АНАЛИЗ
НА СООТВЕТСТВИЕ НДТ

Система подачи и диспергирования воздуха в аэротенках: опыт эксплуатации, оценка эффективности и соответствия НДТ

Д.А. Данилович,
канд. техн. наук,
эксперт-директор
журнала «НДТ»

Статья посвящена весьма интересному примеру внедрения современной системы подачи воздуха, реализованному на одном из крупнейших в стране сооружений, осуществляющих удаление азота и фосфора на блоке удаления биогенных элементов (УБЭ) Люберецких очистных сооружений АО «Мосводоканал» [1–3], с момента запуска которого прошло 10 лет.

Системы подачи воздуха являются важнейшими элементами любых сооружений биологической очистки, использующих аэротенки (дословно – емкости, куда подают воздух). От их работы зависит как обеспечение требуемого качества очистки, так и экономические показатели процесса. В состав современных систем подачи воздуха входят воздуходувки, системы управления ими, воздуховоды, КИП, управляющая и запорная арматура, и собственно аэрационные системы (совокупность аэраторов и систем подвода воздуха к ним).

В основу технологии очистки сточных вод, использованной на блоке УБЭ, положен UCT-процесс (технология Кейптаунского университета) [4].

На блоке УБЭ подача осветленных вод осуществляется в начало первого коридора (анаэробная зона) (рис. 1). Из первого коридора иловая смесь поступает во второй и третий коридоры («карусель») с аноксидными и аэробными зонами. В начало второго коридора подается возвратный активный ил. Циркулирующая иловая смесь («кейптаунский рецикл») подается погружными насосами из конца второго коридора после прохождения процесса денитрификации в анаэробную зону. В четвертом коридоре (аэробная зона) завершаются процессы нитрификации и окисления органических соединений, а также удаления фосфора. Внутренний рецикл денитрификации организован с использованием «карусельного» принципа. С помощью мешалок, ориентированных по оси потока, во втором и третьем коридорах биореактора осуществляется непрерывное движение иловой смеси через аэробную и аноксидную зоны со скоростью 0,25–0,3 м/с.

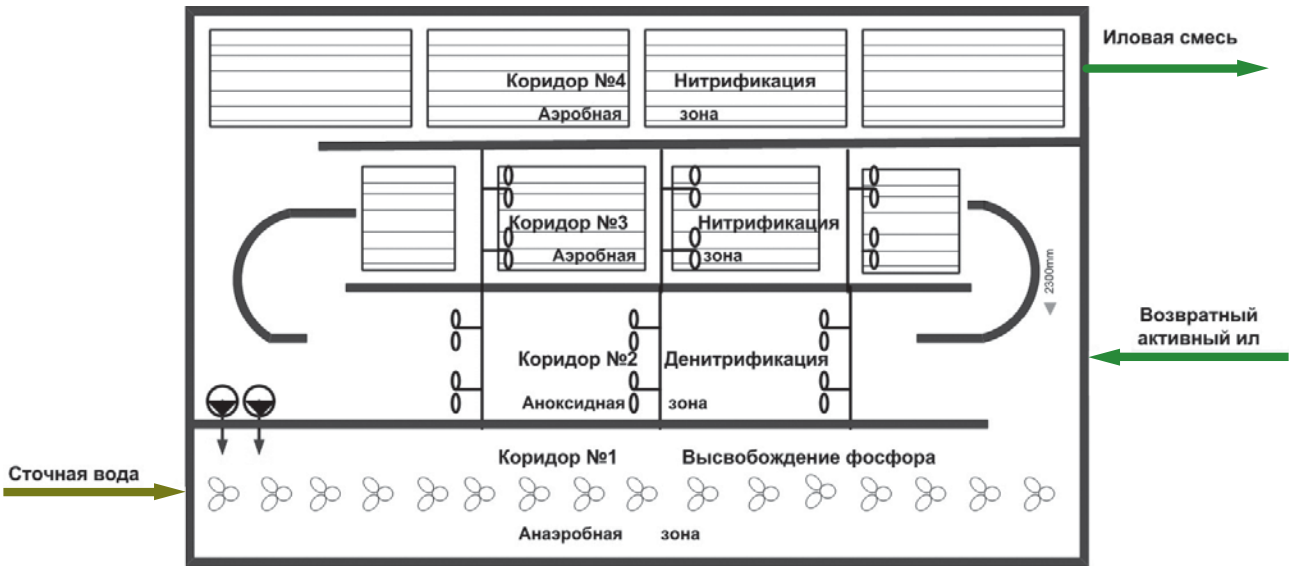

Рис. 1.
Схематичная компоновка одного из 4-х аэротенков блока УБЭ
(не в масштабе.Фактические размеры одного аэротенка: длина – 297 м, ширина – 36 м)

В составе систем подачи воздуха было применено оборудование ведущих мировых производителей, изготовление и монтаж воздуховодов были произведены российской компанией (табл. 1).

Рассмотрим некоторые элементы системы.

Воздухонагнетатели

По проекту основным оборудованием для подачи воздуха на блок были две регулируемые воздуходувки ТС 52.800/690, поставленные компанией HAFI (Австрия). Механическое оборудование в этих агрегатах было от известного производителя Aerzen (Австрия), электрооборудование и АСУ – польской компании Zigelsky.

Таблица 1.
Оборудование системы подачи воздуха

Функция	Оборудование	Производитель
Нагнетание воздуха в аэрационные системы	Воздуходувки с системой регулирования производительности	HAFI, Австрия
Транспортирование сжатого воздуха	Воздуховоды из нержавеющей стали (диаметры выше стандартных)	ИНСЕЛ (Россия)
Регулирование расхода воздуха	Электрифицированные задвижки для воздухопроводов, типа «баттерфляй»	ISORIA, Германия
Измерение расхода воздуха	Расходомеры воздуха	ENDRESS+HAUSER, Германия
Диспергирование воздуха в аэробных зонах	Аэрационная система AQUASTRIP с пластинчатыми мембранными аэраторами	Aqua consult, Австрия
Контроль концентрации растворенного кислорода (КРК)	Стационарные кислородомеры	Стационарные приборы – ENDRESS+HAUSER, Германия. Переносные – WTW, Германия
Управление процессом	АСУ ТП биологической очистки	МосводоканалНИИпроект

Данные агрегаты обеспечивали возможность регулирования подачи воздуха от 100 до 40 % при неизменном давлении и несущественной потере КПД при более низких подачах. Такого рода одноступенчатые агрегаты производства Siemens в отечественной литературе детально описаны В.И. Баженовым и его коллегами [5]. В основе регулирования лежит создание воздушного кольца на входе в рабочее колесо с помощью струенаправляющих лопаток, угол расположения которых может меняться. Агрегаты на блоке УБЭ, оба рабочие, имели номинальную производительность 800 м^3/мин при давлении нагнетания около 0,7 бар. В основе необходимости регулирования в такой степени лежит колебание нагрузки по окисляемым загрязнениям, которое в течение годичного и суточного цикла происходит как раз в диапазоне от 40 до 100 %.

Регулируемые воздуходувки такого типа были использованы впервые в отечественной практике.

Поскольку блок УБЭ строился в развитие предыдущего блока аналогичной производительности, то имелась возможность подключить к воздуховодам нового блока 3 ед. воздуходувок производства «Дальэнергомаш» аналогичной производительности, не оснащенных системами регулирования расхода. Благодаря способности регулируемых воздуходувок поддерживать заданное давление, они могут работать совместно с нерегулируемыми агрегатами без негативного взаимовлияния.

Система регулирования подачи воздуха

На блоке УБЭ использован двухконтурный принцип автоматического регулирования подачи воздуха. В первом контуре, индивидуальном для каждого аэрируемого коридора, подача воздуха регулируется контроллером с помощью электрифицированных задвижек с целью поддержания концентрации растворенного кислорода (определяемой кислородомером) в установленном диапазоне. Во втором контуре, общем для всего блока, второй контроллер, управляя по сигналу датчика давления воздуха расходом регулируемых турбовоздуходувок, обеспечивает поддержание давления сжатого воздуха в общем воздуховоде в заданном диапазоне. Эта система призвана поддерживать индивидуальную заданную концентрацию растворенного кислорода (КРК) в различных аэротенках и их зонах, обеспечивая экономию энергии на аэрацию.

Процесс регулирования, на примере отработки снижения расхода при уменьшении притока на блок, выглядел следующим образом:

- по сигналу от кислородомера (расположены в каждом аэрируемом коридоре каждого аэротенка, всего 8 приборов), при превышении заданной уставки КРК подается сигнал на шаг закрытия задвижки на воздуховоде в данный коридор;
- в остальных коридорах происходят подобные процессы (не обязательно количественно совпадающие, по причинам возможного различного состояния аэрационных систем и неравномерности распределения нагрузки),
- как результат прикрытия задвижек происходит повышение давления в магистральном воздуховоде сверх заданной уставки,
- автоматика воздуходувки дает команду на поворот лопаток управляющего механизма таким образом, что это увеличивает сопротивление на всасе в рабочее колесо, в результате чего подаваемый расход снижается, и давление в воздуховоде возвращается в заданный диапазон.

Второй контур работал в штатном режиме с 2006 г. до первой половины 2013 г. В течение 6 лет данная система прекрасно регулировала подачу, будучи хорошо управляемой и надежной. Для работы блока было достаточно только двух регулируемых воздуходувок. Обеспечивалось очень низкое энергопотребление блока. Это была первая крупномасштабная система такого рода, разработанная и реализованная российскими специалистами.

Однако, после 6 лет работы одна из регулируемых машин вышла из строя в аварийной ситуации. Оторвавшаяся с крепления направляющая лопатка пробила корпус на стороне всаса, в результате резкого роста

давления в этой части воздуходувки произошло разрушение корпуса, с разлетом осколков. По счастливой случайности обошлось без жертв. После этого инцидента второй агрегат был выведен из эксплуатации. Был сделан вывод о необходимости использовать регулируемые воздуходувки исключительно с двусторонним (сквозным) креплением лопаток: в агрегате от Aerzen крепление было на резьбе в тело несущего кольца.

Сейчас блок работает на традиционных нерегулируемых воздуходувках, описанная система регулирования подачи воздуха задействована в минимальной степени.

Полученный опыт однозначно свидетельствует в пользу регулируемых воздуходувок. Однако следует обращать внимание на их конструктивные особенности.

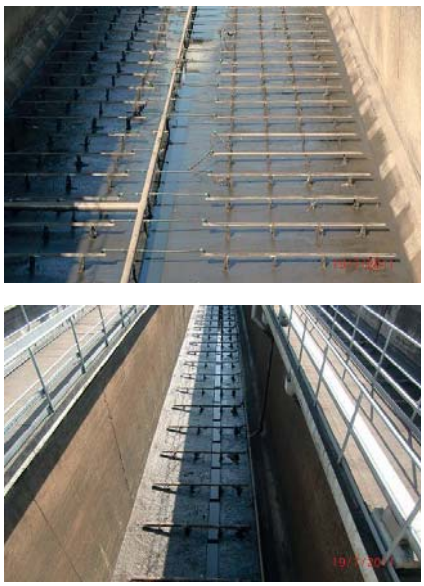

Рис. 2.
Расположение аэраторов AQUASTRIP в 3-ем и 4-ом коридорах аэротенка

Система диспергирования воздуха

Наиболее часто применяемыми в мировой практике на сооружениях такого масштаба являются мембранные аэраторы, обладающие высокой массопередачей (эффективностью использования кислорода из поданного в них воздуха).

В ходе СМР в аэротенках блока УБЭ были установлены пластинчатые мембранные аэраторы AQUASTRIP T4,0EU-18 производства компании *Aqua Consult* (Австрия). Воздухопроводы и основание аэратора были выполнены из нержавеющей стали, мембрана – из полиуретанового полимера. На тот момент аэраторы такого типа рассматривались как одни из наиболее эффективных, производительных и имеющих очень большой срок службы. До принятия решения о приобретении аэраторов такого типа автор в составе делегации «Мосводоканала» знакомился с опытом использования AQUASTRIP на КОС г. Грац (Австрия). Там после 5 лет эксплуатации производилась только частичная выборочная замена, т.е. срок службы оценивался в 7–8 лет, соответствуя заявленному производителем.

Расчет количества аэраторов, необходимого для достижения параметров технического задания конкурса (подача в ил заданного количества кислорода при эффективности не ниже установленной) был произведен поставщиком (инжиниринговой компанией ВОДАКО) на основании эффективности массопередачи, декларированной производителем. В каждом аэротенке было смонтировано по 348 аэраторов. Длина каждого аэратора составляла 4 м, ширина – 18 см, площадь поверхности мембраны – около 0,7 м^2 (рис. 2). Общая площадь аэраторов на блоке составила 975 м^2.

В процессе эксплуатации, вскоре после запуска блока УБЭ, было зафиксировано прогрессирующее снижение пропускной способности аэраторов, что повлияло на величину КРК в аэротенках. При осмотрах обнаруживалось интенсивное биологическое обрастание мембран аэраторов, а также отложение солей жесткости на поверхности мембран.

Рис. 3.
Необратимая деформация мембран аэраторы AQUASTRIP после нескольких лет эксплуатации

К 2009 г. обследование аэрационной системы показало, что все мембраны аэраторов в результате растяжения приобрели остаточную деформацию в виде выгнутой формы. Отмечена высокая степень биообрастания (кольматации) поверхности мембран. На ряде аэраторов мембраны имели разрывы различной степени (рис. 3). Вследствие перечисленных причин рабочая площадь мембран аэраторов сократилась на 25–40 %.

Использовалось рекомендованное фирмой-производителем «встряхивание мембран» с кратковременным полным закрытием подачи воздуха – простой, но, как оказалось, малоэффективный способ. Механическая очистка аэраторов вручную позволяла удалять часть обрастаний. После очистки интенсивность аэрации сразу возрастала, однако эффект сохранялся недолго.

Были проведены локальные эксперименты по химической очистке мембран аэраторов с использованием уксусной кислоты. Такая обработка давала ярко выраженный положительный эффект. Однако для ее реализации требовалась сложная система дозирования и подачи кислоты в воздуховоды. При этом необходимо было заменить элементы воздухоподводящей системы с использованием только кислотостойких материалов. Такое направление было признано бесперспективным, так как требовало не только значительных капитальных затрат, но и увеличения эксплуатационных издержек.

Проблемы эксплуатации аэрационной системы проявлялись в основном в летнее время. Так, летом 2010 г. в наиболее жаркие дни КРК в основных зонах аэрации при полностью открытых задвижек снижалась до 0,1–0,3 мг/л. В результате этого производительность блока в 2010 г. была существенно ниже проектной: службы эксплуатации старались не подавать на блок свыше 400–420 тыс. м^3/сут. сточных вод, т. е. не выше 80–85 % проектной нагрузки.

Описанные проблемы осложнили работу блока, но в целом не повлияли на качество очистки сточных вод [2–3].

Был сделан вывод, что величина расчетной нагрузки на аэраторы была изначально завышена производителем (и проектные параметры работы блока были обеспечены только благодаря запасу, предусмотренному при разработке технического задания на конкурс). Кроме того, материал мембран (полиуретановый полимер) оказался малопригодным для длительной эксплуатации на Люберецких очистных сооружениях. Причины этого установить не удалось.

В связи с высоким износом и снижением эффективности работы аэраторов AQUASTRIP в 2011 г. АО «Мосводоканал» осуществлена полная замена аэраторов во всех аэротенках блока УБЭ (конструкция данной системы в принципе не предусматривала замену только диспергатора). Была установлена система аэрации (см. рис. 4)

Рис. 4.
Аэраторы АКВА-ТОР в аэротенках на Люберецких очистных сооружениях АО «Мосводоканал»

с дисковыми аэраторами АКВА-ТОР (АР-420) производства ЗАО «Экополимер-М» (сейчас – АО «Майпроект»). Отличительной особенностью аэраторов АКВА-ТОР является оригинальная тороидальная конструкция, которая создает циркуляцию иловой смеси не только снаружи, но и внутри аэратора, через центральное отверстие. Это должно препятствовать коалесценции (объединению) пузырьков воздуха, являющейся причиной снижения эффективности растворения кислорода.

В АО «Мосводоканал» накоплен большой положительный опыт эксплуатации аэраторов АКВА-ТОР: по состоянию на ноябрь 2014 г. они были установлены в аэротенках общей производительностью около 4200 тыс. м^3/сут. сточных вод. Общая протяженность воздуховодов в аэротенках составляла около 115 км, общее количество дисков – более 140 тыс. Основные характеристики аэраторов АКВА-ТОР приведены в табл. 2.

В ходе замены аэрационной системы в каждом аэротенке блока УБЭ было установлено по 3325 дисков (в том числе в третьем коридоре – 2338 шт., в четвертом коридоре – 987 шт.). Общая площадь аэрирующей поверхности на блоке возросла до 1530 м^2 (на 57 %). При выборе количества дисков службой эксплуатации учитывалось и существенное увеличение нагрузки на блок по окисляемым загрязнениям с момента запуска (до 50 %), и необходимый резерв для обеспечения работы в условиях планируемой к внедрению технологии ацидофикации осадка первичных отстойников (приведет к увеличению органической нагрузки).

Таблица 2.
Основные характеристики аэраторов АКВА-ТОР

Показатель	Значение
Наружный диаметр аэратора, мм	420
Внутренний диаметр аэратора, мм	170
Площадь аэрирующей поверхности, м^2	около 0,115
Рабочий расход воздуха на один аэратор, м^3/ч	6–20
Оптимальный расход воздуха на один аэратор, м^3/ч	10–12
Начальное сопротивление потоку воздуха (при расходе воздуха 10 м^3/ч), м вод. ст.	0,24±5 %

С вводом новой аэрационной системы лимитирование по окислительной мощности было полностью устранено, в отдельные периоды (когда проводились эксперименты по гидравлической перегрузке блока) в систему подавался расход воздуха до 25 % выше проектного. Наблюдавшийся ранее дефицит кислорода в аэротенках, когда регулирующие задвижки по воздуху открывались на 100 %, а КРК оставалась недостаточной, отсутствовал.

Оценка эффективности аэрационных систем

Информация о фактической эффективности аэрационных систем важна как для анализа эксплуатационных показателей аэротенков, так и для оценки при дальнейшем планировании работ по их реконструкции. В практике АО «Мосводоканал» и других водоканалов для оценки технологической, либо энергетической эффективности аэрации применяются такие удельные параметры, как расход воздуха (или энергии) на 1 м^3 очищаемой сточной воды, либо на 1 кг поступившей (либо удаленной) БПК$_5$. Такой подход давно устарел, так как в первом случае не учитывает концентрации загрязняющих веществ, во втором – затрат кислорода на удаление азота, в обоих случаях – глубины удаления азота. Во всех случаях не учитывается достаточность подачи воздуха.

Практикуются также косвенные оценки – сравнение с подачей воздуха на эти же линии до и после замены аэрационных систем. Этот подход также мало информативен, так как не учитывает в должной мере нагрузку, качество очистки, наличие (либо отсутствие) лимитирования по воздуху.

Известен, в том числе использовался в АО «Мосводоканал», метод отходящих газов («газового купола»), введенный в отечественную практику ГНЦ «НИИ ВОДГЕО», основанный на прямом измерении концентрации кислорода в отходящих газах аэротенка. Он дает точную и объективную информацию об эффективности аэрационной системы, но обладает следующим важным ограничением: полученная этим методом информация относится только к обследованным участкам и к данному моменту времени. Последнее обстоятельство весьма важно, так как это ограничение не позволяет учитывать неравномерность поступления загрязнений и, соответственно, потребления кислорода в течение суток, а также проводить оценку за значительный период времени. По этой причине метод «газового купола» в большей степени характеризует именно эффективность работы диспергаторов воздуха и находит практическое применение, как правило, при приемке новых аэрационных систем и пусконаладочных работах.

Для подтверждения эффективности работы новых аэраторов был разработан усовершенствованный метод массового баланса кислорода и кислородокисляемых веществ в системе «аэротенк – отстойник». В его основе лежит полный учет процессов фактического потребления кислорода в сооружении и соотнесение этого количества с количеством кислорода в поданном воздухе. Методология учитывает потребление воздуха на окисление загрязнений, с учетом процессов денитрификации, остаточного содержания загрязнений в очищенной воде и прироста ила. Расчет массы поданного воздуха учитывает все метеорологические факторы.

Этот подход базируется на расчете количества полезно потребленного кислорода и относится ко всей системе аэрации полностью, т.е. обобщает потребление по всей установке в целом и за весь взятый период времени. Также он учитывает и перерасход воздуха относительно оптимальной потребности как в результате несовершенства распределения воздуха по площади аэротенка, так и отсутствия (недостаточности) регулирования расхода по часам суток.

Таким образом, подход на основе массового баланса, позволяя оценить аэрационную систему в целом, представляет наибольший интерес для решения задач текущей эксплуатации.

Реализация методики массового баланса на Люберецких очистных сооружениях Москвы не потребовала никаких дополнений к сложившемуся перечню технологического

контроля, кроме измерения содержания растворенного кислорода в поступающей воде (существенно насыщается на водосливе распределительной камеры) и органического азота в очищенной воде. Удельное содержание ХПК и азота в избыточном активном иле были приняты по литературным данным, метеорологические параметры (для приведения параметров поданного воздуха к стандартным условиям) – по данным Росгидромета.

В качестве тест-объекта рассматривался блок УБЭ целиком (четыре аэротенка и семь вторичных отстойников). Процедура измерения была осуществлена в сентябре 2013 г. в течение 23 суток, из которых в течение 17 суток производились отборы и анализы проб. Таким образом, в расчете использованы данные за эти 17 дней. В этот период средняя нагрузка на один аэратор АКВА-ТОР (приведенная к н.у.) за период замеров составила: в третьем коридоре – 6,4 м^3/ч, в четвертом коридоре – 10,3 м^3/ч (по рекомендации производителя рабочий расход 6–20 м^3/ч, оптимальный – 10–12 м^3/ч).

Для реализации расчетного метода на блоке УБЭ выполнялась специальная расширенная программа контроля, приведенная в табл. 3.

Несмотря на очевидность подходов, использованных при разработке данной методики, она была применена в России впервые. За рубежом расчеты на основе массового баланса широко используются на сооружениях США и Великобритании. Также известно о применении данного приема для целей бенчмаркинга очистных сооружений [6]. Однако, подробное изложение методики, позволяющее ее воспроизвести, отсутствует.

Подробное изложение методики и ее апробации содержится в [7]. Ниже приведены основные условия и результаты оценки эффективности аэраторов АКВА-ТОР на блоке УБЭ.

Таблица 3.
Расширенная программа контроля на блоке УБЭ

Показатель	Проба и время определения
Сточная вода, поступающая в аэротенки	
Расход	Среднечасовая
Температура	Разовая, ежесуточно
ХПК	Отбиралась пробоотборником ежечасно в накопительную пробу*. Анализировалась как среднесуточная
Общий азот	
Концентрация растворенного кислорода	Разовая, ежесуточно
Подаваемый воздух	
Расход	Среднечасовая
Температура уличного воздуха	Среднечасовая
Иловая смесь на выходе из аэротенков	
Концентрация растворенного кислорода	Два раза в период измерений каждые сутки, а также по данным датчиков (желательно получать информацию по температуре с датчиков)
Концентрация сухого вещества ила	Ежесуточная
Избыточный активный ил	
Расход	Суммарная за сутки
Концентрация сухого вещества	Три раза в сутки
Очищенная сточная вода	
ХПК	Отбиралась пробоотборником ежечасно в накопительную пробу*. Анализировалась как среднесуточная (во взболтанной пробе)
Азот аммонийный	
Азот нитратов	
Азот органический	

* В силу особенностей подачи воды на блок УБЭ коэффициент часовой неравномерности на нем пренебрежимо мал и не учитывался при отборе проб. В иных случаях следует разовые пробы отбирать (либо учитывать в накопительной пробе) в объеме, пропорциональном притоку данного часа.

Таблица 4.
Оценка эксплуатационных данных аэрационных систем с использованием различных методик

Показатель	АКВА-ТОР (2013 г.)		AQUASTRIP (2008 г.), расчетный метод
	для расчетного метода	для прямого измерения методом «газового купола» (выполнялось для апробации расчетного метода)	
Актуальная эффективность передачи кислорода (*AOTE*), %	16,5	22,8	11,8
Стандартная эффективность передачи кислорода *SOTE*, приведенная к глубине 6 м, %	34,9	37,8	24,3
Удельная эффективность *SOTE* (*SSOTE*), %/м	5,8	6,3	4,05
Расхождение между величинами *SSOTE* по двум методикам, %	8,5		–

Разработанная методика позволила также обработать имеющиеся эксплуатационные данные по УБЭ ЛОС за 2008 г., когда использовались аэраторы AQUASTRIP (табл. 4).

Таким образом, измерения, проведенные как по методике массового баланса, так и прямым методом отходящих газов, показали высокую эффективность работы аэрационной системы на основе аэраторов АКВА-ТОР. Величина эффективности растворения кислорода соответствует как лучшим мировым аналогам, так и информации от компании-производителя (ЗАО «Экополимер-М»). Результаты прямых замеров эффективности потребления кислорода (приведенные к стандартным условиям) практически совпали с данными, полученными при испытаниях аэратора АКВА-ТОР в тестовой лаборатории [7].

Замена не зарекомендовавших себя в работе аэраторов AQUASTRIP австрийского производства аэраторами АКВА-ТОР, ранее проявившими себя с положительной стороны на других блоках московских очистных сооружений, позволила повысить на 30 % эффективность использования кислорода, увеличить надежность работы блока, очищающего около 500 тыс. м^3/сут. сточных вод.

Важно оценить удельное энергопотребление по результатам опыта 2013 г. Расчет этой величины с использованием данных службы эксплуатации Люберецких очистных сооружений за сентябрь 2013 г. приведен в табл. 5. Расчет этих показателей (кроме энергоэффективности аэрации в стандартных условиях) также входит в методику анализа эффективности аэрации.

Таблица 5.
Анализ эффективности аэрации

Показатель	Значение
Удельный расход электроэнергии: на очистку сточной воды, кВт·ч/м^3 на подачу воздуха, кВт·ч/1000 м^3 на растворение кислорода, кВт·ч/кг	 0,1 31 0,44
Актуальная энергоэффективность аэрации в период замеров (сентябрь 2013 г.), кг/(кВт·ч)	2,3
Энергоэффективность аэрации в стандартных условиях (SAE)**, кг/(кВт·ч)	4,8

* Измеренная величина при фактическом давлении.
** Приведена к стандартным условиям

ИТС 10–2015. Раздел 5 «Наилучшие доступные технологии»

НДТ 14

НДТ в части управления энергоносителями, сырьем и побочной продукцией при очистке ГСВ является использование всех методов, перечисленных в таблице 5.20, с учетом применимости.

Таблица 5.20.
Перечень методов для НДТ 14

№	Технология/метод	Область применения как НДТ
а	Использование для подачи воздуха в аэротенки агрегатов с КПД использования электроэнергии не менее установленных в таблице 5.21	На крупнейших и сверхкрупных ОС ГСВ
б	Использование технологий подачи воздуха, аэрационных систем (воздухонагнетатели и диспергаторы), обеспечивающих в совокупности затраты электроэнергии на процесс биологической очистки сточных вод в аэротенках не более установленных в таблице 5.21	На ОС ГСВ, начиная с крупных
в	Применение насосных агрегатов для рециркуляции активного ила из вторичных отстойников	На ОС ГСВ, начиная с больших

Таблица 5.21.
Технологические показатели для НДТ 14

Технологический показатель	Единица измерения	Значение для НДТ
Затраты электроэнергии на процесс очистки сточных вод	кВт·ч/кг поступающих кислородпотребляющих веществ (определение – см. 1.6)	Не более 0,7
КПД использования электроэнергии в агрегатах для подачи воздуха в аэротенки	%	Не менее 80
Затраты реагентов на удаление фосфора из сточных вод, по активному элементу[1)]	кг/кг удаленного фосфора	Не более 1,5/0,7[2)]

[1)] По железу или алюминию.
[2)] Перед чертой — по железу, после черты — по алюминию.

Сопоставим результаты работы системы подачи воздуха на блоке УБЭ с требованиями Информационно-технического справочника по наилучшим доступным технологиям ИТС 10–2015 «Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов» в части управления энергоносителями, которые даны в разделе 5, в описании НДТ 14а-в [4]. Для станций такого масштаба наилучшей доступной технологией является:

• применение для подачи воздуха в аэротенки агрегатов с КПД использования электроэнергии не менее 80 % (НДТ № 14а, начиная с крупнейших ОС, т.е. свыше 200 тыс. $м^3$/сутки),

• использование технологий подачи воздуха, аэрационных систем (воздухонагнетатели и диспергаторы), обеспечивающих в совокупности затраты электроэнергии на процесс биологической очистки сточных вод в аэротенках не более 0,7 кВт·ч/кг поступающих кислородпотребляющих веществ (НДТ 14б, начиная с крупных ОС, т.е. свыше 40 тыс. $м^3$/сутки);

• применение автоматического управления подачей воздуха в сооружения биологической очистки по данным непрерывного контроля концентрации растворенного кислорода в этих сооружениях.

В нашем случае КПД всех воздуходувных агрегатов на УБЭ ЛОС, в том числе регулируемых воздуходувок (в период их эксплуатации), на минимуме подаваемого расхода не был ниже требуемых 80 %.

Согласно разделу 1.6 ИТС 10–2015 кислородокисляемыми (кислородпотребляющими) веществами (кислородный эквивалент, КЭ) в сточных водах являются БПК5 и аммонийный азот. Величина КЭ рассчитывается формуле:

$$КЭ = 4{,}6\ C_{N-NH4} + C_{БПК5}$$

где C_{N-NH4} – концентрация аммонийного азота, кг/$м^3$;
$C_{БПК5}$ – концентрация $БПК_5$, кг/$м^3$.

Для условий УБЭ ЛОС величина КЭ в поступающих на биологическую очистку сточных водах за 2013 г. составила около 0,3 кг/$м^3$.

ИТС 10–2015. Раздел 5 «Наилучшие доступные технологии»

НДТ 7
НДТ в части применения надлежащих технологий биологической очистки на объектах ОС ГСВ, начиная с больших

Таблица 5.8.
Перечень технологий для НДТ 7

№	Технология	Область применения как НДТ НДТ (при использовании как заключительной стадии очистки)[1)]
а	Биологическая очистка с нитрификацией	Только при сбросах в водные объекты категории Г[1)]
б	Биологическая очистка с нитрификацией и частичной симультанной денитрификацией	Исключительно для существующих объектов, сбрасывающих очищенные воды в водные объекты категорий Б–Г, на которых эта технология применяется и величина $ИПКО_{цтп}$ менее 15 достигнута не позднее, чем за 2 года до вступления в силу требований об обязательном переходе на НДТ объектов I-й категории в данной подотрасли, и не дольше 7 лет после этого срока.
в	Биологическая очистка с удалением азота	Только при сбросах в водные объекты категории Г
г	Очистка с биологическим удалением азота и фосфора	Для ОС ГСВ со сбросом водные объекты категории В[2)]
д	Биологическая очистка с удалением азота и химическим удалением фосфора	Для ГСВ со сбросом в водные объекты категории Б. Для ОС не крупнее больших
е	Очистка с биологическим удалением азота и фосфора с ацидофикацией	Для ОС ГСВ, начиная с больших, со сбросом в водные объекты категориии Б
ж	Очистка с биологическим удалением азота и биологохимическим удалением фосфора	
з	Очистка с биологическим удалением азота и биологохимическим удалением фосфора с ацидофикацией	

[1)] Выбор между технологиями 7а и 7в осуществляется решением уполномоченного государственного органа в области охраны окружающей среды в соответствии с потребностью водного объекта в биогенных элементах

[2)] Здесь и далее НДТ для водных объектов указанной категории являются те технологии, для которых данные условия применения являются наиболее жесткими из допустимых. Пример: НДТ 7в – НДТ для категории Г, НДТ 7г – для категории В, НДТ 7д – для категории Б. Для указанной категории другие технологии, которые удовлетворяют еще более жестким требованиям, будут соответствовать требованиям НДТ, но применение их на новых объектах (например, использование НДТ 7д в условиях категории Г) нецелесообразно. Оно дополнительно уменьшит негативное воздействие от данного сброса сточных вод, но приведет к нерациональному расходованию средств, которые могли быть инвестированы на других объектах. Это приведет к сохранению значительно большего негативного воздействия на данный водный бассейн в целом, по сравнению со снижением негативного воздействия на одном объекте, на котором применена более эффективная, но более дорогостоящая технология.

Таблица 5.9.
Технологические показатели НДТ 7 для очищенной воды после сооружений биологической очистки

Технологический показатель	Единица измерения	Значение для НДТ, не более [1), 2)]				
		7а	7б	7в	7г	7д-7з
Концентрация взвешенных веществ	мг/л	15	12	15	10	10
Концентрация $БПК_5$	мг/л	10	8	8	8	8
Концентрация ХПК	мг/л	80	60	80	80	80
Концентрация азота аммонийных солей	мг/л	2	2	2	1	1
Концентрация азота нитратов	мг/л	–	15	9 [3)]	9 [3)]	9 [3)]
Концентрация азота нитритов	мг/л	0,2	0,15	0,2	0,1	0,1
Концентрация фосфора фосфатов	мг/л	–	2,0	–	1,0	0,7

[1)] Указанные значения приведены как среднегодовые.

[2)] При сбросе в водный объект, подпадающие под действие международных соглашений, требования соглашений применяются, в тех случаях, когда они жестче данных показателей, либо предъявляются по иным веществам (показателям).

[3)] При соотношении концентрации аммонийного азота и БПК5 более 0,25 концентрацию азота нитратов допускается принимать не более 11 мг/л.

И с учетом данным табл. 5, удельные затраты электроэнергии на процесс биологической очистки сточных вод в аэротенках в период регулирования расхода воздуха составили 0,33 кВт·ч/кг поступающих кислородпотребляющих веществ, что более, чем в два раза ниже максимального значения, установленного НДТ 14б. В отсутствии регулирования эта величина может возрасти до 0,46–0,5, оставаясь в пределах, установленных НДТ 14б.

Качество очистки сточной воды

Интересно сопоставить качество очищенной воды (см. табл. 6). на блоке, запроектированном в 1998–2000 гг., с технологическими показателями НДТ, принятыми в 2015 г. Масштабу и условий сброса блока УБЭ согласно ИТС 10–2015 и ГОСТ-Р 56828.12-2016 [8] соответствует категория «сверхкрупные сооружения» со сбросом в водный объект категории Б (ИТС 10–2015, раздел 5, технологические показатели НДТ 7, табл. 5.9, графы 7д-7з).

Таким образом, в 2013 г. блок не в полной мере соответствовал НДТ по показателю «Азот нитритов» и в оба рассмотренных года – по показателю «Фосфор фосфатов». Следует отметить, что, в том, что касается удаления фосфора, технология, реализованная на блоке УБЭ, действительно нуждается в усовершенствовании для соответствия требованиям НДТ 7 (табл. 5.9 и табл. 5.8). Реализованная на блоке технология биологического удаления фосфора (без дополнений, увеличивающих глубину удаления фосфора) не должна применяться для условий блока УБЭ (сброс в водный объект категории Б). Для соответствия НДТ АО «Мосводоканал» необходимо либо дополнить технологию этого блока дополнительным дозированием реагента для удаления фосфора, либо перевести первичные отстойники на технологию ацидофикации. Качество очистки по азоту нитритов – скорее, вопрос тщательной эксплуатации (ранее, с 2009 по 2012 гг., оно не превышало 0,07 мг/л). ●

Таблица 6.
Качество очищенной воды на блоке УБЭ

Показатель, мг/л	2012 г.	2013 г.	Технологические показатели НДТ
Взвешенные вещества	6,5	6,4	10
$БПК_5$	1,5–2,2	1,5–2,2	8
ХПК	32,8	34,4	80
$N_{общ}$ (по расчету)	11,8	9,9	-
$N–NH_4$	0,89	0,9	1,0
$N–NO_2$	0,07	0,21	0,1
$N–NO_3$	10,3	8,3	9
$P_{общ}$	1,3	1,2	–
$P–PO_4$	0,8	0,83	0,7

Автор выражает благодарность сотрудникам АО «Мосводоканал» С.А. Стрельцову, Н.А. Белову, С.Н. Новикову, Г.Э. Хамидову, М.В. Кевбриной, А.В. Акментиной за организацию проведения замеров в производственных условиях, а также коллективу ЗАО «Экополимер-М» (в настоящее время – АО «Май Проект») за предоставленную информацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилович Д.А., Козлов М.Н., Мойжес О.В., Шотина К.В., Ершов Б.А. Крупномасштабные сооружения биологической очистки сточных вод с удалением биогенных элементов // Водоснабжение и санитарная техника. 2008. № 10. С. 45–51.
2. Данилович Д.А. Итоги работы блока удаления биогенных элементов Люберецких очистных сооружений г. Москвы – крупнейшего в России, построенного по современным технологиям // Вода и экология. Проблемы и решения. 2014. № 3. С. 33–51.
3. Данилович Д.А. Блок удаления биогенных элементов Люберецких очистных сооружений г. Москвы – этапы внедрения современных технологий // НДТ водоснабжения и водоотведения. 2014. № 2. С. 20–37.
4. Информационно-технический справочник по НДТ «Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов» ИТС 10–2015. http://www.burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?UrlId=504&etkstructure_id=1872
5. Баженов В.И., Устюжанин А.В. Энергосбережение в водопроводно-канализационном хозяйстве и промышленных предприятиях при использовании воздухонагнетателей // Экологический вестник России. № 4 2015. С. 44–50.
6. Guildal T., Cecil D., Pedersen P.O., Pedersen J., Thau M., Adrian L., Thirsing C. Results of benchmarking at 7 larger WWTP operators in Denmark // Water Practice & Technology. 2010. V. 5. № 1.
7. Данилович Д.А. Опыт совершенствования и оценки эффективности аэрационных систем // Водоснабжение и санитарная техника. 2015. № 1. С. 38–51.
8. ГОСТ Р 56828.12—2016 Наилучшие доступные технологии. Классификация водных объектов для технологического нормирования сбросов сточных вод централизованных систем водоотведения поселений. Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 25 октября 2016 г. № 1497-ст // Москва, Стандартинформ 2016.