрационных очистных сооружений. Проведены исследования по определению характеристик биообращаний и получены результаты для выбора метода очистки.

Abstract. Biofouling in water treatment systems is considered a serious technological challenge. The accumulation of various types of microorganisms, algae, and their residues on surfaces significantly reduces the efficiency of pipelines, various types of filters, and membrane systems. These conditions lead to increased hydraulic resistance (primarily in filtration systems) and, consequently, increased energy consumption. Biofouling also negatively impacts the quality of purified water. Various chemical, physical, and biological methods can be used to prevent biofouling and destroy existing biofouling. Before use, it is important to determine the factors responsible for biofouling and its biological characteristics to evaluate the effectiveness of each method. This article examines the causes of biofouling at the Jeyranbatan Ultrafiltration Treatment Plant Complex. Studies have been conducted to determine the characteristics of biofouling, and the results are used to select a treatment method.

Ключевые слова: Джейранбатанский комплекс, очистные сооружения, биообрастание, микроорганизмы, диатомовые водоросли, очистка воды.

Keywords: Jeyranbatan complex, treatment facilities, biofouling, microorganisms, diatoms, water purification.

В последние годы сокращение водных ресурсов и ухудшение качества воды в источниках обусловили необходимость совершенствования процессов водоподготовки и очистки. Для этого используются относительно современные мембранные технологии, в том числе ультрафильтрационные установки, позволяющие обеспечить высокий уровень очистки воды. Однако, как уже отмечалось, резкое изменение качества воды в источниках за короткий промежуток времени на фоне глобального изменения климата, обуславливает необходимость оптимизации существующих очистных сооружений и применяемых технологических режимов. Главным фактором для оптимизации является комплексная оценка качества воды в источнике. Не ошибёмся, если скажем, что одной из наиболее серьёзных проблем, влияющих на долгосрочную и стабильную работу очистных сооружений, является биоплёночный фактор. Образование и развитие биоплёнки зависят от физико-химических, биологических и гидродинамических свойств воды. Поэтому для профилактики и решения проблемы биоплёнки глубокое изучение механизмов её образования имеет большое научное и практическое значение. Исследования, проведённые, в частности, на Джейранбатанском комплексе ультрафильтрационных очистных сооружений, показывают, что биоплёночный фактор напрямую влияет на эффективность процессов водоподготовки.

Рассматриваются причины образования биопленки, оценка роли микроорганизмов, проводится сравнительный анализ образования биопленки на различных поверхностях (нержавеющая сталь, полиэтилен, стекло) и количества активных микроорганизмов в составе образующейся биопленки, а также ее влияние на микробиологическое качество воды и процессы фильтрации.

Объект и методика исследований

В качестве объекта исследования выбрано Джейранбатанское водохранилище, расположенное на Апшеронском полуострове Азербайджанской Республики и имеющее емкость 186 млн. м³, а также комплекс ультрафильтрационных очистных сооружений, получающих сырую воду из этого же водохранилища и имеющих производительность 6,2 м³/сек. Исследования в основном базировались на методе оценки биологического качества воды и определении индекса сапробности. Степень микробиологического загрязнения воды и активность микроорганизмов, образующих биопленку, определялись с помощью индекса сапробности.

Лабораторно изучались общая численность микроорганизмов, количество диатомовых водорослей, особенности формирования слоя биопленки на различных поверхностях и влияние на них температуры окружающей среды. Пробы для исследований отбирались в течение четырех сезонов 2021-2023 годов.

Результаты приведены в виде средних значений. Все микробиологические анализы проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 34786-2021.

Анализ и обсуждение

Ниже рассмотрены механизмы образования биообрастаний в комплексе ультрафильтрационной очистки воды и их негативное влияние на процесс очистки воды. Не ошибёмся, если подчеркнём, что биообрастание — одна из самых серьёзных проблем в системах водоподготовки, особенно в мембранных технологиях (ультрафильтрация, обратный осмос). В системах ультрафильтрации этот процесс происходит в результате накопления микроорганизмов (прежде всего бактерий и простейших), водорослей и органических веществ на поверхности и в порах фильтров (кроме ультрафильтрационных мембран и микрофильтров первичного осветления). Это накопление постепенно (в некоторых

случаях этот процесс происходит за очень короткое время, примерно 48–72 часа) образует слой биообрастания, который отрицательно влияет на эффективность работы фильтров, а в некоторых случаях и вовсе делает процесс очистки невозможным. Несмотря на то, что биопленки сильно различаются по своим свойствам, их формирование и жизненный цикл следуют одному и тому же механизму и обычно состоят из четырех основных стадий.

Начальный этап адсорбции. На этой стадии крупные органические молекулы, коллоидные частицы и белки, содержащиеся в воде, прилипают к поверхности фильтра, образуя первичное покрытие. Это покрытие служит субстратом, обеспечивающим благоприятные условия для захвата микроорганизмов и их питания [1].

Колонизация микроорганизмов. На этом этапе на поверхности начинают интенсивно размножаться микроорганизмы и бактерии, что приводит к увеличению биомассы.

Образование биоплёнки. Микроорганизмы образуют прочную биоплёнку, связываясь друг с другом посредством липкого вещества, состоящего из полисахаридов и белков, которых они секретируют. Это вещество, называемое внеклеточными полимерными веществами (EPS — extracellular polymeric substances), также защищает образовавшуюся биоплёнку от нейтрализующих агентов.

Зрелая биоплёнка и адгезия. После полного формирования биоплёнки её часть отрывается и распространяется в другие части системы, вызывая образование новых очагов биоплёнки.

Все микроорганизмы, составляющие основу биопленки и являющиеся индикатором степени микробиологического загрязнения сырой воды, делятся на две основные группы (Рисунок 1) [2].

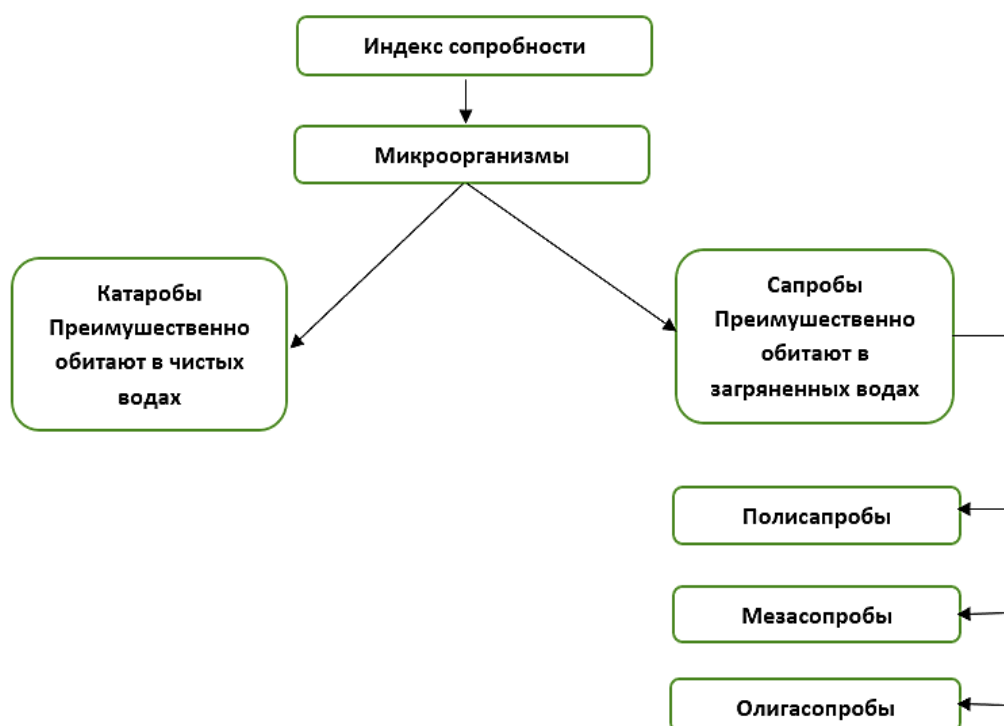


Рисунок 1. Доминирующие виды микроорганизмов в зависимости от степени загрязнения воды

Как видно из Рисунка 1, микроорганизмы, составляющие индекс сапробности, делятся на катаробов и сапробов [3, 4]. Первые обитают преимущественно в чистых водах, а вторые — в водах с различной степенью загрязнения. В зависимости от степени загрязнения вод

преобладающие типы сапробов подразделяются на полисапробы, мезасапробы и олигосапробы. Так, в сильно загрязненных водах преобладают полисапробы, в водах со средней степенью загрязнения — мезасапробы, а в водах со слабой степенью загрязнения — олигосапробы. Достаточно крупные водоёмы (к этому списку можно отнести и Джейранбатанское вдхр.) также разделены на зоны с различной степенью загрязнения (полисапробные, мезосапробные и олигосапробные). В Джейранбатанском водохранилище эти зоны, в основном, основаны на изменении степени загрязнения воды на разных глубинах. Учитывая это, можно разделить существующие микроорганизмы по площади их обитания на две основные группы (обитающие в толще воды и на дне водоёма). Микроорганизмы, обитающие в воде, делятся на три группы: планктон, нектон и нейстон [5]. Сам планктон в свою очередь подразделяется на две группы: истинный и псевдопланктон (Рисунок 2).



Рисунок 2. Разделение микроорганизмов на группы в зависимости от среды их обитания (водохранилище Джейранбатан)

Микроорганизмы, входящие в каждую группу: истинный планктон (водоросли, хлоропласты, ракообразные, кишечнополостные), псевдопланктон (неживое органическое вещество, неживые микроорганизмы, целлюлоза и т.д.), нектон (рыбы, моллюски), нейстон (жгутиконосцы и инфузории), бентос (микроорганизмы, обитающие на дне водоёма).

Сапробность — важный биологический показатель, характеризующий степень загрязнения водной среды органическими веществами и видовой состав обитающих в ней живых организмов в соответствии с этим загрязнением [6]. Впервые это понятие было предложено немецкими гидробиологами в конце XIX века для оценки биологического состояния водоемов. Индекс сапробности в основном характеризует количество органических веществ в воде, их разложение и тесно связан с содержанием кислорода в водоеме. В результате обилия органических веществ увеличивается активность микроорганизмов, увеличивается потребление кислорода и, как следствие, нарушается биологическое равновесие воды [7]. Такие изменения оказывают серьезное влияние на качество воды и биологическое разнообразие. Учитывая вышеизложенное, можно сказать, что определение уровня сапробности играет важную роль в экологическом мониторинге

водных объектов, выявлении источников загрязнения и планировании мероприятий по восстановлению водной среды. Кроме того, при оптимизации существующих водоочистных сооружений крайне важно учитывать степень изменчивости сапробного фактора в источниках забора сырой воды. Сапробность — это наличие у микроорганизмов физиологических комплексов, обеспечивающих их развитие в воде, загрязнённой органическими веществами. Индекс сапробности играет важную роль в определении биообрастания систем водоснабжения. В Таблице 1 ниже приведены уровни чистоты воды и названия сапробных зон в зависимости от индекса сапробности воды в водоёме [8].

Таблица 1

ЧИСТОТА ВОДЫ ПО ИНДЕКСУ САПРОбНОСТИ

<i>Индекс сапробности, S</i>	<i>Класс чистоты воды</i>	<i>Общая характеристика класса чистоты</i>	<i>Наименование сапробной зоны</i>
≤ 0.5	1	Очень чистый	Ksenosaprob
0.5-1.5	2	Чистый	Oligasaprob
1.5-2.5	3	Менее загрязненный	Mezasaprob
2.5-3.5	4	Загрязненный	Mezasaprob
3.5-4.0	5	Сильно загрязненный	Polisaprob
≤ 4.0	6	Очень сильно загрязненный	Polisaprob

Индекс сапробности напрямую зависит от вида и количества микроорганизмов, присутствующих в воде водоёма. Оценка качества воды по микробиологическим показателям представлена в Таблице 2.

Таблица 2

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОДЫ ПО МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ

<i>Класс чистоты</i>	<i>Общая характеристика класса чистоты</i>	<i>Общее количество бактерий, х 10⁶</i>	<i>Количество сапрофитных бактерий 1000 кл/мл</i>	<i>Соотношение общего количества и сапрофитных бактерий</i>
I	Очень чистый	≤ 0.5	≤ 0.5	Как 1000
II	Очень чистый	0.5-1	0.5 5.0	>1000
III	Менее загрязненный	1.0-3.1	5.1-10	<1000 и >100
IV	Менее загрязненный	3.1-5.0	10.0-50.0	<100
V	Загрязненный	5.0-10.0	≥50-1000	<100
VI	Сильно загрязненный	≥ 10	>1000	<100

Был определен индекс сапробности Джейранбатанского водохранилища в разные сезоны года и получены результаты (Таблица 3).

Таблица 3

САПРОбНЫЙ ИНДЕКС ДЖЕЙРАНБАТАНСКОГО ВДХР. В РАЗНЫЕ СЕЗОНЫ ГОДА

<i>Сезон</i>	<i>Индекс сапробности</i>	<i>Общая характеристика класса чистоты</i>	<i>Название сапробной зоны</i>
Весна	1.8	Менее загрязненный	mezasaprob
Лето	2.4	Менее загрязненный	mezosoprob
Осень	1.2	Чистый	oligasoprob
Зима	0.7	Чистый	oligasoprob

Как видно из Таблицы 3, в основном в весенне-летние месяцы качество воды водохранилища переходит из категории чистой в категорию менее загрязненной по сравнению с осенне-зимним периодом. Далее была проведена оценка качества воды водохранилища по общему числу бактерий по сезонам года и получены результаты, представленные в Таблице 4.

Таблица 4

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОДЫ ПО ОБЩЕМУ ЧИСЛУ БАКТЕРИЙ ПО СЕЗОНАМ

Сезон	Общая характеристика класса чистоты	Общее количество бактерий, $\times 10^6$	Количество сапрофитных бактерий $\times 1000$ кл/мл	Соотношение общего количества бактерий и сапрофитных бактерий
Весна	Менее загрязненный	2.7	3.2	<1000 и >100
Лето	Менее загрязненный	3.9	4.5	<1000 и >100
Осень	Чистый	0.7	0.5	>1000
Зима	Чистый	0.3	0.17	>1000

Качество воды, указанное в Таблице 4, идентично качеству, указанному в Таблице 3. Образцы биопленки, отобранные для практических исследований, были исследованы нами на наличие микроорганизмов *Esherichia coli*, *Aeromonas*. Плотность живых организмов в слое биопленки составила $1,0-1,9 \times 10^9$ микроорганизмов на 1 см^2 площади. В указанных пробах обнаружены *Aeromonas* и *E. coli*. Определить принадлежность обнаруженных микроорганизмов к патогенным штаммам по техническим причинам не представилось возможным. Интересные результаты были получены при изучении механизмов формирования биопленок на различных субстратах. В качестве субстратов использовались пластины из нержавеющей стали, поливинилхлорида и стекла. Ниже представлена плотность микроорганизмов рода *Aeromonas* в биопленках, сформированных на различных субстратах (температура окружающей среды 20°C) (Рисунок 3).

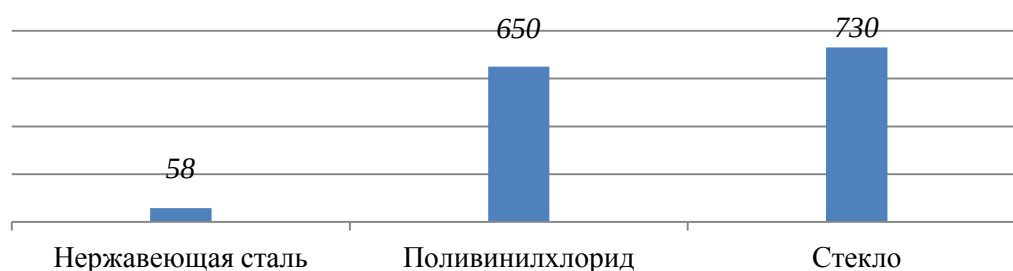


Рисунок 3. Плотность *Aeromonas* в биопленках, сформированных на различных субстратах (число колоний в см^2)

Как видно из диаграммы, плотность биоплёнки на поливинилхлориде (пластиковых водопроводных трубах), широко используемом в последние годы, более чем в 10 раз выше, чем на нержавеющей стали. Вероятно, это связано с наличием в составе нержавеющей стали других металлов, таких как хром, марганец и никель, которые негативно влияют на процессы метаболизма микроорганизмов. Однако для получения полной картины необходимы более глубокие исследования. Аналогичные исследования были проведены с общими колиформными микроорганизмами и получены следующие результаты (Рисунок 4). Как видно из диаграммы, были получены схожие результаты, а плотность колиформных микроорганизмов на поливинилхлориде была значительно выше, чем на нержавеющей стали.

Температура окружающей среды является одним из основных абиотических факторов, влияющих на формирование и плотность биоплёнки. Учитывая этот фактор, наши исследования проводились при температуре 37°C.

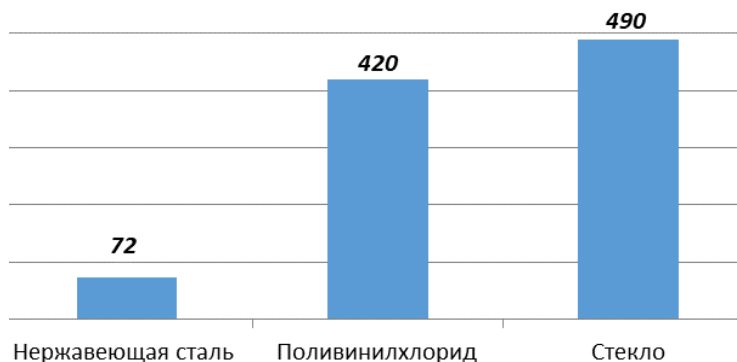


Рисунок 4. Плотность общих колиформных микроорганизмов в биопленках, сформированных на различных субстратах (число колоний в см²)

Отклонений от прогнозируемых значений способности *Aeromonas* к образованию биоплёнок не наблюдалось. Как и ожидалось, плотность микроорганизмов при 20°C была несколько выше (Рисунок 5).

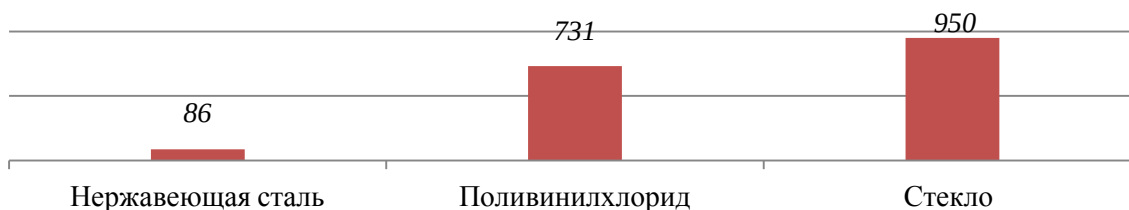


Рисунок 5. Плотность *Aeromonas* в биопленках, сформированных на различных субстратах (температура окружающей среды 37°C) (число колоний в см²)

Однако плотность микроорганизмов в биоплёнке, образованной общими колиформными бактериями, вопреки ожиданиям, значительно снизилась (рис. 7).

Дальнейшие исследования показали, что это связано с тем, что количество свободных микроорганизмов в воде при температуре 37°C больше, чем при 22°C. Таким образом, 37°C является оптимальной температурой для роста общих колиформных бактерий. В связи с этим предполагается, что микроорганизмы предпочитают жить в свободном состоянии (Рисунок 6).

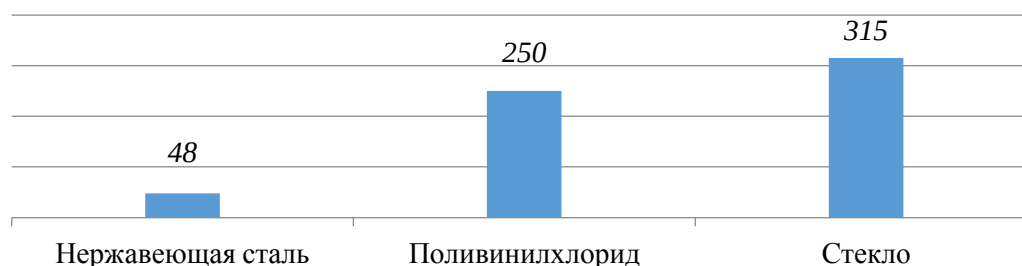


Рисунок 6. Плотность общих колиформных микроорганизмов в биопленках, сформированных на различных субстратах (температура окружающей среды 37°C) (число колоний в см²)

Поскольку полученные результаты представляли особый интерес, после выращивания биопленки при 20⁰С, образцы, как и прежде, помещали в термостат при 37⁰С на 12 часов и исследовали повторно по истечении указанного срока (Рисунок 7).

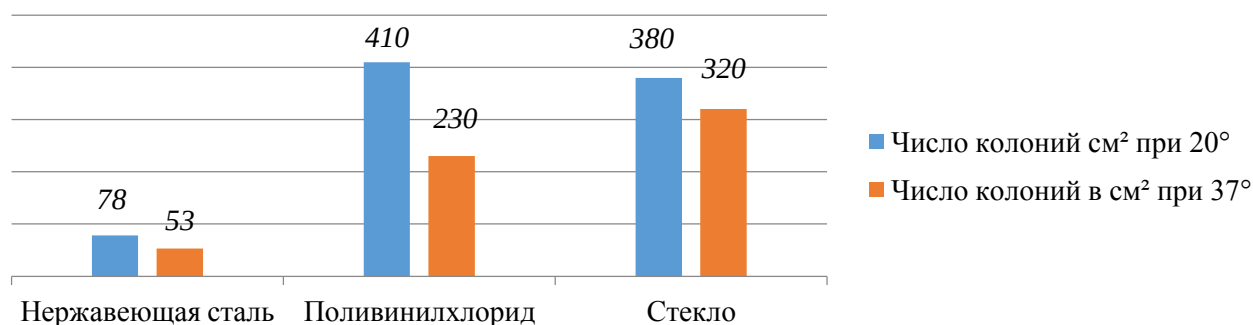


Рисунок 7. Изменения, наблюдаемые в общем количестве колиформных микроорганизмов на различных субстратах после помещения биопленки, выращенной при 22⁰С, в термостате при 37⁰С на 12 часов

Как видно, при помещении всех трёх субстратов вместе с биоплёнкой при температуре 37⁰С наблюдалось снижение плотности общих колиформных микроорганизмов в биоплёнке. При отборе проб из водной среды, где находились чашки Петри, и определении количества общих колиформных микроорганизмов наблюдалось увеличение количества свободных микроорганизмов (Рисунок 8).

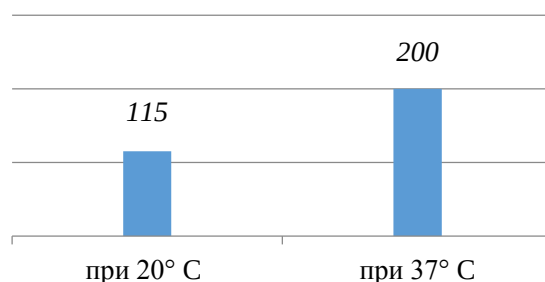


Рисунок 8. Общее количество колиформных бактерий при 20⁰С и 37⁰С в одной и той же среде (число колоний в 100 мл)

При 20⁰С — количество микроорганизмов составило 115, а при 37⁰С — ≥200. Это еще раз свидетельствует о том, что микроорганизмы покидают биопленку, попадая в благоприятную среду.

Вывод

Проведенные исследования показали, что биопленка оказывает непосредственное влияние на эффективность процессов очистки. На основании данных о сапробности проб воды отмечена сезонная изменчивость микробиологической активности. В результате сравнения состава биопленки на поверхностях различных материалов установлено, что количество живых микроорганизмов на поверхности нержавеющей стали наименьшее. Это свидетельствует о том, что материалы из нержавеющей стали способны частично предотвращать образование биопленки и более подходят для более эффективной и гигиеничной эксплуатации в системах водоподготовки.

Список литературы:

1. Марданова А. М., Кабанов Д. А., Рудакова Н. Л., Шарипова М. Р. Биопленки: основные методы исследования. Казань, 2016. 42 с.
2. Санитарная гидробиология: краткий курс лекций для бакалавров I курса направления подготовки 35.03.08 «Водные биоресурсы и аквакультура». Саратов, 2016. 107 с.
3. Беликова С. Е. Водоподготовка. Справочник для профессионалов. М.: Аква-Терм, 2007. 222 с.
4. Рыжков Л. П., Раднаева В. А., Рябинкина М. Г. Гидробиологические исследования на пресноводных водоемах. Петрозаводск, 2015. 45 с.
5. Suthers I., Rissik D., Richardson A. (ed.). Plankton: A guide to their ecology and monitoring for water quality. – CSIRO publishing, 2019.
6. Танкевич П. Б., Жаваронкова А. М. Санитарная гидробиология. Конспект лекций. Керчь, 2015. 71 с.
7. Яровая О. В. Растворенные и взвешенные органические вещества в водных системах. М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2015. 91 с.
8. Зуева Н. В. Алексеева Д. К. Кулеченко А. Ю. Примаков Е. А. Зуев Ю. А. Воякина Е. Ю. Степанова А. Б. Биоиндикация и биотестирование в пресноводных экосистемах. СПб., 2019. 140 с.
9. Гидаятзаде С. Г., Гейдарова Э. С. Велиева Анализ микробиологического состава воды Джейранбатанского водохранилища Азербайджанской Республики // American Scientific Journal. 2020. №34-2(34). С. 9-13.
10. Гусейнова Н. Х. Влияние степени сезонных колебаний самоочищения воды Джейранбатанского водохранилища на процесс водоподготовки методом ультрафильтрации // География и водные ресурсы. 2024. №4. С. 44-53. <https://doi.org/10.55764/2957-9856/2024-4-44-53.38>
11. Гусейнова Н. Х. Оптимизация водоподготовки на Джейранбатанских ультрафильтрационных установках путем включения стадии обратной промывки раствором сульфата меди // География и водные ресурсы. 2025. №2. С. 30-41. <https://doi.org/10.55764/2957-9856/2025-2-30-41.18>

References:

1. Mardanova, A. M., Kabanov, D. A., Rudakova, N. L., & Sharipova, M. R. (2016). Bioplenki: osnovnye metody issledovaniya. Kazan'. (in Russian).
2. Sanitarnaya gidrobiologiya: kratkii kurs lektzii dlya bakalavrov I kursa napravleniya podgotovki 35.03.08 "Vodnye bioresursy i akvakul'tura" (2016). Saratov. (in Russian).
3. Belikova, S. E. (2007). Vodopodgotovka. Spravochnik dlya professionalov. Moscow. (in Russian).
4. Ryzhkov, L. P., Radnaeva, V. A., & Ryabinkina, M. G. (2015). Gidrobiologicheskie issledovaniya na presnovodnykh vodoemakh. Petrozavodsk. (in Russian).
5. Suthers, I., Rissik, D., & Richardson, A. (2019). Plankton: A guide to their ecology and monitoring for water quality. CSIRO publishing.
6. Tankevich, P. B., & Zhavaronkova, A. M. (2015). Sanitarnaya gidrobiologiya. Konspekt lektzii. Kerch'. (in Russian).
7. Yarovaya, O. V. (2015). Rastvorennnye i vzveshennnye organicheskie veshchestva v vodnykh sistemakh. Moscow. (in Russian).

8. Zueva, N. V. Alekseeva, D. K. Kulechenko, A. Yu. Primak, E. A. Zuev, Yu. A. Voyakina, E. Yu. & Stepanova, A. B. (2019). Bioindikatsiya i biotestirovanie v presnovodnykh ekosistemakh. St. Petersburg. (in Russian).
9. Gidayatzade, S. G., & Geidarova, E. S. (2020). Velieva Analiz mikrobiologicheskogo sostava vody Dzheiranbatanskogo vodokhranilishcha Azerbaidzhanskoi Respubliki. *American Scientific Journal*, (34-2(34)), 9-13. (in Russian).
10. Guseinova, N. Kh. (2024). Vliyanie stepeni sezonnykh kolebaniy samoochishcheniya vody Dzheiranbatanskogo vodokhranilishcha na protsess vodopodgotovki metodom ul'trafil'tratsii. *Geografiya i vodnye resursy*, (4), 44-53. (in Russian). <https://doi.org/10.55764/2957-9856/2024-4-44-53.38>
11. Guseinova, N. Kh. (2025). Optimizatsiya vodopodgotovki na Dzheiranbatanskikh ul'trafil'tratsionnykh ustanovkakh putem vklyucheniya stadii obratnoi promyvki rastvorom sul'fata medi. *Geografiya i vodnye resursy*, (2), 30-41. (in Russian). <https://doi.org/10.55764/2957-9856/2025-2-30-41.18>

Поступила в редакцию
21.10.2025 г.

Принята к публикации
29.10.2025 г.

Ссылка для цитирования:

Гусейнова Н. Х. Негативное влияние фактора биообрастания на процесс очистки воды на Джейранбатанском комплексе очистных сооружений // Бюллетень науки и практики. 2025. Т. 11. №11. С. 84-93. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/120/10>

Cite as (APA):

Huseynova, N. (2025). The Negative Impact of Biofouling Factor of Water Treatment Process at Ceyranbatan Water Treatment Plant Complex. *Bulletin of Science and Practice*, 11(11), 84-93. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/120/10>