

УДК 628.35

© Ю. А. Феофанов, д-р техн. наук, профессор
© А. В. Кудрявцев, канд. техн. наук, доцент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: ufeofanov@rambler.ru, argo14@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2025-22-1-76-84

© Yu. A. Feofanov, Dr. Sci. Tech., Professor
© A. V. Kudryavtsev, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: ufeofanov@rambler.ru, argo14@mail.ru

ФОРМИРОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ БИОПЛЕНКИ В БИОФИЛЬТРАХ ПРИ РАЗНЫХ РЕЖИМАХ ПОДАЧИ СТОЧНЫХ ВОД

FORMATION AND DEVELOPMENT OF BIOFILM IN BIOFILTERS UNDER DIFFERENT MODES OF WASTEWATER SUPPLY

Приведены результаты исследований работы лабораторных лотковых моделей биофильтров с разными материалами загрузки при различных режимах подачи сточных вод. Установлено, что при увеличении гидравлической нагрузки и уменьшении перерывов между орошениями загрузки биофильтра скорость прироста и количество закрепленной на загрузке биопленки снижались во всех испытанных режимах подачи сточных вод. Эпизодически, через определенные промежутки времени (15–25 суток), происходил интенсивный смыв с загрузки прикрепленной биопленки, связанный с ее возрастом и утратой прикрепительных функций. Амплитуда колебаний количества биопленки в ходе процесса (в результате ее роста и периодического смыва) уменьшается с повышением расхода жидкости, а также при сокращении интервала между орошениями загрузки. На загрузках из гидрофобных и шероховатых материалов скорость прироста биопленки была выше только в начале процесса очистки, при достижении определенной толщины биопленки дальнейший ее рост шел на всех загрузках одинаково и определялся свойствами биопленки. Для предотвращения заиливания загрузки и повышения эффективности работы биофильтров рекомендуется в процессе их работы менять режим подачи сточных вод в зависимости от скорости прироста биопленки, ее количества на загрузке и возраста.

Ключевые слова: биофильтр, биопленка, загрузка биофильтра, скорость роста биопленки, режим подачи жидкости на биофильтр.

The results of studies of laboratory tray models of biofilters with different materials of loading at different modes of wastewater supply are presented. It has been found that with an increase in the hydraulic load, as well as with a decrease in the breaks between irrigation of the biofilter loading, the growth rate and the amount of biofilm fixed at the loading decreases in all tested modes of wastewater supply. Episodically, at certain intervals (15–25 days), there was an intensive flushing from the load of the attached biofilm, associated with its age and loss of attachment functions. The amplitude of fluctuations in the amount of biofilm during the process (as a result of its growth and periodic flushing) decreases with an increase in fluid flow, as well as with a reduction in the interval between irrigation of the loading. At the loads made of hydrophobic and rough materials, the biofilm growth rate was higher only at the beginning of the purification process, when a certain thickness of the biofilm was reached, its further growth was the same at all loads and was determined by the properties of the biofilm. In order to prevent siltation of the media and increase the efficiency of biofilters, it is recommended to change the mode of wastewater supply depending on the rate of biofilm growth, its amount at the load and age.

Keywords: biofilter, biofilm, biofilter loading, biofilm growth rate, liquid supply mode to biofilter.

Введение

Процесс очистки сточных вод на биофильтрах осуществляется микроорганизмами прикрепленной на загрузке биопленки, и ее состояние во многом определяет протекание процесса очистки. На формирование и развитие биопленки влияют вид загрязнений сточных вод, нагрузка по органическим загрязнениям, а также величина гидравлической нагрузки и режим подачи сточных вод на биофильтр. Гидравлическая нагрузка, или удельный расход сточных вод на единицу площади биофильтра, является условным показателем скорости потока жидкости через загрузку биофильтра и принимается в зависимости от условий работы этих сооружений, вида и свойств загрузочного материала и других факторов [1–5].

Необходимым условием стабильной работы биофильтров является обеспечение баланса между приростом и выносом избыточной биопленки из тела биофильтра. Излишнее количество биопленки на загрузке уменьшает объем пор, затрудняет воздухообмен и может привести к полному закупориванию верхнего слоя загрузки и нарушению работы биофильтра. Регулировать прирост и вынос биомассы из биофильтра можно путем изменения величины гидравлической нагрузки и режима подачи сточных вод. Тот же результат достигается при введении рециркуляции очищенной жидкости (или изменении ее кратности) за счет соответствующего изменения при этом величины гидравлической нагрузки и снижения концентрации загрязнений в поступающей воде. При работе биофильтров величина гидравлической нагрузки должна устанавливаться на том уровне, при котором достигается достаточная скорость движения жидкости, обеспечивающая смыв и вынос избыточной биопленки и предотвращающая тем самым заиливание загрузки. Поэтому режим орошения загрузки биофильтров следует назначать в зависимости от скорости прироста и количества

биопленки на загрузке. Вместе с этим нужно учитывать, что существуют предельные величины гидравлических нагрузок, при которых бактерии вымываются из биофильтра, не образуя биологической пленки на загрузке. Например, по данным [4] при очистке бытовых сточных вод на биофильтре с загрузкой из природных материалов рост биопленки прекращается при гидравлической нагрузке свыше $200 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$.

Следует учитывать, что при низких значениях гидравлических нагрузок возникают сложности с распределением поступающей жидкости по поверхности загрузки, а также с ее промывкой и удалением избыточной биопленки. Для улучшения орошения загрузки биофильтров подачу сточных вод на них осуществляют импульсными порциями, обычно с помощью спринклерных или вращающихся трубчатых (реактивных) распределительных устройств струйного типа. Главными преимуществами этих оросителей являются простота устройства и эксплуатации, малая засоряемость, высокий коэффициент расхода и низкие потери энергии струй. Периодическая (импульсная) подача жидкости на биофильтр позволяет кратковременно повышать скорость потока и таким образом обеспечить промывку загрузки, а также увеличить площадь ее орошения. При этом за счет периодической (импульсной) подачи сточных вод максимальная гидравлическая нагрузка (в период орошения) на высоконагружаемые биофильтры увеличивается в 2–3 раза [5].

Значения гидравлических нагрузок, при которых работают орошаемые биофильтры, обычно принимают независимо от состояния и количества биопленки в пределах от $1\text{--}3 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ (капельные) до $10\text{--}70 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ (высоконагружаемые и биофильтры с пластмассовой загрузкой) [1, 2, 5, 6]. В процессе работы этих сооружений гидравлическая нагрузка и режим орошения загрузки, как правило, поддер-

живаются постоянными, в то время как количество биомассы в них изменяется. Литературные данные о количестве и свойствах биопленки в биофильтрах малочисленны, крайне разноречивы и обычно не связаны с режимом подачи сточных вод. Также разнятся и данные о величине активного слоя биопленки (где наиболее интенсивно протекают процессы изъятия и окисления загрязнений), который по разным источникам колеблется от 0,04–0,2 мм [7] до 1–3 мм [8, 9]. При превышении активной толщины биопленки поступление питательных веществ и кислорода в нижний слой пленки снижается, что приводит к снижению скорости окислительных процессов и локальному разрушению и отторжению биопленки [2, 10, 11]. При эксплуатации биофильтров контроль за ростом и количеством биомассы не осуществляется, хотя эти показатели изменяются в ходе процесса очистки и влияют на его эффективность. Прирост биопленки сменяется периодическим выносом ее из загрузки, при этом режим подачи сточных вод и гидравлическая нагрузка играют здесь важную роль и оказывают существенное влияние на эффективность работы сооружения.

Целью работы являлось исследование процессов формирования и развития биологической пленки на разных материалах загрузки биофильтров при различных режимах подачи сточных вод (разных гидравлических нагрузках и способах орошения загрузки) и разных нагрузках по органическим загрязнениям.

Методы и материалы

Исследования проводились на лабораторных лотковых моделях биофильтра, работающих в проточном режиме. Модель состояла из нескольких параллельно действующих лотков, на которые отдельными дозирующими устройствами подавалась сточная жидкость. Лотки были выполнены из листового поливинилхлорида, размер лотков $L \times B \times H = 45 \times 5 \times 5$ см. Лотки располагались

под уклоном 10 градусов. В отдельном цикле опытов на дно лотков, представляющих фрагмент загрузки биофильтра, были наклеены различные материалы для качественной оценки влияния их вида на рост биопленки. Конструкция моделей позволяла менять режим их орошения, проводить контроль прироста биопленки взвешиванием лотков. В опытах испытывались следующие режимы орошения загрузки:

- периодическая (импульсная) подача сточных вод с интервалом между орошениями 270 с при гидравлической нагрузке 0,16 и 0,32 м³/сут на 1 м² поверхности дна лотка;
- периодическая (импульсная) подача с интервалами 60 с при гидравлической нагрузке 1,6 и 3,2 м³/сут на 1 м² поверхности лотка;
- непрерывная подача сточных вод при гидравлической нагрузке 1,6 и 3,2 м³/(м² · сут).

Величины выбранных расходов соответствовали диапазону обычно используемых на практике величин гидравлических нагрузок для различных типов биофильтров. В первом случае создавались условия орошения загрузки, характерные для капельных биофильтров с дозирующими баками, во втором — для высоконагруженных биофильтров с вращающимися водораспределителями. Третий вариант подачи жидкости был осуществлен для его сравнения с предыдущими способами орошения загрузки биофильтров. Опыты проводились на модельных бытовых сточных водах при ХПК = 200 и 500 мг/л. Продолжительность каждого опыта составляла 1,5–2 месяца. Контроль за ходом процесса проводился путем измерений ряда параметров на месте (расход и температура воды, вес загрузки с биопленкой), а также лабораторными анализами проб сточных вод (на ХПК) и замерами влажности и зольности проб биопленки. Все анализы выполнялись по стандартным методикам [12].

Результаты и обсуждение

Результаты проведенных исследований на примере наиболее характерных опытов при

ХПК подаваемых сточных вод 500 мг/л приведены на рис. 1–3. На рис. 1 показаны изменения во времени количества закрепленной на загрузке биопленки (во влажном состоянии) на моделях капельного биофильтра при гидравлической нагрузке 0,16 (кривая 1) и 0,32 м³/(м² · сут) (кривая 2). Способ орошения загрузки в обоих случаях был принят одинаковым — периодическая (импульсная) подача сточных вод с интервалом $\Delta t = 270$ с.

Как видно на рис. 1, процесс формирования и развития биопленки на фрагменте загрузки капельного биофильтра имел волнообразный характер: вслед за фазой роста биопленки на загрузке происходил ее смыв и вынос вместе с очищаемой жидкостью, затем этот цикл повторялся. Возраст биопленки, при котором прирост сменялся ее выносом, при гидравлической нагрузке 0,16 и 0,32 м³/(м² · сут) (нагрузка по ХПК при этом равнялась 80 и 160 г/(м² · сут) соответственно) составлял 20 и 16 суток. Период снижения количества биопленки на загрузке (нисходящая часть кривых на рис. 1) составлял при тех же величинах гидравлической

нагрузки соответственно 12 и 8 суток. В этот период одновременно происходили смыв и рост биопленки, она смывалась последовательно с отдельных участков загрузки, на которых сразу же закреплялась и росла новая биомасса.

Отмечено, что скорость прироста биопленки (на фазе ее роста) снижалась при увеличении расхода подаваемой жидкости. Максимальное количество биопленки также снижалось при повышении гидравлической нагрузки.

На рис. 2 показано, как менялось в ходе опыта количество закрепленной на загрузке биопленки (во влажном состоянии) для модели высоконагружаемого биофильтра при расходах жидкости 1,6 м³/(м² · сут) (кривая 1) и 3,2 м³/(м² · сут) (кривая 2). Кривые графика (рис. 2) имеют тот же характер, что и на рис. 1, это свидетельствует о схожей картине формирования и развития биопленки в капельных и высоконагружаемых биофильтрах.

Для высоконагружаемых биофильтров при величинах гидравлической нагрузки

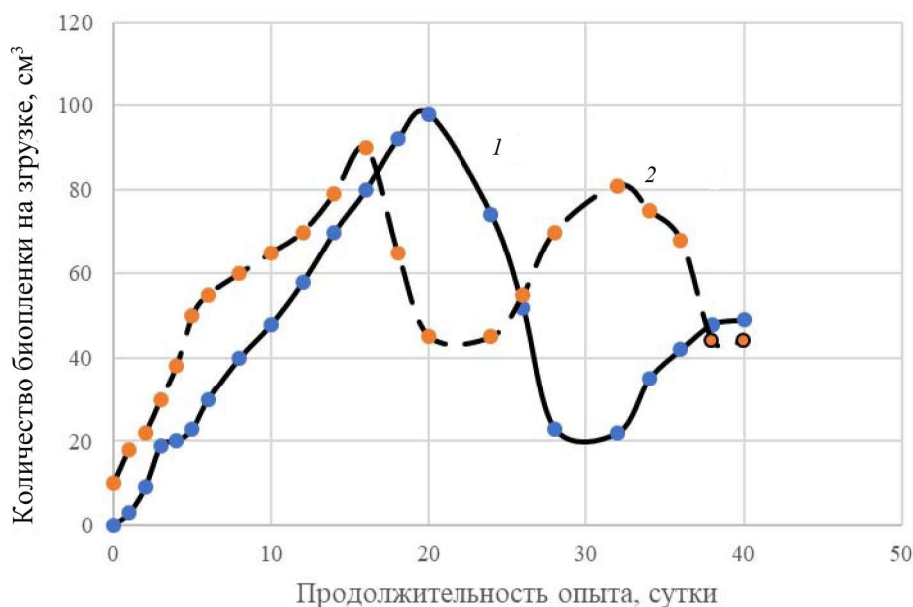


Рис. 1. Изменение в ходе опыта количества закрепленной на загрузке биопленки (во влажном состоянии) для модели капельного биофильтра при гидравлической нагрузке 0,16 м³/(м² · сут) (кривая 1) и 0,32 м³/(м² · сут) (кривая 2)

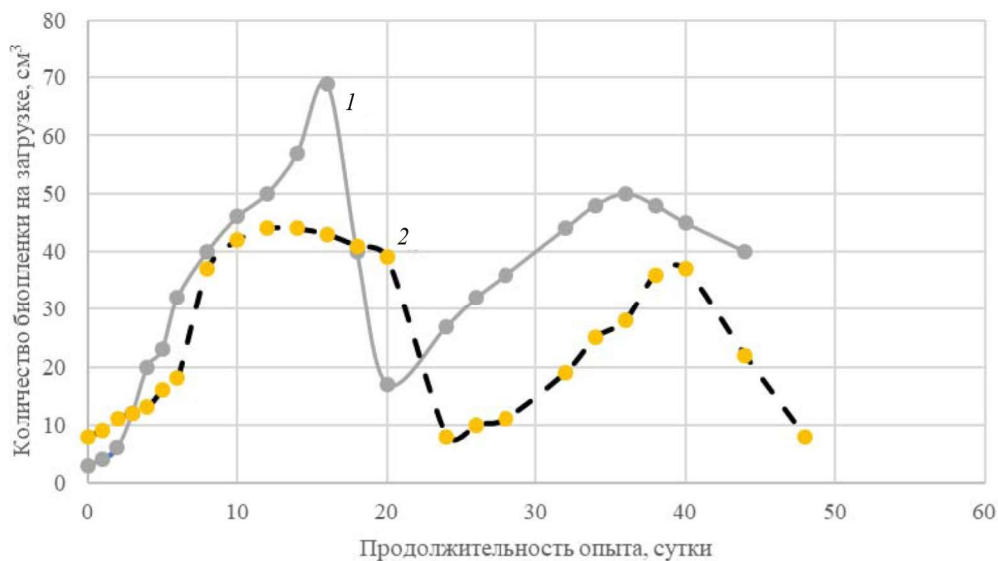


Рис. 2. Изменение в ходе опыта количества закрепленной на загрузке биопленки (во влажном состоянии) для модели высоконагружаемого биофильтра при расходе жидкости $1,6 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ (кривая 1) и $3,2 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ (кривая 2)

$1,6$ и $3,2 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ (нагрузка по ХПК при этом равнялась соответственно 800 и $1600 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$), возраст биопленки, при котором ее прирост сменялся выносом, составлял 16 суток, а период снижения количества биопленки на загрузке (нисходящая часть кривых на рис. 2) составлял 6 – 8 суток. Скорость прироста биопленки (на фазе ее роста), а также максимальное количество биопленки в модели высоконагружаемого биофильтра также снижались при повышении гидравлической нагрузки, как и на капельном биофильтре.

На рис. 3 приведены данные о количестве биопленки (во влажном состоянии) для модели высоконагружаемого биофильтра при постоянной величине гидравлической нагрузки ($1,6 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$) и нагрузке по ХПК ($800 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$), но разным режиме подачи сточных вод: с периодической ($\Delta t = 60 \text{ с}$) — кривая 1 и с непрерывной ($\Delta t = 0$) подачей воды — кривая 2.

Как видно на этом графике, при разных режимах подачи сточных вод картина формирования и развития биопленки в высоконагружаемом биофильтре не меняется

и имеет тот же вид. Уменьшение перерыва между орошениями загрузки (с интервала 60 с до нуля) приводило к снижению количества биопленки на загрузке биофильтра на любой фазе ее развития.

При анализе полученных данных (рис. 1–3) отмечены следующие одинаковые для всех проведенных опытов закономерности работы орошаемых биофильтров. Скорость прироста и максимальное количество биопленки снижаются при увеличении гидравлической нагрузки и уменьшении перерыва между орошениями загрузки. Увеличение расхода подаваемой жидкости приводит к выносу слабо закрепленных форм микроорганизмов, что, соответственно, ограничивает рост биопленки. Влияние перерывов в орошении на прирост биопленки объясняется более благоприятными условиями для закрепления микроорганизмов, создаваемыми в перерывах между орошениями в условиях, когда жидкость, удерживаемая на загрузке, практически неподвижна. Во всех опытах при любых испытанных режимах подачи сточных вод эпизодически, через определенные промежутки времени (15 – 25 суток),

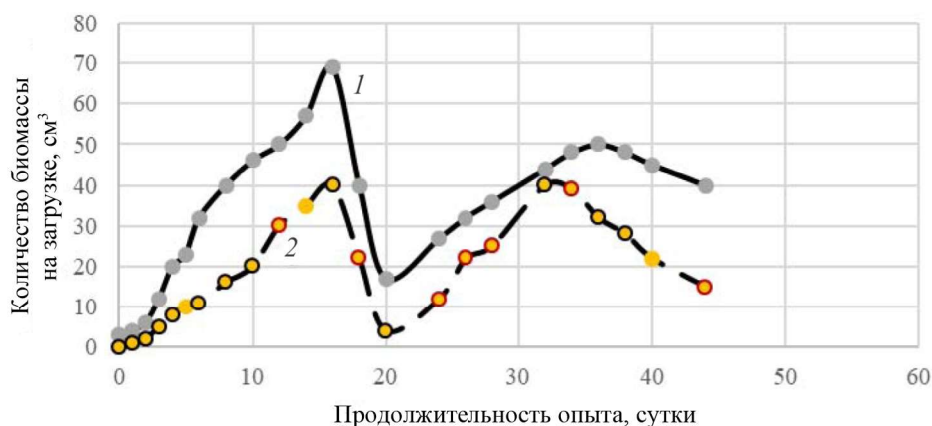


Рис. 3. Изменение в ходе опыта количества закрепленной на загрузке биопленки (во влажном состоянии) для модели высоконагружаемого биофильтра с периодической (кривая 1) и непрерывной подачей воды (кривая 2) при расходе жидкости $1,6 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$

происходил интенсивный смыв с загрузки прикрепленной биопленки, связанный с ее возрастом. Это вызвано снижением поступления питательных веществ и кислорода воздуха в нижние слои биопленки по мере ее роста на загрузке, что приводило к лизису клеток в этих слоях, отторжению и выносу биопленки. Амплитуда колебаний количества биопленки в ходе процесса (в результате ее роста и периодического смыва) уменьшается с повышением расхода жидкости, а также при сокращении интервала между орошениями загрузки.

В таблице приведены средние данные за весь цикл опытов (пять месяцев) по эффективности работы биофильтров с разными режимами подачи жидкости.

Невысокие эффекты очистки сточных вод обусловлены небольшими размерами модели биофильтра, тем не менее, полученные

данные свидетельствуют о том, что более эффективно работала модель биофильтра с непрерывным режимом орошения загрузки, поскольку при импульсной подаче жидкости на биофильтр сокращалось время ее пребывания на загрузке и повышалась вероятность ее проскока. В периоды смыва биопленки, ввиду нарушения ее стабильного состояния, эффект очистки несколько снижался, однако быстро вновь восстанавливался на прежнем уровне.

Влажность биопленки в ходе опытов на всех моделях была примерно одинаковой (94,8–95,3 %) и в среднем равнялась 95 %. Верхний слой биопленки более рыхлый, чем нижний, «старый» ее слой, но разница во влажности по толщине биопленки несущественна. Зольность биомассы изменялась в пределах 16–20 %. Видовой ее состав на всех лотках примерно одинаков; в верхнем слое

Эффективность работы биофильтров при разных режимах подачи сточных вод

Режим подачи сточных вод	Расход, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$	Нагрузка по ХПК, $\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$	Эффект очистки, %
1. Периодическое (импульсное) орошение через 270 с	0,32	160	7,5
2. Периодическое (импульсное) орошение через 60 с	3,2	1600	6,0
3. Непрерывное орошение	3,2	1600	9,7

био пленки преобладали свободные бактерии и простейшие, в нижних слоях — зооглейные образования.

Периодический повышенный вынос биомассы (в несколько сглаженном виде) наблюдается и в производственных сооружениях, а неустойчивость количественных характеристик прикрепленных биоценозов является их специфической особенностью. На рис. 4 представлены данные о количестве биопленки в производственных биофильтрах с загрузкой из щебня при очистке бытовых сточных вод. Данные подтверждают снижение количества биомассы при повышении гидравлической нагрузки, а разброс точек на графике характеризует периодические изменения количества биопленки на загрузке, пределы которых ориентировочно ограничены на графике пунктирными линиями.

Испытания различных видов загрузочных материалов в моделях биофильтров показали, что на скорость прироста биомассы в начальный период работы установки влия-

ли такие свойства, как гидрофобность и шероховатость материала. Обнаружена такая последовательность в увеличении начальной скорости прироста и количества биопленки в зависимости от вида материала загрузки: полиэтилен — полипропилен — оргстекло — поливинилхлорид гладкий — поливинилхлорид перфорированный — природный камень (природный камень моделировался наклеиванием на гладкую поверхность лотка кварцевого песка). При достижении на лотке определенной толщины биомассы дальнейший ее рост шел на всех загрузках примерно одинаково, так как он определялся уже свойствами биопленки, а не свойствами материала загрузки. Не влиял вид материала загрузки и на цикличность периодического смыва биопленки, но количество оставшейся после интенсивного смыва биомассы было больше на материале с более высокой шероховатостью. Существенных различий в составе биопленки и эффекте очистки сточных вод для сравниваемых видов загрузочных материалов не было обнаружено.

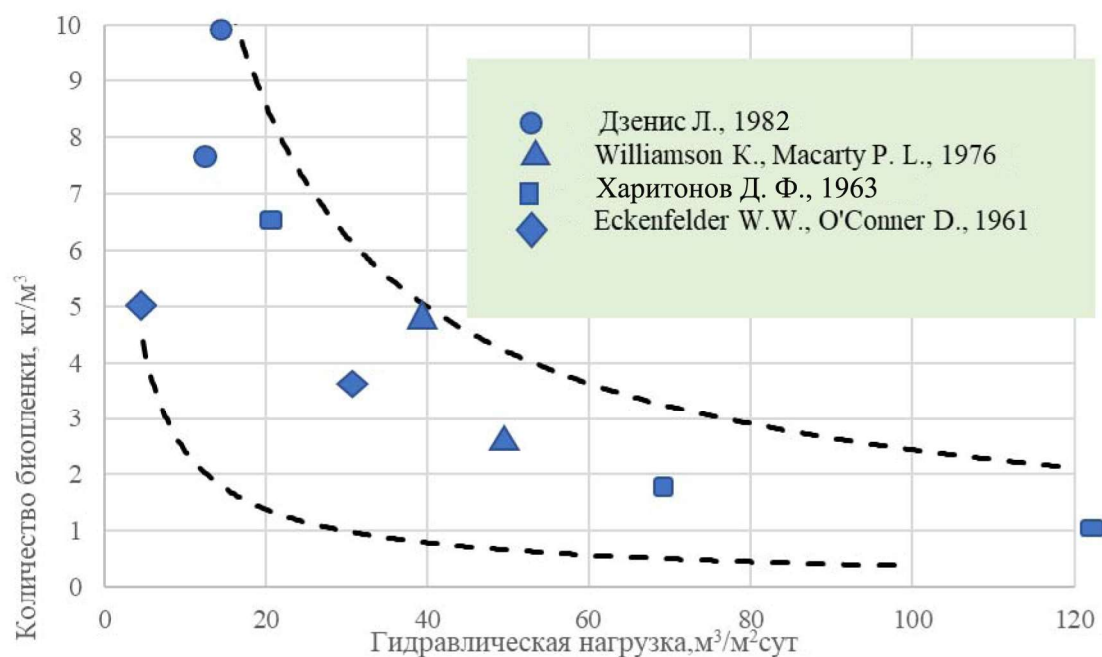


Рис. 4. Количество биомассы в производственных биофильтрах при разных значениях гидравлической нагрузки (по данным [6, 13–15])

Результаты проведенных исследований позволяют рекомендовать в процессе работы биофильтров менять режим подачи сточных вод в зависимости от скорости прироста биопленки, ее количества на загрузке и возраста. При накоплении биомассы в биофилтре следует увеличивать гидравлическую нагрузку и уменьшить интервалы между орошениями загрузки. В пусковой период, а также после периодического смыва и выноса биопленки из биофильтра следует, наоборот, снижать величину гидравлической нагрузки и увеличивать перерыв между орошениями загрузки.

Выводы

1. Режим подачи сточных вод на биофильтры существенно влияет на динамику развития биопленки, закрепленной на загрузке. Скорость прироста и количество биопленки снижаются при увеличении гидравлической нагрузки и сокращении перерывов между орошениями, что обусловлено более интенсивным в этом случае выносом свободных и слабо закрепленных форм микроорганизмов из сооружения.

2. Процесс развития биопленки имеет волнообразный характер, при котором вслед за фазой ее роста следует интенсивный смыв с загрузки биопленки, утратившей с возрастом свои прикрепительные функции.

3. Вид материала загрузки биофильтров влияет на прирост биопленки лишь в начальный период работы сооружения. В дальнейшем после достижения определенной толщины биопленки ее рост идет независимо от материала загрузки, так как определяется уже свойствами биопленки.

4. Выбор режима подачи жидкости на биофильтр и вида материала загрузки следует производить на основании данных о динамике развития биопленки, скорости прироста и ее возрасте. Рекомендуется в процессе работы биофильтров менять режим подачи сточных вод в зависимости от скорости прироста биопленки, ее коли-

чества на загрузке и возраста, в частности увеличивать гидравлическую нагрузку и уменьшать перерывы между орошениями загрузки при увеличении объема и возраста биопленки.

Библиографический список

1. Яковлев С. В., Карелин Я. А., Ласков Ю. М., Калицун В. И. Водоотведение и очистка сточных вод. М.: Стройиздат, 1996. 591 с.
2. Яковлев С. В., Воронов Ю. В. Биологические фильтры. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1982. 121 с.
3. Хенце М., Армоэс П., Ля-Кур-Янсен Й., Арван Э. Очистка сточных вод. Биологические и химические процессы / пер. с англ. М.: Мир, 2006. 471 с.
4. Eckenfelder W. W. Water Quality Engineering for Practicing Engineers. N.Y.: Barnes and Noble, 1970. 328 p.
5. Андриамирадо Л. и др. Технический справочник по обработке воды. В 2 т. / пер. с франц. 2-е изд. СПб.: Новый журнал, 2007. 1696 с.
6. Williamson K., Mccarty P. L. A model of substrate utilization by bacterial films // Journal (Water Pollution Control Federation). 1976. Vol. 48 (1). Pp. 9–24.
7. Atkinson B., Williams D. A. The performance characteristics of a trickling filter with hold-up of microbial mass controlled by periodic washing // Transactions of the Institution of Chemical Engineers. 1971. № 49. Pp. 215–224.
8. Давод Коссай Камал. Совершенствование технологии очистки сточных вод на вращающихся биоконтакторах: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2003. 158 с.
9. Särner E. Removal of dissolved and particulate organic matter in high-rate trickling filters // Water Research. 1981. Vol. 15 (6). Pp. 671–678.
10. Заря И. В. Моделирование процессов биологической очистки сточных вод в системах с иммобилизованной микрофлорой: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Щелково, 2006. 28 с.
11. Феофанов Ю. А. Биореакторы с неподвижной и подвижной загрузкой для очистки воды. СПб.: СПбГАСУ, 2012. 203 с.
12. Лурье Ю. Ю. Аналитическая химия промышленных сточных вод. М.: Химия, 1984. 448 с.
13. Дзенис Л. Исследование и расчет биофильтров с объемной загрузкой: дис. ... канд. техн. наук. М., 1982. 176 с.
14. Харитонов Д. Ф. Очистка городских сточных вод на биофильтрах большой высоты: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1963. 19 с.
15. Eckenfelder W. W., O'Connor D. J. Biological Waste Treatment. N.Y.: Pergamon Press, 1961. Pp. 221–245.

References

1. Yakovlev S. V., Karelin Ya. A., Laskov Yu. M., Kalicun V. I. *Vodootvedenie i ochestka stochnyh vod* [Water drainage and wastewater treatment]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1996, 591 p.
2. Yakovlev S. V., Voronov Yu. V. *Biologicheskie fil'try* [Biological filters]. 2-nd ed. revised. Moscow, Strojizdat Publ., 1982, 121 p.
3. Hentse M., Armoes P., Lya-Kur-Yansen J., Arvan E. *Ochestka stochnyh vod. Biologicheskie i himicheskie processy* [Wastewater treatment. Biological and chemical processes]. Transl. from Eng. Moscow, Mir Publ., 2006, 471 p.
4. Eckenfelder W. W. *Water quality engineering for practicing engineers*. N.Y., Barnes and Noble Publ., 1970, 328 p.
5. Andriamirado L., et al. *Tekhnicheskij spravochnik po obrabotke vody* [Technical handbook on water treatment]. In 2 vols. Transl. from French, 2-nd ed., revised. St. Petersburg, Novyy zhurnal, 2007, 1696 p.
6. Williamson K., Mccarty P. L. A model of substrate utilization by bacterial films. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 1976, vol. 48 (1), pp. 9–24.
7. Atkinson B., Williams D. A. The performance characteristics of a trickling filter with hold-up of microbial mass controlled by periodic washing. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, 1971, no. 49, pp. 215–224.
8. Davod Kossaj Kamal. *Sovershenstvovanie tekhnologii ochestki stochnyh vod na vrashchayushchihsya biokontaktorah*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improvement of wastewater treatment technology on rotating biocontactors. PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2003, 158 p.
9. Särner E. Removal of dissolved and particulate organic matter in high-rate trickling filters. *Water Research*, 1981, vol. 15 (6), pp. 671–678.
10. Zarya I. V. *Modelirovanie processov biologicheskoy ochestki stochnyh vod v sistemah s immobilizovannoj mikrofloroy*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Modeling of processes of biological treatment of sewage in systems with immobilized microflora. Author's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. Shchelkovo, 2006, 28 p.
11. Feofanov Yu. A. *Bioreaktory s nepodvizhnoy i podvizhnoy zagruzkoy dlya ochestki vody* [Bioreactors with fixed and mobile loading for water treatment]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2012, 203 p.
12. Lur'e Yu. Yu. *Analiticheskaya himiya promyshlennykh stochnyh vod* [Analytical chemistry of industrial wastewater]. Moscow, Himiya Publ., 1984, 448 p.
13. Dzenis L. *Issledovanie i raschet biofil'trov s ob'emnoj zagruzkoy*. Diss. kand. tekhn. nauk [Research and calculation of biofilters with volumetric loading. PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 1982, 176 p.
14. Kharitonov D. F. *Ochestka gorodskih stochnyh vod na biofil'trah bol'shoj vysoty*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Purification of urban sewage on biofilters of large height. Author's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 1963, 19 p.
15. Eckenfelder W. W., O'Connor D. J. *Biological Waste Treatment*. N.Y., Pergamon Press Publ., 1961, pp. 221–245.