

10. Saldarriaga, J.G. Water Distribution Network Skeletonization Using the Resilience Concept / J.G. Saldarriaga, S. Ochoa, D. Rodriguez, J. Arbeláez // Water Distribution Systems Analysis, 2008.
11. Motiee, H. Estimating physical unaccounted for water (UFW) in distribution networks using simulation models and GIS / H. Motiee, E. McBean, A. Motiei // Urban Water Journal, Urban Water Journal. – Vol. 4. – № 1. – March 2007, 4:1. – P. 43–52.
12. Syczewa, E. The methodology in estimation of cost of life cycle of deep wells of underground waters intakes / E. Syczewa, A. Hurynovich – Białystok: Polish Division. Journal of the European Association of Environmental and Resource Economists, 2013. – P. 67–76.

Материал поступил в редакцию 15.05.2018

GURINOVICH A.D., BOYTSOV V.G. Methodological approaches to the analysis of the state and prospects for the development of water supply systems for cities using information technology

The need to develop methodological approaches for an analysis of the state as well as the prospects for the development of water supply systems in small towns is due to a comprehensive assessment of problems and the need to solve problems related to the optimization of current costs and investments.

The main stages of research are considered, the result of which is the development of measures to optimize and intensify water supply systems. Methodological approaches are proposed that make it possible to obtain mathematical models adequate to the existing hydraulics of the system to the maximum possible extent: the water supply network-pumping stations-water wells. The studies are based on the use of modern information technologies for the collection of data and their processing, as well as the development of technical solutions.

УДК 628.316

Волкова Г. А., Сторожук Н. Ю.

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД МОЛОКОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Введение. Охрана окружающей среды, в том числе предотвращение загрязнений природных водных ресурсов, является одной из наиболее актуальных проблем современности. Главное направление в решении защиты водоёмов от загрязнений – эффективная очистка сточных вод до степени, позволяющей повторное их использование, либо до нормативных показателей сброса в водоём.

Первоочередного решения в этом направлении требуют промышленные предприятия, являющиеся источниками образования высококонцентрированных сточных вод, особенно производства, расположенные в сельской местности и сбрасывающие сточные воды в маломощные водоёмы.

Сточные воды молокоперерабатывающей промышленности имеют высокую концентрацию органических загрязнений, БПК_{полн.} – 2400–2600 мг/л. Значительная часть этих предприятий расположена в неканализованной сельской местности, вблизи мест получения сырья. В таких случаях требуется устройство самостоятельных очистных станций, обеспечивающих глубокое удаление загрязнений из сбрасываемых сточных вод. Для предприятий, расположенных в городах и посёлках, обычно требуется предварительная неполная очистка сточных вод до требований их сброса в городскую канализацию [1, 5].

В то же время сооружения биологической очистки, применяемые для очистки сточных вод молочных заводов, – аэротенки и биофильтры, всё же имеют некоторые недостатки, ограничивающие их производительность. Интенсификация процесса биологической очистки сточных вод может быть осуществлена путём применения биореакторов с псевдооживленным (взвешенным) слоем мелкозернистой загрузки. Применение этих сооружений позволяет повысить эффективность очистки, удельную производительность сооружений, надёжную их работу, снизить строительные и эксплуатационные расходы. Однако практическому использованию этих сооружений препятствует недостаточная изученность закономерностей протекающих в них процессов при очистке сточных вод, многочисленные недостатки существующих конструкций и схем работы биореакторов.

К сооружениям искусственной биологической очистки относятся реакторы, оборудованные устройствами, обеспечивающими интенсификацию процессов биохимической деструкции загрязнений с помощью биоценоза, выращенного в аэробных, анаэробных или в аноксидных условиях, и сооружения для отделения этого биоценоза от очищенной воды. Биореакторы

классифицируются по различным принципам, основными из которых являются: условия селекции биоценоза по концентрации кислорода в очищаемой воде и веществах, содержащихся в ней, конструктивные особенности корпусов (резервуаров) реакторов и оборудования систем аэрации, распределения и циркуляции воды и биоценоза, а также виды загрузочных материалов для селекции на них иммобилизованной микрофлоры [8].

Различают два основных вида биореакторов. К первому относятся сооружения, в которых создаются аэробные условия для функционирования биоценоза. Это аэротенки и биофильтры различных типов, циркуляционные окислительные каналы, аэрируемые биологические пруды. Во второй вид биореакторов входят сооружения, в которых процесс обработки сточных вод производится в анаэробных условиях, например, затопленные биофильтры и биосорбёры с псевдооживленным слоем свободно плавающих анаэробных гранул биомассы или иммобилизованного биоценоза на зернистой загрузке. Аноксидные условия обработки стоков создаются, как правило, в отдельных камерах (зонах), входящих в состав единого блока ёмкостей, сооружений комбинированного типа. Основная практическая область применения анаэробных процессов – это первая стадия очистки высококонцентрированных производственных сточных вод, а так же дополнительная стадия очистки при глубоком удалении биогенных элементов в сочетании с аэробной стадией.

В зависимости от способа контакта очищаемой сточной воды и колоний микроорганизмов различают два вида сооружений: аэротенки со свободноплавающим биоценозом – активным илом и биофильтры с прикреплённым биоценозом – биоплёнкой.

Сооружения, в которых культивируется биоценоз в свободноплавающем и прикреплённом состоянии, выделяют в отдельную группу, называемую комбинированными сооружениями биологической очистки. Комбинированными считаются также те, в которых в одном блоке ёмкостей совмещены реакторы с аэробными, анаэробными и аноксидными условиями обработки сточной воды, активного ила и биоплёнки. Комбинированные сооружения работают в проточном режиме. Продолжительность обработки стоков и концентрация биоценоза в биореакторе являются важнейшими технологическими параметрами, влияющими на эффективность работы биологических реакторов [13].

Одним из основных направлений по интенсификации работы аэрационных сооружений искусственной биологической очистки

Волкова Галина Александровна, к. т. н., доцент, доцент кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов Брестского государственного технического университета.

Сторожук Наталья Юрьевна, доцент кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

является повышение в них концентрации биоценоза. Поиски технических решений для достижения этой цели привели к разработке большого ряда новых комбинированных сооружений.

Анализ литературных данных показывает, что для очистки сточных вод малых населённых пунктов в качестве основного варианта следует выбирать погружные биофильтры, если отсутствуют условия для применения сооружений естественной биологической очистки [7, 9, 10]. Дисковые биофильтры являются наиболее широко применяемым на практике типом погружных биофильтров. Основной причиной этого является то, что конструкция ротора погружного биофильтра, собранная из дисков, гораздо проще и надёжнее в эксплуатации по сравнению с барабаном, обтянутым сеткой и заполненным засыпной загрузкой. При работе барабанных биофильтров с засыпной загрузкой происходит механическое повреждение биоплёнки, возникающее в результате перемещения загрузки во вращающемся полом барабане. По данным И.В. Скирдова, при полной биологической очистке сточных вод продолжительность обработки сокращается до 10–15 минут, что в 20 раз меньше, чем в аэротенках [3]. Погружные биофильтры характеризуются хорошей устойчивостью к колебаниям расхода и состава сточных вод. Продолжительность перерывов в подаче сточных вод на дисковый биофильтр до трёх часов не нарушает их работу. Концентрация биоценоза в виде биоплёнки, прикреплённой к поверхности дисков, и свободноплавающей в ванне, поддерживается постоянной автоматически за счёт постоянства скорости вращения дисков и специфического видового состава биоценоза. Количество биоплёнки, выносимой потоком воды из биофильтра, меньше, чем избыточного активного ила из аэротенков, – 0,4–0,6 кг/кг снятой БПК₅ [11]. Например, при очистке производственных сточных вод с БПК₂₀=1000–2000 мг/л на дисковом биофильтре было установлено, что прирост биоплёнки составляет в среднем 0,3 кг/кг снятой БПК.

По мнению ведущих учёных, до настоящего времени отсутствует достаточно чёткое описание процессов, происходящих в биоплёнке на дисковых биофильтрах. Ряд исследователей считают, что в процессе биодеградации загрязнений на биофильтрах принимает участие только незначительная доля биоплёнки в виде так называемой активной части внешнего слоя биоплёнки, имеющего толщину до 70–300 мкм. Недостаточная теоретическая изученность процессов биологической очистки сточных вод на дисковых биофильтрах сдерживает их массовое применение. Это вызывает необходимость проведения теоретических и специальных экспериментальных исследований на реальных сточных водах с применением дисковых биофильтров промышленного масштаба в условиях действующих очистных сооружений.

Согласно действующему ТКП 45-4.01-202-2010 «Очистные сооружения сточных вод» [2], очистка сточных вод ориентирована, прежде всего, на загрязнение органического характера (БПК) и взвешенные вещества.

В современной практике очистки сточных вод молочных заводов наиболее часто применяются аэротенки и биофильтры. Однако эти сооружения имеют ряд недостатков. В частности, работа аэротенков неустойчива при перегрузках, залповых сбросах и перерывах в подаче сточных вод и воздуха. Традиционные конструкции биофильтров обеспечивают полную очистку концентрированных сточных вод при условии высокой степени рециркуляции очищенной жидкости, характеризуются высокой строительной стоимостью.

Одним из существенных путей интенсификации процесса биологической очистки является увеличение скорости утилизации субстрата за счёт повышения концентрации активной биомассы, иммобилизованной на мелкозернистом носителе. Реализованные на этом принципе конструкции сооружений разделяются на биореакторы с неподвижным и псевдооживленным (взвешенным) слоем мелкозернистой загрузки. При очистке концентрированных сточных вод биореакторы с неподвижным слоем мелкозернистой загрузки быстро заиливаются задержанными веществами и прирастающей биомассой и требуют периодической промывки. Для увеличения производительности фильтроцикла в таких сооружениях применяют загрузочный материал более крупных фракций (до 10 мм), что, соответственно, снижает рабочую поверхность загрузки и концентрацию биомассы в зоне реакции. Периодические промывки загрузки приводят к смыву активной биомассы и нарушают стабильность процесса биологической очистки. Тем не менее, производительность затоп-

ленных биофильтров со стационарным слоем зернистой загрузки достигает 5–6 кг/м³сут.

В биореакторах с псевдооживленным (взвешенным) слоем зернистой загрузки имеет место более высокая степень использования поверхности загрузочного материала, более высокие скорости массообмена. В этих сооружениях используются более мелкие фракции загрузки, чем в затопленных биофильтрах, что позволяет поддерживать высокую концентрацию активной биомассы в реакционной зоне. Благодаря этому, производительность биореакторов с псевдооживленным слоем загрузки значительно повышается и достигает 10–20 кг БПК_{полн}/м³сут и более.

Однако практическому распространению этих сооружений препятствует сложность технологических схем работы биореакторов, технические сложности с созданием и поддержанием устойчивого псевдооживленного слоя загрузки, необходимость её регенерации, снабжение процесса кислородом и другие обстоятельства. Недостаточно изучена кинетика процесса изъятия загрязнений из сточных вод, в частности, сточных вод предприятий молочной промышленности, динамика роста биологической плёнки на мелкозернистой загрузке и условия её регенерации в псевдооживленном слое, гидродинамические и массообменные характеристики этих типов биореакторов.

Для очистки сточных вод молокоперерабатывающих предприятий, учитывая специфику этих видов сточных вод, применение биореакторов с псевдооживленной мелкозернистой загрузкой весьма перспективно, но вызывают необходимость совершенствования технологических схем и конструкций этих сооружений с целью их упрощения, повышения стабильности и надёжности в работе, улучшения технико-экономических показателей.

Существующие конструкции биореакторов с псевдооживленным слоем загрузки не устойчивы в работе и сложны в эксплуатации, так как в них обычно стремятся создать и поддерживать режим однородного взвешенного слоя. Сложности в поддержании такого режима заключаются в необходимости постоянного регулирования гидравлических нагрузок в связи с меняющейся гидравлической крупностью при обработке частиц загрузки биоплёнкой. Затруднения в создании однородного взвешенного слоя также обусловлены возможными колебаниями температуры, расхода и состава поступающих сточных вод, необходимостью применения строго калиброванного загрузочного материала. Несоблюдение этих условий приводит к выносу частиц загрузки из биореактора, поэтому во многих схемах работы этих сооружений предусматривают устройства для задержания выносимой загрузки, её регенерации и возврата в зону реакции. Дополнительно для задержания выносимой биомассы устраиваются вторичные отстойники.

Более простым в осуществлении является режим фонтанирующего слоя мелкозернистой загрузки, который создаётся за счёт переменной скорости потока по высоте сооружения. В нижней части аппарата скорость потока превышает критическую скорость уноса частиц, а в верхней части сооружения она снижается ниже этой скорости. При этом создаётся направленное движение частиц загрузки, способствующее хорошему массопереносу и массообмену. Для поддержания фонтанирующего слоя в аппарате не требуется равномерного распределения потока по сечению аппарата, допускаются значительные колебания скорости на входе, а, следовательно, и колебания поступающего расхода сточных вод, упрощается конструкция сооружений и их эксплуатация. За счёт интенсивного перемешивания частиц в фонтанирующем слое (струйной зоне потока) происходит непрерывная регенерация загрузки в камере биореактора [3, 4, 12].

Одним из сложных вопросов технологии работы биореакторов с однородным слоем для аэробного биохимического процесса является снабжение процесса необходимым количеством кислорода. Барботирование загрузки воздухом приводит к нарушению однородности слоя, возможности образования канального и поршневого режимов, выносу загрузки и проскоку неочищенных сточных вод. Поэтому в схемах работы аэробных биореакторов применяют предварительное насыщение поступающего потока кислородом, вводят рециркуляцию очищенной воды с предварительной её аэрацией, это приводит к усложнению технологической схемы и к увеличению эксплуатационных затрат.

Преимуществом фонтанирующего слоя является возможность создания его как гидравлическим, так и пневматическим способом. Во втором случае одновременно решается задача аэрации сточных вод. На формирование и состояние взвешенного слоя влияет ско-

росту восходящего потока, форма, размер и плотность частиц загрузки, плотность и вязкость среды и ряд других факторов. Область существования однородного взвешенного слоя ограничивается критическими (начальной и предельной) скоростями потока. Для полидисперсных частиц, а также частиц с различной плотностью биоплёнки и, следовательно, различной гидравлической крупностью, эта область значительно сокращается, а при большом интервале крупности фракций создание однородного взвешенного слоя становится практически невозможным. Режим фонтанирующего слоя связан только со второй критической скоростью, и изменение гидравлической крупности частиц загрузки в процессе их обрастания биоплёнкой не приводит к нарушению этого режима.

Значения второй критической скорости для песка $d = 0,75$ мм, полистирола $d = 3,7$ мм и полиэтилена $d = 2,7$ мм соответственно составляют 400, 159 и 153 м/час. При сравнении значений этих скоростей с величиной придонной скорости потока жидкости в аэротенках, которая из условий взвешивания хлопьев активного ила принимается не менее 0,1 м/с или 300 м/ч, очевидно, что создание режима фонтанирующего слоя загрузки из стандартных гранул полиэтилена и полистирола не требует увеличения интенсивности перемешивания и, соответственно, дополнительных энергозатрат по сравнению с аэротенками. В аэробных биореакторах с фонтанирующим слоем загрузки становится возможным использовать как прикреплённую, так и взвешенную биомассу при обычной для активной интенсивности аэрации.

В качестве загрузки биореакторов с псевдооживленным слоем применяют различные виды мелкозернистых материалов: песок, антрацит, цеолиты, активированный уголь, пластмассы и др. К загрузочному материалу предъявляется ряд требований по прочности, стойкости к истиранию и воздействию агрессивной среды, шероховатости и т. д. Для формирования устойчивого взвешенного слоя необходимо стремиться к невысоким скоростям псевдооживления частиц загрузки, что выдвигает ряд дополнительных требований к загрузке. Для фонтанирующего слоя эти ограничения менее жёсткие.

Разработаны конструкции биореакторов с псевдооживленной (взвешенной) мелкозернистой загрузкой для анаэробной и аэробной очистки концентрированных по органическим загрязнителям сточных вод молочных заводов. Псевдооживление загрузки в этих конструкциях биореакторов создается в режиме фонтанирующего слоя гидравлическим или пневматическим способом.

В анаэробном биореакторе принято гидравлическое перемешивание и регенерация загрузки с помощью гидроэлеватора, в основу этой конструкции положен разработанный ранее биореактор для очистки малозагрязнённых вод.

В аэробном биореакторе перемешивание загрузки осуществляется мелкопузырчатым аэротормом. Для загрузки биореакторов применяется стандартный гранулированный полиэтилен, плотность которого меньше $1,0$ г/см³. Применение такой загрузки позволяет легче отделить её от очищенной воды и взвешенной биомассы гидравлическим способом, а также создать из этой загрузки плавающий фильтр на выходе из сооружения для задержания выносимой биоплёнки и вторичного осветления воды. Загрузка плавающего фильтра непрерывно обновляется, регенерируется и возвращается в зону реакции под действием гидроэлеватора (анаэробный биореактор) или с помощью эрлифта (аэробный биореактор). Устройство плавающего фильтра на выходе из биореактора позволяет поддерживать высокую концентрацию как прикреплённой, так и взвешенной биомассы в рабочей зоне, повысить производительность и эффективность работы сооружения.

Период наращивания биомассы при нагрузке $1,5$ г ХПК/л продолжается 9–14 суток, к концу этого срока в биореакторе устанавливается постоянная концентрация прикреплённой и взвешенной биомассы. В пусковой период разовая нагрузка по ХПК на общую биомассу изменяется в пределах от 950 мг/г в первые сутки до 100 мг/г в конце пускового периода. В дальнейшем нагрузка на биомассу постепенно уменьшалась до 25 мг/л. В биореакторах с фонтанирующим слоем концентрация закрепленной на загрузке биоплёнки после проведения периода наращивания устанавливается практически постоянной для каждого вида загрузочного материала независимо от величин нагрузки по загрязнителям и составляет в среднем $4,2$ г/м² для полиэтиленовых гранул, $3,52$ г/м² для полистирола и 8 г/м² для песка. Объясняется это хорошей регенерацией загрузки в фонтани-

рующем слое за счёт взаимного трения частиц при их интенсивном перемешивании. Указанным значениям концентрации прикреплённой биомассы соответствует толщина биоплёнки 100–300 мкм, при которой имеют место высокие скорости утилизации субстрата и максимальная плотность биоценоза [4, 12].

В зоне биореакции наравне с прикреплённой биоплёнкой активно работает и взвешенная биомасса, которая в фонтанирующем слое отрывается от загрузки в относительно молодом возрасте и обладает высокой окислительной способностью.

Количество общей биомассы (прикреплённой и взвешенной) не зависит от вида применяемой в биореакторе загрузки, а определяется режимом проведения процесса и соответствующим ему приростом биомассы. При изменении количества загрузочного материала в биореакторе соответственно изменяется концентрация прикреплённой и взвешенной биомассы. Увеличение объёма загрузки приводит к пропорциональному повышению количества прикреплённой биоплёнки и снижению концентрации взвешенной биомассы и, наоборот, при уменьшении объёма загрузки снижается относительная доля прикреплённой биомассы. Биомасса, сорванная с части загрузки в фонтанирующем слое, образует плотные структурные хлопья, которые хорошо осаждаются. Иловый индекс этой биомассы составляет 40–60 см³/г.

Биореактор с гидравлическим перемешиванием загрузки из мелкозернистого гранулированного полиэтилена диаметром 2,7 мм без подачи воздуха в анаэробных условиях при БПК исходных сточных вод молочных заводов от 400 до 2470 мг/л работает при температуре в зоне реакции 25–30 °С. При этом нагрузка по ХПК на биореактор изменяется от 0,87 кг/м³ сут до 13 кг/м³сут. При таких условиях производительность биореактора по количеству снятых загрязнений по ХПК изменяется от 0,61 до 9,0 кг/м³сут, и эффективность очистки по ХПК составляет от 59,3% до 81,8%; по БПК_{полн} – от 64% до 94,1%. Удельная производительность анаэробного биореактора повышается практически пропорционально величине нагрузки на биореактор, но даже при низких нагрузках качество очищенной воды не соответствует требованиям полной биологической очистки. Поэтому анаэробные биореакторы могут применяться только для предварительной неполной очистки сточных вод молочных заводов [3].

Аэробный биореактор с пневматическим псевдооживлением мелкозернистой загрузки работает при температуре исходных сточных вод молочных заводов 13–20° С, ХПК_{исх} от 130 до 2150 мг/л, БПК_{полн} от 112 до 1849 мг/л. Режим полного псевдооживления загрузки достигается при интенсивности аэрации 10 м³/м² час. При этом нагрузка по ХПК на биореактор изменяется в диапазоне 1,18–7,4 кг/м³ сут, окислительная мощность составляет 0,87–4,61 кг/м³ сут, эффект очистки сточных вод по ХПК составляет 70,7–62,3%, по БПК_{полн} – 93–87,7% [4, 12].

На выходе из биореактора создается плавающий фильтр из той же загрузки – полиэтиленовые гранулы диаметром 2,7 мм объёмом 5% от объёма биореактора. За счёт этого в зоне реакции поддерживается концентрация биомассы в пределах 4–11 г/л в зависимости от нагрузки. Иловый индекс взвешенной биомассы составляет 40–70 см³/г. Для сравнения следует отметить, что в обычных аэротенках при очистке сточных вод молокоперерабатывающих заводов доза ила составляет 3–4 г/л, иловый индекс – 120–200 см³/г и выше.

В зоне фильтрования биореактора происходит флокуляция на загрузке хлопьев ила, которые затем легко отделяются при регенерации фильтра. Время обновления загрузки фильтра при его непрерывной регенерации и скорости фильтрования 5–10 м/час должно составлять не более 4–8 часов.

Особенность структуры потока в биореакторе с гидравлическим способом перемешивания загрузки, создаваемого с помощью гидроэлеватора, обусловлена неоднородностью слоя загрузки в восходящем потоке жидкости. В зоне действия гидроэлеватора он представляет собой псевдооживленный слой из всплывающих гранул, верхний слой загрузки находится в плавающем состоянии. Характер потока жидкости по высоте сооружения неоднороден и изменяется в зависимости от расхода подаваемой жидкости, напора на входе гидроэлеватора, его конструктивных параметров.

Скорость перемещения полиэтиленовых гранул загрузки в объёме биореактора определяется зависимостью:

$$v_{загр} = 4,12g^{2,45} \cdot 10^{-6} n^{0,72}, \quad (1)$$

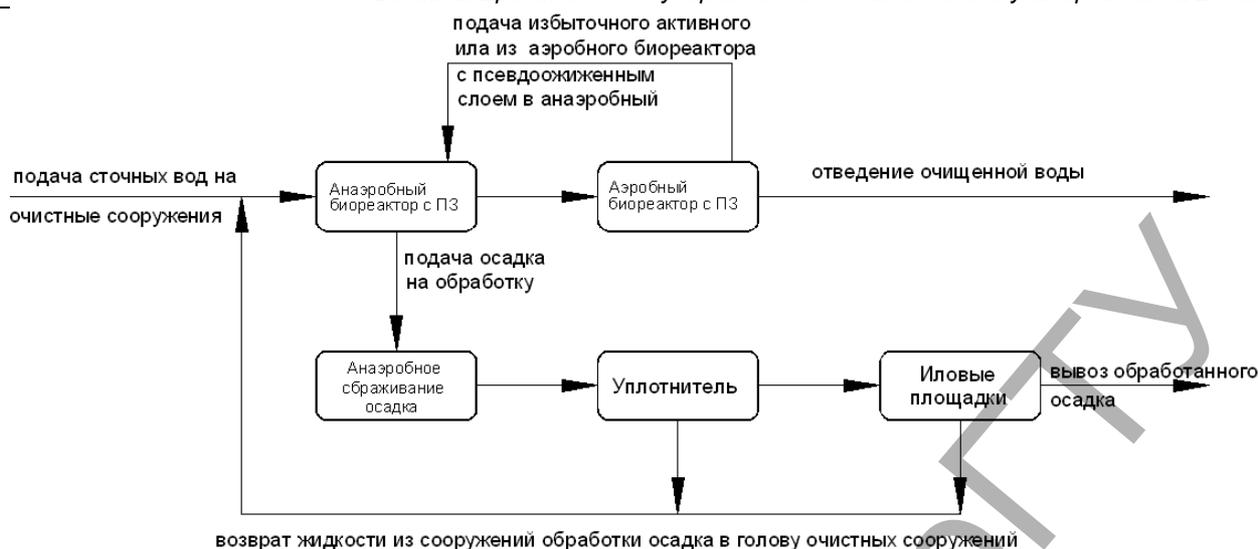


Рисунок 1 – Схема полной очистки сточных вод

где g – гидравлическая нагрузка, $\text{м}^3/\text{м}^2$ сут;

η – соотношение сечений горловины и сопла гидроэлеватора.

Структура потока жидкости в биореакторах с пневматическим перемешиванием загрузки может быть описана моделью идеального смешения. Для аппаратов с отношением ширины к длине $b : l = 0,5 : 1$ критерий Пекле Pe равен 2,76, что практически близко к идеальному смесителю.

Зависимость критерия Пекле Pe от числа Рейнольдса определяется по формуле:

$$Pe = A \cdot Re^a, \quad (2)$$

где $Re = \frac{4v_{\eta}}{y \cdot s}$ – число Рейнольдса;

v_{η} – приведённая скорость потока, м/сек;

y – кинематический коэффициент вязкости, $\text{м}^2/\text{сек}$;

s – удельная поверхность загрузки, $\text{м}^2/\text{м}^3$;

A, a – коэффициенты, равные 0,055 и 0,101.

Для создания полного перемешивания загрузки интенсивность аэрации составляет $10 \text{ м}^3/\text{м}^2$ час, что меньше, чем требуется для взвешенного активного ила. Процесс изъятия загрязнений в биореакторах с гидравлическим перемешиванием описывается ячеечной моделью структуры потока и уравнением нестационарной кинетики биохимического процесса первого порядка:

$$\frac{C_{\text{исх}}}{C_{\text{вых}}} = \left(1 + \frac{K_H t}{m}\right)^m, \quad (3)$$

где $C_{\text{исх}}$ – исходная концентрация загрязнений сточных вод, мг/л;

$C_{\text{вых}}$ – концентрация загрязнений сточных вод на выходе из биореактора, мг/л;

K_H – коэффициент скорости изъятия органических загрязнений из сточных вод молочных заводов в анаэробных биореакторах с псевдооживленным слоем мелкозернистой загрузки, определяемый по следующей эмпирической зависимости:

$$K_H = K_0 \cdot t^{-0,861} \cdot (C_{\text{исх}})^{0,861}, \quad (4)$$

где $K_0 = 0,108$, кинетическая константа;

t – время пребывания сточных вод в зоне реакции, час;

$C_{\text{исх}}$ – исходная концентрация загрязнений сточных вод по ХПК, мг/л.

Для аэробного биореактора с пневматическим способом перемешивания загрузки применяется уравнение:

$$\frac{C_{\text{исх}}}{C_{\text{вых}}} = 1 + K_H t. \quad (5)$$

В аэробном биореакторе с псевдооживленным слоем мелкозернистой загрузки коэффициент изъятия органических загрязнений определяется зависимостью:

$$K_H = K_0 \cdot t^{-0,274} \cdot (C_{\text{исх}})^{0,0715} \cdot e^{T-20}, \quad (6)$$

где e – температура поправка, равная $1,047^\circ\text{C}$;

T – температура сточных вод, $^\circ\text{C}$;

$K_0 = 0,523$, кинетическая константа.

На рисунке 1 приведена технологическая схема полной очистки сточных вод молочных заводов с использованием аэробного и анаэробного биореакторов.

Заключение. В современной практике очистки сточных вод предприятий молочной промышленности преимущественное распространение получил биологический метод очистки, благодаря его простоте, высокой эффективности и универсальности к различным видам органических загрязнений.

Интенсификация процесса биологической очистки сточных вод может быть осуществлена путём применения биореакторов с псевдооживленным (взвешенным) слоем мелкозернистой загрузки.

Псевдооживление загрузки в конструкциях биореакторов создается в режиме фонтанирующего слоя гидравлическим или пневматическим способом, при котором обеспечивается непрерывная регенерация части загрузки, повышается надёжность работы биореакторов.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Яковлев, С.В. Водоотведение и очистка сточных вод / С.В. Яковлев, Ю.В. Воронов. – М.: АСВ, 2002. – 704 с.
2. Очистные сооружения сточных вод. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-4.01-202-2010 (02250).
3. Скирдов, И.В. Очистка сточных вод с применением прикреплённой микрофлоры / И.В. Скирдов // Водоснабжение и санитарная техника. – 1998. – № 6. – С. 10–12.
4. Феофанов, Ю.А. Результаты исследований по очистке сточных вод молочного завода в биореакторах с псевдооживленным слоем / Ю.А. Феофанов, Е. Райцзыкова // Повышение эффективности работы систем водоснабжения, водоотведения, очистки природных и сточных вод: межвуз. темат. сборник. – Л.: ЛИСИ, 1991. – С. 21–25.
5. Яковлев, С.В. Биохимические процессы в очистке сточных вод / С.В. Яковлев, Т.А. Карюхина. – М.: Стройиздат, 1980. – 200 с.
6. Канализация населённых мест и промышленных предприятий; под ред. В.Н.Самохина. – 2-е изд. – М.: Стройиздат, 1981. – 639 с.
7. Волкова, Г.А. Очистка сточных вод на дисковых биофильтрах / Г.А. Волкова, О.Я. Маслова // Механизация строительства. – 1998. – № 5. – С. 17–20.
8. Шувалов, М.В. Результаты сравнения технологических показателей при выборе типа биореактора для очистки сточных вод малых населённых пунктов / М.В. Шувалов, Р.М. Шувалов // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. – 2011. – № 2. – С. 88–96.
9. Разумовский, Э.С. Очистные сооружения «Биодиск» для малых населённых мест / Э.С. Разумовский, Э.И. Рукин // Водоснабжение и санитарная техника. – 2005. – № 4. – С. 27–29.

10. Олейник, А.Я. Расчёт биофильтров с вращающейся загрузкой / А.Я. Олейник, И.М. Чёрный // Водоснабжение и санитарная техника. – 1989. – № 3. – С. 24–26.
11. Яковлев, С.В. Биохимические процессы в очистке сточных вод / С.В. Яковлев, Т.А. Карюхина. – М.: Стройиздат, 1980. – 200 с.
12. Феофанов, Ю.А. Исследования биореактора с оживленным слоем загрузки для очистки сточных вод / Ю.А. Феофанов, Е. Райцзыкова // Человек-труд-экология: тезисы докл. Всесоюз. науч.-практ. конф. – Волгоград, 1990. – С. 152–153.
13. Демидов, О.В. Интенсификация процесса биологической очистки сточных вод / О.В. Демидов, И.В. Скирдов // Водоснабжение и санитарная техника. – 1996. – № 3. – С. 16–18.

Материал поступил в редакцию 22.05.2018

VOLKOVA G.A, STOROZHUK N.Y. Intensification of the process of biological treatment of waste waters of milk processing enterprises

In the article the questions of intensification of the processes of biochemical destruction of the contaminants contained in sewage waters of milk processing enterprises with the help of biocenosis grown in aerobic, anaerobic or anoxic conditions are considered.

УДК 691.544:666.

Ступень Н. С.

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ГРУНТОВЫХ ВОД НА СТЕПЕНЬ КОРРОЗИИ БЕТОННЫХ КОМПОЗИЦИЙ

Введение. Подземные (грунтовые) воды определенного состава могут оказывать разрушительное воздействие на различные строительные материалы, в том числе на бетонные сооружения и железобетонные конструкции. Эта разрушительная способность воды получила название агрессивности. Различают следующие виды агрессивности воды: углекислотная, выщелачивающая, общекислотная, сульфатная, магниевая, кислородная.

Углекислотная агрессивность состоит в разрушении бетона в результате растворения карбоната кальция CaCO_3 под действием агрессивной углекислоты. Вода будет проявлять углекислотную агрессивность тогда, когда содержание в ней свободной углекислоты будет больше, чем необходимо для равновесия с твердым углекислым кальцием.

Выщелачивающая агрессивность обусловлена выщелачиванием (растворением) карбоната кальция и вымыванием из бетона гидроксида кальция. При малых концентрациях карбоната кальция в воде часть карбоната кальция бетона переходит в раствор через гидрокарбонатную стадию – $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$. Выщелачивающая агрессия определяется величиной временной жесткости, которая зависит от концентрации гидрокарбонат-ионов HCO_3^- , проявляется в ультрамягких или мягких водах, в которых находится минимальное содержание ионов HCO_3^- . Ультрамягкие воды способны выщелачивать карбонаты до момента создания равновесия между карбонатами и гидрокарбонатами.

Общекислотная агрессивность воды зависит от содержания в воде свободных водородных ионов и определяется величиной pH. Особенно активны воды с $\text{pH} < 5$. Кислая среда является активным растворителем для карбонатов, опасна для железобетонных конструкций.

Сульфатная агрессивность имеет место при высоком содержании ионов SO_4^{2-} , в результате чего, в случае проникновения воды в цементный клинкер, при кристаллизации образуются соли, образование которых сопровождается резким увеличением объема.

Магниевая агрессивность возникает при высоких содержаниях иона Mg^{2+} , предельно допустимое количество которого колеблется в зависимости от сортов цемента, условий и конструкции сооружения и от содержания SO_4^{2-} .

Кислородная агрессивность вызывается содержащимся в воде растворенным кислородом и проявляется преимущественно по отношению к стальной арматуре в железобетонных конструкциях.

Степень агрессивности среды – понятие относительное по отношению к бетону. Среда может быть агрессивной по отношению к бетону на портландцементе и неагрессивной по отношению к бетону такого же состава на глинозёмистом или шлакопортландцементе. Степень агрессивности грунтовых вод будет различна по отношению к бетонам разной плотности. Для выявления степени агрессивности воды по отношению к цементному камню необходимо, прежде всего, установить, находится ли исследуемая вода в химическом равновесии с карбонатом кальция цементного клинкера бетона. Если равновесие достигнуто, то вода неагрессивна. Если нет, то вода агрессивна

на, и она, стремясь достигнуть равновесия, растворяет определенное количество карбоната кальция (переводя его в гидрокарбонат), затрачивая на это часть свободной углекислоты.

При наличии в грунтовых водах растворенных солей коррозия цементного клинкера может происходить под действием как катионов металла, так и кислотных остатков. Поскольку жидкая фаза затвердевшего бетона содержит в основном ионы Ca^{2+} и OH^- , характер действия катионов соли будет определяться их способностью взаимодействовать с анионами OH^- , а характер действия анионов соли – их способностью взаимодействовать с катионами Ca^{2+} . Коррозионный эффект будет также зависеть от свойств образующихся при этом продуктов (растворимые, нерастворимые, кристаллизующиеся с увеличением в объеме).

Исследование химического состава грунтовых вод промышленных районов Полесья, показало, что у них повышенное содержание различных катионов и анионов.

По химическому составу можно выделить следующие главные группы грунтовых вод: сульфатно-натриевая (или калиевая), гидрокарбонатно-натриевая (или калиевая), сульфатно-кальциевая, гидрокарбонатно-кальциевая [1]. Количество ионов кальция в грунтовых водах очень часто меньше суммарного содержания ионов калия и натрия.

По предложениям К. Е. Питьевой [2] подземные воды можно разделить на четыре группы с различной степенью минерализации. Первая группа – пресные воды со степенью минерализации < 1 г/л. Это преимущественно гидрокарбонатные кальциево-магниевые воды. Вторая группа – слабоминерализованные воды 1–10 г/л. Подземные воды этой группы включают гидрокарбонатный, сульфатный и хлоридный типы по анионам и кальциевый, магниевый, натриевый тип по катионам. В третью группу входят минерализованные воды со степенью минерализации 10–30 г/л. Эти воды хлоридного типа по анионам и натриевого по катионам. Четвёртая группа включает воды со степенью минерализации более 30 г/л, они относятся к хлоридному типу по анионам и к натриевому, кальциевому, магниевому по катионам. Предельное содержание иона HCO_3^- зависит от того, с какими катионами связан сульфат-ион. Содержание ионов HCO_3^- в грунтовых водах невелико. В пресных грунтовых водах при минерализации 5–6 г/л может быть до 0,5–0,6 г/л ионов HCO_3^- .

Основным типом грунтовых вод на большей части территории стран СНГ является сульфатно-гидрокарбонатная вода, которая содержит катионы Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , а также анион хлора Cl^- [3].

Целью нашей работы является изучение влияния химического состава грунтовых вод на устойчивость бетонных композиций.

Для исследования процессов коррозии использовали портландцемент марки 500. Его химический состав следующий (в % по массе): SiO_2 – 44,4 %; Al_2O_3 – 4,87 %; Fe_2O_3 – 4,89 %; CaO – 64,70 %; MgO – 1,67 %; SO_3 – 2,25 %.

Исследования проводили на образцах цементного камня ($v/c = 0,4$) – кубиках размером $2 \times 2 \times 2$ см. После распалубки (через сутки)

Ступень Нонна Степановна, к. т. н., доцент, доцент кафедры химии Брестского государственного университета им. А.С. Пушкина. Беларусь, БрГУ им. А.С. Пушкина, 224016, г. Брест, б-р Космонавтов, 21.