

# ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ РАСЧЕТЕ ГОРОДСКИХ СООРУЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕХОДА НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ НОРМИРОВАНИЕ (НДТ)

Эпов А.Н.  
гл. технический специалист

Канунникова М.А.  
канд. техн. наук, директор направления  
«Водоснабжение и водоотведение»

TWW Treatment Waste Water OOO «Домкопстрой»

Переход на наилучшие доступные технологии требует реконструкции большинства действующих станций очистки сточных вод. При выборе современной схемы следует учитывать не только существующие нагрузки по расходу и загрязнению, но и рассматривать прогноз развития системы водоотведения. Перед проектировщиком стоит не простая задача расчета нескольких сценариев развития, учитывающих изменение нормы водопотребления, количества населения и стоков, поступающих от промышленных предприятий. Наилучшим и наиболее точным инструментом для разработки программы реконструкции является математическое моделирование. Такой способ позволяет уже на предпроектной стадии определить оптимальную схему и выделить этапы развития очистных сооружений для последующего проектирования.

**Ключевые слова:** наилучшие доступные технологии НДТ, технологии удаления азота и фосфора, фракции ХПК, GPS-X версия 6.5, гидравлическая и массовая нагрузки.

Внедрение наилучших доступных технологий (НДТ) предполагает переход всех станций на технологии биологической очистки с внедрением удаления азота и фосфора – *технология БНДХФ* биологическое удаление азота и физико-химическое удаление фосфора, *БНДБФ* – биологическое удаление азота и биологическое удаление фосфора, *БНДБФ-А* – биологическое удаление азота и биологическое удаление фосфора с дополнительной ацидофикацией стока и *БНДБХФ* – технологии с биологическим удалением азота и фосфора и дополнительным химическим удалением фосфора [1].

Приведенные технологии имеют как достоинства, так и недостатки.

*Технология БНДХФ* – биологическая нитриденитрификация с дозированием реагентов для удаления фосфора. Достигается удаление органических и взвешенных веществ, азота, фосфора и процесс нитрификации с минимальным увеличением объемов основных сооружений и реконструкции очистной станции. Однако приводит к большим затратам реагентов. Увеличение объемов вызвано поддержанием

аэробного возраста ила в условиях прироста биомассы ила и массы накопленных продуктов химических реакций удаления фосфора и коагуляции органических веществ, а так же выделением необходимого объема под аноксидную зону.

*Технология БНДБФ* – биологическая нитриденитрификация с биологическим удалением фосфора. Достигается удаление органических веществ и взвешенных веществ, азота, фосфора и процесс нитрификации. Эффективность удаления фосфора может колебаться в зависимости от состава исходной воды и ряда других факторов. Требуется большего увеличения объема сооружений. В отличие от технологии БНДХФ не требует применения реагентов и более сложна в реконструкции. Увеличение объемов вызвано поддержанием аэробного возраста ила в условиях прироста биомассы ила, а так же выделением необходимого объема под аноксидную зону и анаэробные зоны.

*Технология БНДБФ-А* – биологическая нитриденитрификация с биологическим удалением фосфора, дополнительно стабилизируемая ацидо-

фикацией. Достигается удаление органических веществ, взвешенных веществ, азота, фосфора и процесс нитрификации. Эффективность удаления фосфора стабильна и ниже концентрации 1 мг/л. Увеличение объема аналогично технологии БНДБФ с биологическим удалением фосфора, технология не требует применения реагентов. Однако данная технология наиболее сложна и требует не только реконструкцию аэротенков, но и первичных отстойников.

*Технология БНДБХФ* – биологическая нитриденитрификация с биологическим удалением фосфора, дополнительно стабилизируемая дозированием реагентов. Достигается удаление органических веществ, взвешенных веществ, азота, фосфора и процесс нитрификации. Эффективность удаления фосфора стабильна и ниже концентрации 1 мг/л. Технология требует использование реагентов, но значительно меньше, чем по технологии БНДХФ. Увеличение объема сооружений максимально. Оно связано с поддержанием аэробного возраста ила в условиях прироста биомассы ила и массы накопленных продуктов химических реакций удаления фосфора и коагуляции органических веществ, а также выделением необходимого объема под аноксидную и анаэробную зоны.

Все представленные технологии требуют увеличения объема основных сооружений по сравнению с традиционной технологией с удалением только БПК<sub>5</sub> и взвешенных веществ.

Преимуществом существующих очистных сооружений является то, что построенные в основном в 70-80-е годы сооружения существенно недогружены относительно проектной производительности [2].

Специалисты TWW Treatment Waste Water OOO «Домкопстрой», участвуя в разработке информационно-технического справочника по наилучшим доступным технологиям «Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов», установили, что большинство муниципальных станций работают с нагрузкой 50-70% от проектной производительности. Однако, оценивая резерв, возникающий в результате недогрузки, следует учитывать, что данный эффект возник не только из-за завышенных производительностей станций (планируемых на будущее в 70-80-х годах), но и в результате

снижения удельного водопотребления на жителя в условиях подорожания стоимости куба воды и подключения водосчетчиков. Надо учитывать, что *снижение расхода на очистные сооружения не всегда пропорционально массовой нагрузке по загрязнению*.

Уменьшение расхода и массовой нагрузки по-разному сказывается на сооружениях станции очистки стоков. Если первичные отстойники увеличивают эффективность задержания взвешенных веществ пропорционально как увеличению концентрации, так и увеличению времени пребывания, то аэротенки реагируют на массовую нагрузку по органическим веществам, взвешенным веществам и биогенным элементам [3]. Причем уменьшение расхода на вторичные отстойники позволяет поддерживать более высокие дозы ила и тем самым увеличивать производительность сооружений биологической очистки.

**Влияние изменения гидравлических и массовых нагрузок индивидуально для каждой станции и для обоснования имеющихся резервов производительности при применении новых технологий необходимо проводить поверочный расчет, учитывающий как изменение гидравлической, так и массовой нагрузки на сооружения.**

Однако, это не все факторы, которые следует учитывать в поверочном расчете. Как показало обследование существующих станций в России [2], средняя норма потребления на жителя без учета промышленности составляет 200–300 л/чел. в сутки. В то же время в Европейских странах эта величина значительно ниже 100–150 л/чел. в сутки. Следовательно, как в процессе проектирования, так и при дальнейшей эксплуатации очистных сооружений гидравлические и массовые нагрузки могут меняться.

Другим важным фактором является *нагрузка, получаемая от промышленных предприятий*. На сегодняшний день сооружения локальной очистки подвергаются со стороны местных водоканалов жесткому нормированию сбросов в городские сети. Однако, почти во всех случаях такой подход не способствует эффективной работе локальных очистных сооружений предприятий. Переход сооружений локальной очистки на соответствующие отраслевые нормы по НДТ предусматривает существенное изменение типичной ситуации в сторону улучшения качества локальной очистки стоков.



Данные стоков от предприятия №1 «Молокозавод»

Таблица 1

Показатели	Величина	Размерность	Масса	Размерность	Биоокисляемость, д.е. Фракции ХПК
Расход	300	м <sup>3</sup> /сутки			
ХПК	4500	мг/л	1350	кг/сут.	
БПК <sub>5</sub>	3000	мг/л	900	кг/сут.	S <sub>s</sub> = 0,658 – растворенное биоокисляемое
Взвешенные вещества	800	мг/л	240	кг/сут.	S <sub>i</sub> = 0,1 – растворенное биоокисляемое
Азот аммонийный	60	мг/л	18	кг/сут.	X <sub>s</sub> = 0,192 – взвешенное биоокисляемое
Фосфор фосфатов	15	мг/л	4,5	кг/сут.	X <sub>i</sub> = 0,05 – взвешенное биоокисляемое

Данные стоков от предприятия №2 «Мясокомбинат»

Таблица 2

Показатели	Величина	Размерность	Масса	Размерность	Биоокисляемость, д.е. Фракции ХПК
Расход	200	м <sup>3</sup> /сутки			
ХПК	1500	мг/л	300	кг/сут.	
БПК <sub>5</sub>	850	мг/л	170	кг/сут.	S <sub>s</sub> = 0,274 – растворенное биоокисляемое
Взвешенные вещества	800	мг/л	160	кг/сут.	S <sub>i</sub> = 0,1 – растворенное биоокисляемое
Азот аммонийный	100	мг/л	20	кг/сут.	X <sub>s</sub> = 0,576 – взвешенное биоокисляемое
Фосфор фосфатов	25	мг/л	5	кг/сут.	X <sub>i</sub> = 0,05 – взвешенное биоокисляемое

Показатели нагрузки и качества сточных вод для существующей ситуации

Таблица 3

Показатели	Нагрузка, кг/сутки	Концентрация, мг/л
ХПК	12675	507
БПК <sub>5</sub>	5725	229
Взвешенные вещества	5300	212
Азот аммонийный	773	30,92
Фосфор фосфатов	76,875	3,075

Учитывая нагрузку по расходу, массовым загрязнением и нагрузку от предприятий, при разработке последовательной программы изменения технологии на очистных сооружениях требуется проведение расчетов по нескольким сценариям. Наилучшим и надежным для этого инструментом является применение математического моделирования. Пример подобных расчетов будет приведен в статье.

Для осуществления разработки программы реконструкции рассматривалась станция с существующей производительностью 25000 м<sup>3</sup>/сутки. Сооружения работают в средних условиях (% недогрузки ОС от проектной производительности, технология станции соответствует 70-80-м годам постройки) для станций очистки стоков в РФ. Все усредненные данные (концентрации исходного стока, состояния аэраторов, удельный расход воздуха, коэффициент рециркуляции ила, доза ила) приняты в соответствии с результатами обследования станции при разработке справочника НДТ [2]. Данная станция по расходу недогружена. Нагрузка составляет 60% от проектной производительности.

- Расход станции складывается из расхода:
- на инфильтрацию [4] – 10% (2500 м<sup>3</sup>/сутки);
  - от местной промышленности – 30% или 7500 м<sup>3</sup>/сутки;
  - от предприятия №1 – 300 м<sup>3</sup>/сутки;
  - от предприятия № 2 – 200 м<sup>3</sup>/сутки;
  - от населения – 14500 м<sup>3</sup>/сутки.

Местная промышленность совместно с населением сбрасывают воду, соответствующую средне концентрированным стокам: ХПК – 400 мг/л, БПК<sub>5</sub> – 190 мг/л, взвешенные вещества – 200 мг/л, азот аммонийный – 30 мг/л, фосфор фосфатов – 2,75 мг/л.

Средняя норма водоотведения в городе принята 250 л/чел. без учета промышленности. Расчётная численность населения составляет 58 тыс. человек. Учитывая нормы по загрязнению, предписанные в своде правил СП 32.13330.2012 [5], можно рассчитать массовую нагрузку по основным загрязнителям от населения и далее путем баланса масс выделить нагрузку от местной промышленности и инфильтрации.

В данном случае нагрузка составила: ХПК – 3369 кг/сутки (30,6%), БПК<sub>5</sub> – 885 кг/сутки (19%), ВВ – 1130 кг/сутки (23%), по азоту аммонийному – 126 кг/сутки (17%) и по фосфору фосфатов –

5,76 кг/сутки (9%). Получение этих значений в дальнейшем важно для разработки прогнозных ситуаций. На практике они могут быть рассчитаны тем же методом из баланса масс, учитывающий общую концентрацию в сточных водах, расход стока от местной промышленности, инфильтрацию и численность населения при средней норме водоотведения по приборам учета.

Для анализа влияния промышленности принято, что предприятия №1 и №2 оказывают максимальное влияние на формирование концентраций в сточных водах по основным веществам, удаляемым в ходе биологической очистки. Предприятие №1 представлено «Молокозаводом», а предприятие №2 – «Мясокомбинатом». Данные о концентрациях по загрязнителям стоков приняты средними по запросам на проектирование за период 2014-2015 гг. и представлены в таблицах 1 и 2.

С учетом баланса масс и расходов сточных вод от города и от предприятий для существующей ситуации получено качество сточной воды (табл. 3).

Данные из таблицы 3 будут использоваться при моделировании в программном комплексе новой версии GPS-X 6.5 для существующей ситуации и изменения технологии для её усовершенствования.

Зная массы загрязнений и расходы стоков, поступающие от местной промышленности и инфильтрации, населения и основных промпредприятий, возможно разработать любые сценарии изменения расходов и концентраций стоков для моделирования реконструкции станции с учетом долгосрочной перспективы. При этом можно учитывать динамику изменения количества населения, водопотребления, качества стоков существующих и строительство новых промпредприятий. При сложности прогнозирования достоверности возникновения всех факторов, рационально было разработать несколько сценариев для последующего моделирования. Для демонстрации возможностей применения метода рассмотрим **два сценария:**

1. Население города увеличивается на 5%, при этом средняя норма водопотребления на жителя уменьшается до 150 л/чел. в сутки. Количество стоков от местной промышленности и промпредприятий не изменяется.

2. Население города увеличивается на 5%, средняя норма водопотребления уменьшается до 150 л/чел. в сутки, расход стока от местной



Массовая и гидравлическая нагрузки от населения для первого сценария

Таблица 4

Наименование	Величина	Размерность
Численность населения	60900	человек
Расход воды от населения	9135	м³/сутки
<b>Нагрузка</b>		
ХПК	8038,8	кг/сутки
БПК <sub>5</sub>	3654	кг/сутки
Взвешенные вещества	3958,5	кг/сутки
Азот аммонийный	639,45	кг/сутки
Фосфор фосфатов	91,35	кг/сутки

Характеристика стока по загрязнениям, поступающего на станцию, согласно первому сценарию

Таблица 5

Наименование	Массовая нагрузка, кг/сутки	Концентрация, мг/л
ХПК	13057,8	665,02
БПК <sub>5</sub>	5609	285,66
Взвешенные вещества	5488,5	279,52
Азот аммонийный	803,45	40,91
Фосфор фосфатов	106,525	5,42

Расход стоков = 19 635 м³/сутки

Концентрации и массовые нагрузки от «Молокозавода» при локальной очистке стоков

Таблица 6

Наименование	Концентрация, мг/л	Массовая нагрузка, кг/сутки
ХПК	1350	405
БПК <sub>5</sub>	1200	360
Взвешенные вещества	100	30
Азот аммонийный	60	18
Фосфор фосфатов	3	0,9

Концентрации и массовые нагрузки от «Мясокомбината» при локальной очистке стоков

Таблица 7

Наименование	Концентрация, мг/л	Массовая нагрузка, кг/сутки
ХПК	450	90
БПК <sub>5</sub>	340	68
Взвешенные вещества	100	20
Азот аммонийный	100	20
Фосфор фосфатов	5	1

промышленности и инфильтрации не изменяется, но оба предприятия внедряют физико-химическую локальную очистку стоков.

Для первого сценария изменившиеся масса и расход стока от населения представлены в таблице 4. Характеристики стока, поступающего на очистную станцию, согласно первому сценарию, представлены в таблице 5.

При применении физико-химической очистки концентрации [6] и нагрузки от предприятий №1 «Молокозавод» и №2 «Мясокомбинат» представлены в таблицах 6 и 7.

Показатели стока на очистной станции для второго сценария, полученные в результате расчёта баланса масс, представлены в таблице 8.

Рассматриваемая станция очистки сточных вод была построена в 70-80-е годы, отвечающая нормам на проектирование [6], существовавшим на тот период. При этом время пребывания в первичных отстойниках составляло при проектной нагрузке 1,5 часа, в аэротенках – 6 часов, во вторичных отстойниках – 2 часа. Параметры станции, полученные с учетом недогрузки, представлены в таблице 9.

Характеристика стока по загрязнениям, поступающего на станцию, согласно второму сценарию

Таблица 8

Наименование	Концентрация, мг/л	Массовая нагрузка, кг/сутки
ХПК	614,65	11902,8
БПК <sub>5</sub>	256,49	4967
Взвешенные вещества	265,34	5138,5
Азот аммонийный	40,48	803,45
Фосфор фосфатов	5,20	100,525

Характеристики основных сооружений рассматриваемой очистной станции с учетом недогрузки

Таблица 9

Наименование	Величина	Размерность
<b>Первичные отстойники</b>		
Время пребывания	1,50	часа
Рабочая глубина	4	м
Расчетная поверхностна нагрузка	2,66	м³/м² в час
Время пребывания при 60% нагрузке	1,6	м³/м² в час
Площадь первичных отстойников	651,04	м²
<b>Вторичные отстойники</b>		
Время пребывания	2	часа
Рабочая глубина	3,8	м
Расчетная поверхностна нагрузка	1,9	м³/м² в час
Время пребывания при 60% нагрузке	1,14	м³/м² в час
Площадь вторичных отстойников	913,7	м²
<b>Аэротенки</b>		
Время пребывания	6	часов
Рабочая глубина	4	м
Время пребывания при 60% нагрузке	10	часов
Объем	10416,67	м³
Рецикл ила	0,4	д.е.
При 60% нагрузке	0,66	д.е.

Эксплуатационные показатели работы рассматриваемой станции

Таблица 10

Название	Величина	Размерность	Величина	Размерность
Расход воздуха	8333,3	м <sup>3</sup> /час	277	кВт·час/час
Сырой осадок	125	м <sup>3</sup> /сутки	4893,8	кг/сутки
Избыточный активный ил	450	м <sup>3</sup> /сутки	2196	кг/сутки



Рисунок 1  
Модель рассматриваемой станции очистки сточных вод.

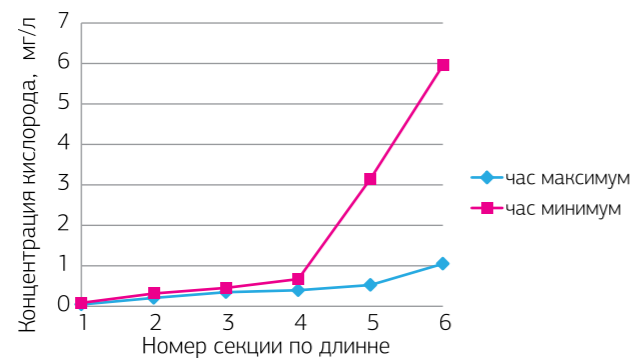


Рисунок 2  
Концентрации кислорода по длине аэротенка.

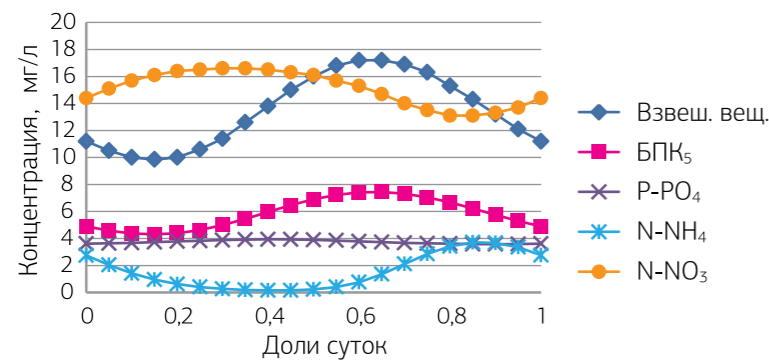


Рисунок 3  
Качество очистки стока после вторичных отстойников.

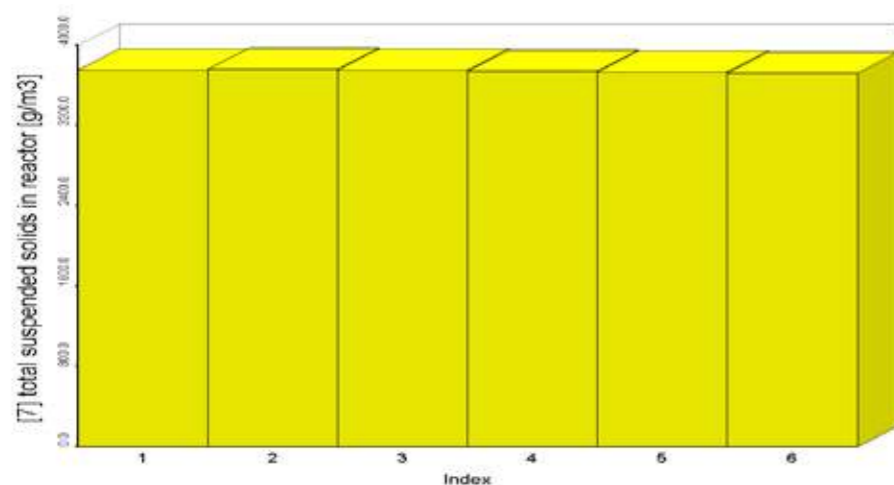


Рисунок 4  
Доза ила по длине аэротенка.

Для моделирования работы системы аэрации было принято снижение эффективности аэрации SOTE до 20% при 6 метрах погружения с учетом старения и неоптимальной раскладки аэраторов. Расход воздуха так же соответствовал средним величинам 8 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

Далее создавалась модель существующей станции в программном комплексе GPS-X 6.5.

Модель станции (рис. 1) включала модуль исходного стока, первичный отстойник, аэротенк вытеснитель и вторичный отстойник. После регулировки дозы ила в диапазоне 1,9-2,1 г/л станция вышла в режим очистки с неполной самопроизвольной денитрификацией (данный процесс типичен для большинства недогруженных станций). Концентрации кислорода были минимальны до середины аэротенка и поднимались до 6 мг/л к концу сооружения в часы минимального притока (рис. 2).

При этом в очищенном стоке достигалось удовлетворительное качество очистки с удалением азота (рис. 3).

Концентрация аммонийного азота колебалась от 0,1 до 3,9 мг/л, в среднем 1,6 мг/л, а концентрация азота нитратов от 14 до 16,5 мг/л, при среднем значении 15,1 мг/л. Концентрация взвешенных веществ не превышала 17 мг/л (иловый

индекс при низких концентрациях кислорода был принят 150 см<sup>3</sup>/г), а БПК<sub>5</sub> – 8 мг/л.

По результатам анализа работы очистных сооружений по России [2], именно такой режим характерен для большинства хорошо работающих недогруженных станций.

Основные эксплуатационные показатели станции представлены в таблице 10.

Для проверки имеющихся резервов производительности доза ила в сооружениях была поднята до 3,6-3,7 г/л (рис. 4), введена зона денитрификации с внутренним нитратным рециклом, растворенный кислород в аэробной зоне установлен на уровне 2 мг/л и иловый индекс в условиях хорошего снабжения кислородом уменьшен до 100 см<sup>3</sup>/г.

Далее была проведена оптимизация размеров зоны денитрификации и нитратного рецикла. При оптимизации объема зоны денитрификации и нитратного рецикла было установлено, что объем зоны денитрификации  $V_d$  не может превосходить 25% общего объема  $V_{at}$  ( $V_d/V_{at}=0,25$ ), а внутренний рецикл не может быть увеличен более, чем на 100%. Увеличение любой из этих величин привело к срыву процессов нитрификации.

Качество очищенной воды в данном режиме представлено на рисунке 5.

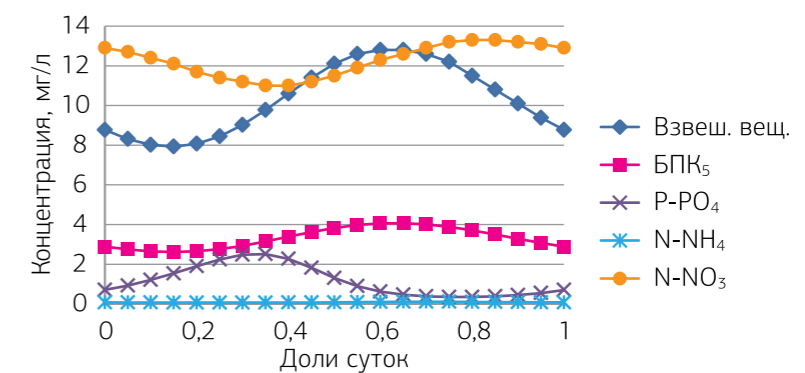


Рисунок 5  
Качество очищенной воды при введении и оптимизации зоны денитрификации.





Рисунок 6  
Модель станции с дозированием реагентов перед первичными отстойниками.

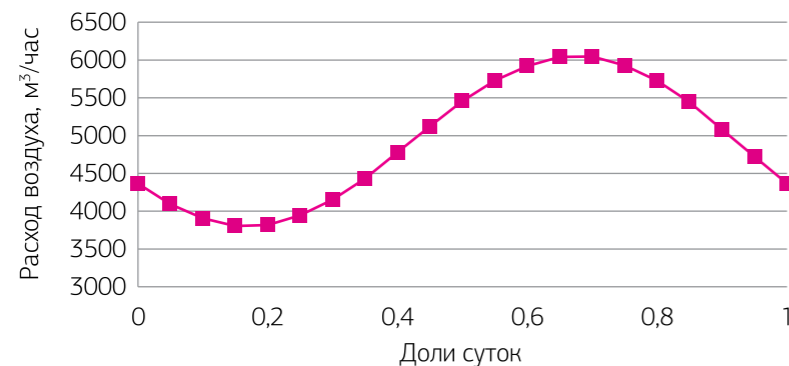


Рисунок 7  
Изменение расхода воздуха в течение суток.

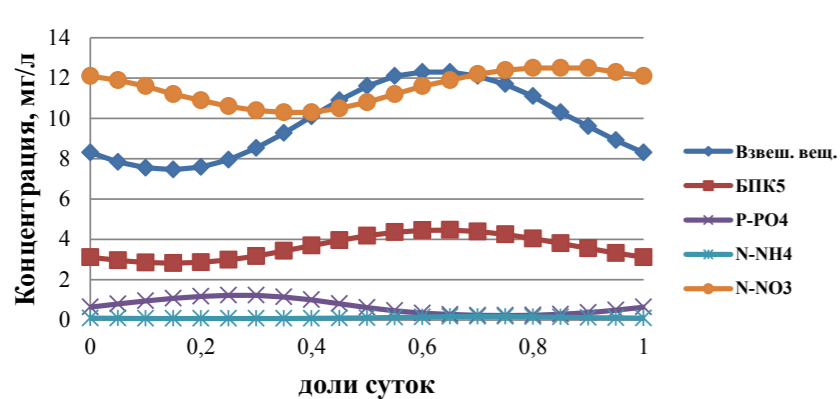


Рисунок 8  
Качество очищенной воды при биологическом удалении азота и физико-химическом удалении фосфора.

Эксплуатационные показатели работы рассматриваемой станции при переходе на технологию БНДХФ

Таблица 11

Наименование	Величина	Размерность	Величина	Размерность
Расход воздуха	4900	м³/час	161	кВт·час/час
Расход реагента	8,8	мг/л по железу	1100	кг/сутки по реагенту с 20% содержанием железа
Сырой осадок	140	м³/сутки	6020	кг/сутки
Избыточный активный ил	220	м³/сутки	1600	кг/сутки

В результате введения и оптимизации объема зоны денитрификации  $V_d$  удалось полностью стабилизировать нитрификацию, улучшить удаление азота нитратов и частично удалить фосфор. Однако, добиться стабильного удаления фосфора с выделением анаэробной зоны и дополнительно увеличить объем денитрификатора в данных условиях было невозможно. Таким образом, для стабилизации удаления фосфора было необходимо применить его химическое осаждение.

Технология с физико-химическим удалением фосфора позволяет варьировать точку ввода реагентов – перед первичными отстойниками (предосаждение), непосредственно в аэротенк (симультантное осаждение), перед доочисткой (постосаждение). В данном случае возможны только два первых варианта. Наиболее распространен метод введения реагентов в аэротенк, так как он требует меньшей дозы реагента. Стехиометрический избыток, необходимый для достижения низких концентраций фосфатов частично достигается за счет накопления реагента в активном иле. Однако, накопление в иле продуктов реакции и реагента приводит к увеличению прироста ила, что в случае с лимитированным объемом нежелательно.

Дозирование реагентов перед первичными отстойниками требует больших, чем в предыдущем случае доз, но улучшает работу первичных отстойников за счет дополнительной коагуляции части взвешенных веществ. Тем самым наряду с удалением фосфора достигается дополнительная разгрузка аэротенков по взвешенным веществам со снижением прироста ила. Т.е. в нашем случае при лимите возможного объема, выделяемого под зону денитрификации, применение данного метода позволяет повысить резерв объема в аэротенках за счет использования возможностей первичных отстойников. Кроме того, за счет снижения нагрузки на аэротенки должно уменьшиться потребление кислорода, что может частично компенсировать затраты на ввод реагента. Модель с введением реагентов перед первичными отстойниками представлена на рисунке 6.

Для максимальной реализации экономии воздуха при моделировании было принято, что на станции в ходе реконструкции устанавливается новая система аэрации и вводится управление расходом воздуха.

В этих условиях оптимизировался режим денитрификации – объем зоны денитрификации и нитратный рецикл.

Оптимальная доза реагента по железу составила 8,8 мг/л, при этом на первичных отстойниках существенно улучшилось качество очистки – концентрация взвешенных веществ составляла 40-70 мг/л (в среднем 51 мг/л). Расход сырого осадка увеличился со 120 м³/сутки до 140 м³/сутки при концентрации 43 г/л (6020 кг/сутки). Для более крупной станции, оснащенной метантенками, увеличение количества сырого осадка привело бы к увеличению выработки энергии за счет увеличения выхода биогаза.

В ходе оптимизации было уставлено, что объем денитрификатора может быть увеличен до 32% ( $V_d/V_{at} = 0,32$ ), а нитратный рецикл может быть увеличен до 120%. Оптимальная доза ила уменьшилась с 3,7г/л до 3 г/л.

Расход воздуха в управляемом режиме стал колебаться от 3800 до 6050 м³/час (рис. 7). Средний расход воздуха составил 4900 м³/час, т.е. была достигнута существенная экономия воздуха, составившая 41%. При выбранной технологии все показатели качества очистки соответствовали нормам технологического нормирования, кроме азота нитратов. Азот нитратов по средней величине составил 11 мг/л, в то время как требуемое значение – 10 мг/л. Концентрации азота аммонийного менее 0,1 мг/л.

При управлении расходом воздуха по концентрации азота аммонийного требуемое качество воды будет достигаться полностью – азот аммонийный менее 2 мг/л, азот нитратов менее 10 мг/л.

Таким образом, применение технологии с биологическим удалением азота и физико-химическим удалением фосфора в условиях рассматриваемой станции является единственным возможным вариантом достижения НДТ без дополнительного строительства с учетом замены на современные мембранные мелкопузырчатые аэраторы при управляемой системе подачи воздуха, позволяющей значительно компенсировать затраты на реагенты за счет экономии энергии. Основные эксплуатационные показатели станции для технологии БНДХФ представлены в таблице 11.

Таким образом, внедрение технологии с биологическим удалением азота и физико-химическим удалением фосфора является оптимальным вариантом для достижения норм НДТ при существующей ситуации.

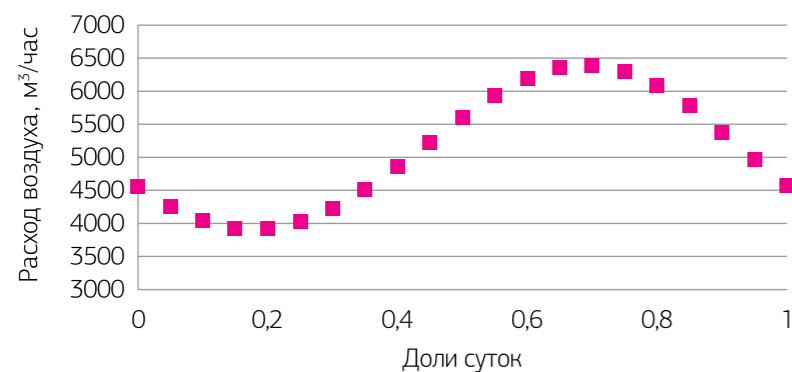


Рисунок 9  
Колебания расхода воздуха в течение суток при изменении нагрузки на станцию для первого сценария.

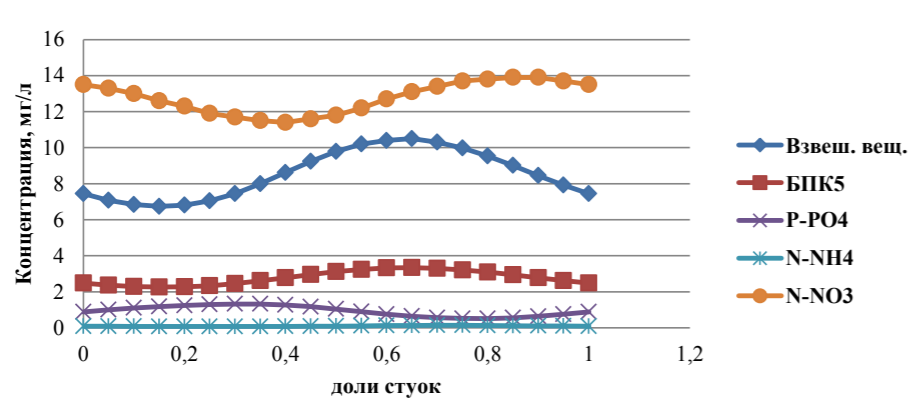


Рисунок 10  
Качество очищенной воды при изменении нагрузки на станцию для первого сценария.

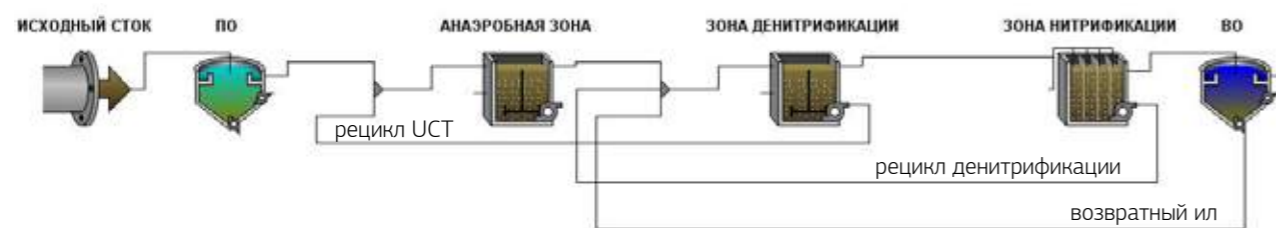


Рисунок 11  
Модель станции с биологическим удалением азота и фосфора.

Основные параметры работы станции для первого сценария

Таблица 12

Наименование	Величина	Размерность	Величина	Размерность
Расход воздуха	5100	м³/час	168,3	кВт·час/час
Расход реагента	20,7	мг/л по железу	2035	кг/сутки по реагенту с 20% содержанием железа
Сырой осадок	140	м³/сутки	6020	кг/сутки
Избыточный активный ил	250	м³/сутки	1975	кг/сутки

Далее проверим, как будет работать реконструированная станция в условиях изменений нагрузки по первому сценарию:

- население города увеличивается на 5%, при этом средняя норма водопотребления на жителя уменьшается до 150 л/чел. в сутки. Количество стоков от местной промышленности и промпредприятий не изменяется.

Оптимизация модели реконструируемой станции при изменившихся входных параметрах показала существенный рост дозы реагента, добавляемого перед первичными отстойниками – с 8,8 до 20,7 мг/л. При этом средняя концентрация взвешенных веществ возросла с 51 мг/л до 83 мг/л, а максимальная достигла 144 мг/л.

Увеличение нагрузки по взвешенным и органическим веществам, несмотря на снижение расхода с 25 до 19,6 м³/сутки, сказалось на работе аэротенков и привело к высоким дозам ила до 3,6-3,7 г/л, т.е. практически к предельно возможным.

Расход воздуха увеличился и достиг от 4000 до 6500 тыс. м³/час при среднем значении 5100 м³/час (рис. 9).

Качество воды после оптимизации параметров при изменении нагрузки на станцию для первого сценария представлено на рисунке 10. Концентрация азота нитратов составила выше допустимых норм от 11,9 до 14 мг/л.

Основные параметры работы станции для первого сценария представлены в таблице 12.

Таким образом, при изменении нагрузки с учетом роста численности населения на 5% и одновременного снижения нормы водопотребления до 150 л/чел. сутки при реконструкции станции с внедрением технологии биологического удаления азота

и физико-химического удаления фосфора существенно, в два раза, увеличивается расход реагентов, также на 5% возрастает расход воздуха. При этом наблюдается превышение концентрации азота нитратов на 2 мг/л выше нормы и достигает до 12 мг/л.

В данных условиях эксплуатация очистных сооружений не рациональна. Т.е. технология, принятая как оптимальная в существующих условиях, не будет соответствовать при изменившихся нагрузках для первого сценария, и ее совершенствование потребует строительства дополнительных емкостей для биологического удаления фосфора с целью уменьшения или полного отказа от применения реагентов.

Для моделирования этой ситуации была принята технология БНДБФ биологического удаления азота и фосфора с применением конфигурации процесса УСТ. Модель станции с биологическим удалением азота и фосфора представлена на рисунке 11.

Концентрация взвешенных веществ при отсутствии введения реагента выросла до 90 мг/л. При этом в условиях возросшей нагрузки на биологическую очистку было принято, что существующие сооружения используются для нитрификации и частично для денитрификации при оптимизации распределения кислорода, а анаэробная зона и основная зона денитрификации достраиваются дополнительно.

В ходе оптимизации объемов анаэробной зоны, дополнительного денитрификатора и дозы ила было получено, что оптимальная доза ила составила 3 г/л.

Дополнительный объем анаэробной зоны составил 2000 м³ (19% от существующих сооружений). При этом достигалось максимальное стабильное выделение фосфора в анаэробной зоне (рис. 12).

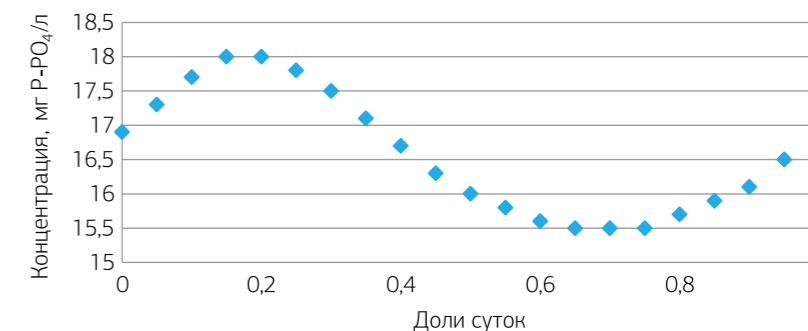


Рисунок 12  
Выделение фосфора фосфатов в анаэробной зоне.

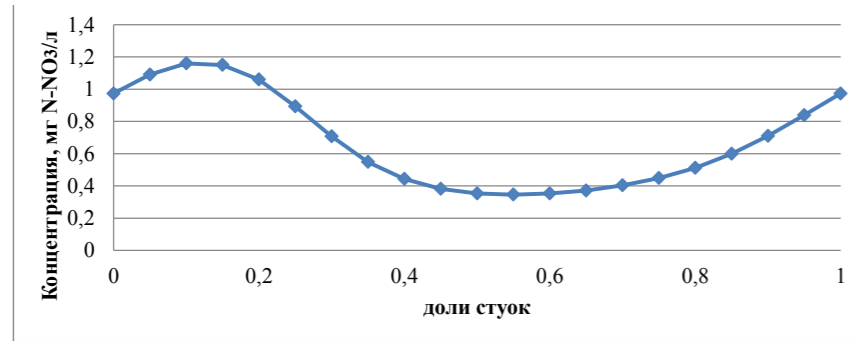


Рисунок 13  
Концентрация азота нитратов после денитрификатора.

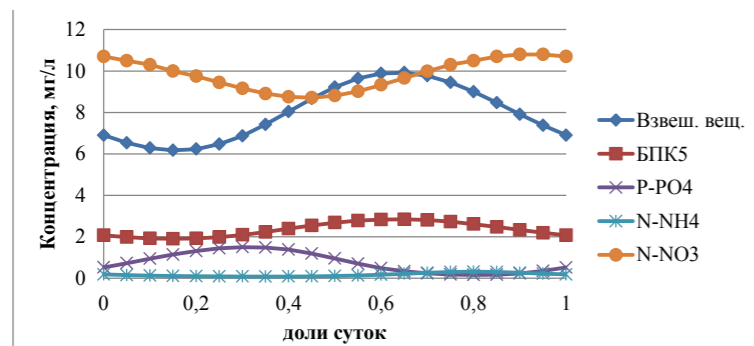


Рисунок 14  
Качество очищенной воды при биологическом удалении азота и фосфора.

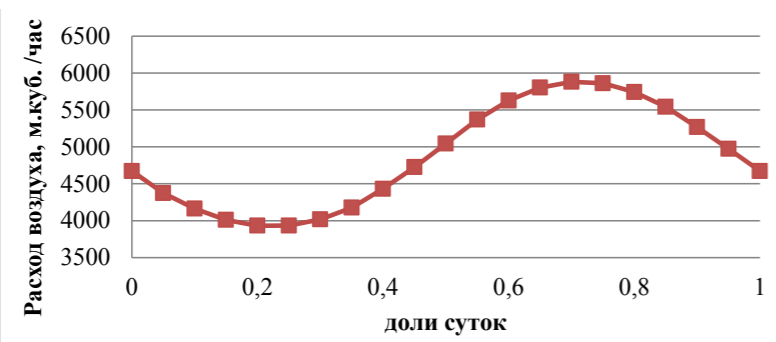


Рисунок 15  
Колебания расхода воздуха при снижении нагрузки от промышленных предприятий для второго сценария.

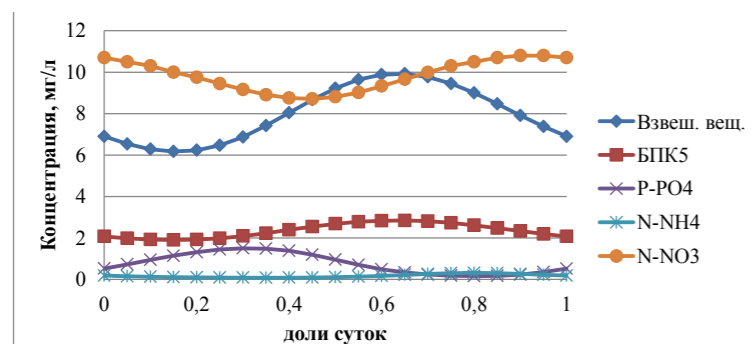


Рисунок 16  
Качество очищенной воды при снижении нагрузки от промпредприятий «Молокозавода» и «Мясокомбината» для второго сценария.

Оптимальный объем дополнительного денитрификатора составил 5000 м<sup>3</sup> (48% от существующих сооружений). При этом после денитрификатора устойчиво достигались низкие концентрации азота нитратов, обеспечивающие стабильную работу анаэробной зоны (рис. 13).

Расход воздуха возрос не значительно и составил от 4400 до 6450 м<sup>3</sup>/час при среднем значении 5300 м<sup>3</sup>/час. При этом достигается требуемое качество очищенной воды по всем показателям (рис. 14).

Характеристики работы станции при реконструкции по *технологии БНДБФ* биологического удаления азота и фосфора с ростом нагрузки представлены в таблице 13. При сравнении данных их таблиц 12 и 13 следует, что достройка сооружений с внедрением технологии биологического удаления азота и фосфора по эксплуатационным данным является оптимальной при принятом первом сценарии при развитии города с учетом роста населения на 5% и при снижении водопотребления с сохранением нагрузки от местной промышленности и предприятий.

В то же время объем новых емкостей составит до 70% от существующих, учитывая средний срок постройки действующих станций, делает

актуальным сравнение достройки существующей станции с восстановлением всех сооружений или строительства новой станции.

Второй сценарий развития предполагает увеличение численности населения, но уменьшение нагрузки от промышленных предприятий:

- население города увеличивается на 5%, средняя норма водопотребления уменьшается до 150 л/чел. в сутки, расход стока от местной промышленности и инфильтрации не изменяется, но оба предприятия внедряют физико-химическую локальную очистку стоков.

В этом случае оптимизация станции, реконструированной по технологии биологического удаления азота и фосфора, приводит к следующим результатам:

- оптимальная доза ила падает до 2,4-2,5 г/л;
- масса сырого осадка снижается до 5418 кг/сут.;
- масса избыточного ила снижается до 1754 кг/сут.;
- расход воздуха оставляет от 4000 до 6000 тыс. м<sup>3</sup>/час при среднем расходе 4870 м<sup>3</sup>/час (рис. 15).

Качество очищенной воды удовлетворяет требованиям технологического нормирования (рис. 16). Основные характеристики работы станции представлены в таблице 14.

Основные параметры работы станции с биологическим удалением азота и фосфора с ростом нагрузки

Таблица 13

Наименование	Величина	Размерность	Величина	Размерность
Расход воздуха	5300	м <sup>3</sup> /час	174,9	кВт·час/час
Расход реагента	0	мг/л по железу	0	кг/сутки по реагенту с 20% содержанием железа
Сырой осадок	140	м <sup>3</sup> /сутки	5600	кг/сутки
Избыточный активный ил	300	м <sup>3</sup> /сутки	1860	кг/сутки

Основные параметры работы станции для второго сценария

Таблица 14

Наименование	Величина	Размерность	Величина	Размерность
Расход воздуха	4870	м <sup>3</sup> /час	160	кВт·час/час
Расход реагента	0	мг/л по железу	0	кг/сутки по реагенту с 20% содержанием железа
Сырой осадок	140	м <sup>3</sup> /сутки	5418	кг/сутки
Избыточный активный ил	350	м <sup>3</sup> /сутки	1754	кг/сутки



Эксплуатационные показатели станции при последовательной реконструкции

Таблица 15

Параметры сценария	Расход воздуха, м <sup>3</sup> /час	Расход реагента, кг/сут. по реагенту с 20% содержанием железа	Образование сырого осадка, кг/сутки	Прирост ила, кг/сутки	Объем достраиваемых сооружений, % от существующего объема
Существующее положение	8333	0	4894	2196	0
Внедрение технологии БНДХФ при существующей нагрузке с заменой системы аэрации и управлении воздухом	4900	1100	6200	1600	0
Работа станции с технологией БНДХФ с увеличением населения на 5% и снижением нормы водопотребления до 150 л на чел. в сутки	5100	2035	6020	1975	0
Переход на технологию БНДБФ	5300	0	5600	1860	67
Внедрение физико-химической очистки на предприятиях	4870	0	5418	1754	67

Представленные данные показывают, что при внедрении физико-химической очистки стоков на принятых по второму сценарию предприятия пищевой промышленности существенно снижается оптимальная доза ила в процессе биологической очистки – на 17%, снижается на 10% расход воздуха, а так же расходы сырого осадка и избыточного активного ила.

Внедрение данной технологии в принятом втором сценарии увеличивает надежность работы станции и снижает эксплуатационные затраты.

Таким образом, с учетом выбранных сценариев развития в результате моделирования работы станции разработана концепция последовательного развития сооружений с достижением норм НДТ на каждом этапе с минимальными эксплуата-

ционными затратами. Основные эксплуатационные показатели и качество очищенной воды при последовательном осуществлении реконструкции станции представлены в таблицах 15 и 16.

В соответствии с предложенным сценарием развития сначала для достижения норм НДТ станция переходит на технологию с биологическим удалением азота и физико-химическим удалением фосфора. При этом для компенсации затрат на реагенты желательнее произвести замену аэрационной системы на современную и внедрить управление расходом воздуха.

Далее с учетом прогноза увеличения численности населения и снижения удельного водопотребления необходимо либо построить дополнительные объемы аэротенков для анаэробных

Качество очищенной воды при последовательной реконструкции

Таблица 16

Параметры сценария	Взвешенные вещества, мг/л	БПК <sub>5</sub> , мг/л	P-PO <sub>4</sub> , мг/л	N-NH <sub>4</sub> , мг/л	N-NO <sub>3</sub> , мг/л
Существующее положение	14	6	3,9	1,6	15,1
Внедрение технологии БНДХФ при существующей нагрузке с заменой системы аэрации и управлении воздухом	10	4	0,9	Менее 1	Менее 10
Работа станции с технологией БНДХФ с увеличением населения на 5% и снижением нормы водопотребления до 150 л на чел. в сутки	9,5	3,5	1	Менее 0,5	13
Переход на технологию БНДБФ	7,8	3	0,9	Менее 0,5	9,8
Внедрение физико-химической очистки на предприятиях	7,9	3	1	Менее 0,5	9,9

зон и дополнительных зон денитрификации в объеме до 70% существующих сооружений, или учитывая, что станция построена в 70-80-е годы, построить новые сооружения с технологией биологического удаления азота и фосфора. При этом увеличение численности населения и соответственно нагрузки на станцию не скажется на увеличении эксплуатационных расходов.

Внедрение технологии физико-химической очистки на предприятиях пищевой промышленности, находящихся в городе, достаточно для обеспечения очистки по нормам НДТ и снижает эксплуатационные расходы станции.

### Выводы

Переход станций очистки сточных вод на наилучшие доступные технологии требует внедрения новых процессов. Для этого необходим выбор технологии и разработка программы реконструкции станции.

Для правильного выбора технологии необходима оценка существующих резервов производительности и проработка нескольких сценариев развития водоснабжения и водоотведения в городе.

Оценку резерва производительности и проработку программы реконструкции с учетом сценариев развития наиболее рационально проводить с применением математического моделирования работы очистных сооружений.

Для станции, работающей в средних для России условиях (средняя норма водоотведения на жителя; средняя концентрация стоков; 40% недогрузки по сооружениям (соответствующая нормам проектирования 70-80-х годов), с применением математического моделирования было получено:

- в условиях существующей технологии и устаревшего оборудования системы аэрации станции способны самопроизвольно переходить





на технологию с нитрификацией и частичным удалением азота, что соответствует результатам обследования действующих станций;

- при существующих объемах и нагрузке на станцию для перехода на биологическое удаление азота и фосфора наиболее доступно применение технологии с биологическим удалением азота и физико-химическим удалением фосфора. Для компенсации затрат на реагенты внедрение данной технологии должно сопровождаться применением современных аэрационных систем и управлением расходом воздуха. Такая реконструкция станции может быть проведена в достаточно сжатые сроки, так как не требует новых дополнительных сооружений.

Однако, в случае развития системы водоснабжения и водоотведения с увеличением количества жителей на 5%, даже несмотря на снижение удельного водопотребления, технология с физико-химическим удалением фосфора начи-

нает требовать значительных затрат реагентов. В данном случае для экономии эксплуатационных затрат более подходит технология с биологическим удалением фосфора. Данный расчет показывает необходимость проработки сценариев развития при разработке программы реконструкции.

Внедрение технологии с биологическим удалением азота и фосфора с учетом развития может потребовать достройки до 70% от объема существующих сооружений. Учитывая, что большинство действующих станций построено в 70-80-е годы, такой объем дополнительных сооружений делает актуальной проработку строительства новых сооружений полностью.

Внедрение на двух предприятиях («Молокозавод» и «Мясокомбинат») физико-химической очистки без дополнительного удаления азота позволяет достигать на реконструированных городских сооружениях качества очистки по нормам НДТ с существенной экономией затрат на очистных сооружениях города.

## Литература:

- <sup>1</sup> Информационно-технический Справочник «Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов», декабрь 2015.
- <sup>2</sup> Эпов А.Н., Канунникова М.А., Данилович Д.А. Анализ данных работы очистных сооружений российских городов – основа для технологического нормирования // Журнал «НДТ Наилучшие Доступные Технологии Водоснабжения и Водоотведения», выпуск №3-4, 2015.
- <sup>3</sup> Эпов А.Н., Канунникова М.А. Использование возраста ила и скорости окисления при расчете процесса нитрификации // Журнал «Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение», выпуск №6, 2015.
- <sup>4</sup> М. Хенце. Очистка сточных вод. Биологические и химические процессы // М., Мир. – 2004.
- <sup>5</sup> Свод правил СП 32.13330.2012. Канализация. Наружные сети и сооружения // Актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85. М. – 2012. – С. 1-92.
- <sup>6</sup> Эпов А.Н., Канунникова М.А. Очистка сточных вод предприятий агропромышленного комплекса // Журнал «НДТ Наилучшие Доступные Технологии Водоснабжения и Водоотведения», выпуск №1, 2015.

## НОВОСТИ