

УДК 628.356.1

## Опыт совершенствования и оценки эффективности аэрационных систем

Д. А. ДАНИЛОВИЧ\*

*\* Данилович Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, заместитель исполнительного директора по инженерно-экологической работе, Российская ассоциация водоснабжения и водоотведения 119334, Россия, Москва, Ленинский проспект, 38, корп. 2, тел.: (495) 939-19-36, e-mail: da\_danilovich@mail.ru*

Описан опыт совершенствования и оценки эффективности аэрационных систем на новом блоке Люберецких очистных сооружений системы канализации Москвы. Блок проектной производительностью 500 тыс. м<sup>3</sup>/сут работает по технологии биологического удаления азота и фосфора. После пяти лет эксплуатации пластинчатые мембранные аэраторы AQUASTRIP австрийского производства были заменены российскими дисковыми мембранными системами AP-420T. Это позволило значительно увеличить подачу сточных вод на новый блок. В ходе исследований были сопоставлены два метода оценки эффективности аэрационных систем: классический метод прямого измерения «газовым куполом» и расчетный метод. Для реализации расчетного метода разработана методика оценки фактической эффективности аэрации аэротенков, основанная на базовых закономерностях массового баланса процессов очистки. Эта методика позволяет в течение любого интервала времени и применительно к любому количеству аэротенков по реальным данным эксплуатации рассчитывать фактическую эффективность использования кислорода воздуха, поданного в систему аэрации. В ходе эксперимента было получено рас-

хождение результатов по двум методикам около 9%, что соответствует погрешностям измерений, положенных в основу расчетов. Измерения и расчеты показали, что удельная эффективность растворения кислорода составляет около 6% на 1 метр глубины погружения аэратора, что соответствует информации, предоставленной компанией-производителем (ЗАО «Экополимер-М»), и на 30% выше, чем у аэраторов AQUASTRIP. Разработанная методика может применяться как для оценки эффективности систем аэрации на конкретных очистных сооружениях, так и для решения задач внутриотраслевого анализа (бенчмаркинга). Рекомендовано использовать расчетную величину фактической эффективности растворения кислорода воздуха, а также энергозатрат на 1 килограмм фактически растворенного кислорода в качестве индикаторных целевых показателей развития очистных сооружений вместо общепринятой величины затрат воздуха (энергозатрат) на 1 м<sup>3</sup> сточной воды.

**Ключевые слова:** биологическая очистка сточных вод, удаление биогенных элементов, пневматическая аэрация, эффективность растворения кислорода, расчетная методика.

Наиболее современным и эффективным сооружением очистки сточных вод в системе московской канализации является блок удаления биогенных элементов (УБЭ) проектной производительностью 500 тыс. м<sup>3</sup>/сут на Люберецких очистных сооружениях [1; 2]. В состав блока УБЭ входят четыре аэротенка (рис. 1), семь вторичных отстойников, иловая насосная станция. Поскольку блок УБЭ не имеет собственных сооружений механической очистки, осветленная сточная вода на него подается от других блоков. Это вызва-

но тем, что блок строился со второй половины 1990-х годов для разгрузки сооружений биологической очистки остальных блоков станции с целью повышения эффективности очистки в целом.

В основу технологии очистки сточных вод, использованной на новом блоке УБЭ, был положен УСТ-процесс (технология Кейптаунского университета). Его отличительной особенностью является проведение предварительной денитрификации иловой смеси, подаваемой в анаэробную зону биореактора.



Рис. 1. Общий вид аэротенков блока УБЭ

На блоке УБЭ подача осветленных вод осуществляется в начало первого коридора (анаэробная зона) (рис. 2). В нем происходят процессы высвобождения фосфатов из клеток фосфатаккумулирующих микроорганизмов и поглощения ими легкодоступных органических веществ. 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. В этих коридорах происходят процессы нитри-денитрификации и частичное окисление органических веществ, накопленных фосфатаккумулирующими микроорганизмами. Циркулирующая иловая смесь (так называемый «кейптаунский рецикл») подается погружными насосами из конца второго коридора после прохождения процесса денитрификации. В четвертом коридоре (аэробная зона) завершаются процессы нитрификации и окисления органических соединений, в том числе накопленных фосфатаккумулирующими организмами с потреблением ими фосфатов, находящихся в иловой смеси.

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.

В 2006 г. в аэротенках блока УБЭ были установлены пластинчатые мембранные аэраторы AQUASTRIP T4,0EU-18 производства компании *Aqua Consult* (Австрия). Воздухопроводы и основание аэратора выполнены из нержавеющей стали, мембрана — из полиуретанового полимера.

В каждом аэротенке было смонтировано по 348 аэраторов. Длина каждого аэратора 4 м, ширина 18 см, площадь поверхности мембраны около 0,7 м<sup>2</sup> (рис. 3), общая площадь аэрирующей поверхности 244 м<sup>2</sup>. Количество аэраторов было рекомендовано компанией-поставщиком на основании высокой эффективности, декларированной производителем. Однако, как показал опыт эксплуатации, эта величина оказалась слишком завышенной.

Количество подаваемого воздуха в аэротенки блока УБЭ регулируется двухконтурной автоматизированной системой. В первом контуре, индивидуальном для каждого аэрируемого коридора, подача воздуха регулируется контроллером с помощью электрифицированных задвижек с целью поддержания концентрации растворенного кислорода (определяемой он-лайн кислородометром) в установленном диапазоне. Во втором контуре, общем для всего блока, второй контроллер, управляя по сигналу датчика давления воздуха расходом регулируемых турбовоздуходувки HAFI (в пределах 40–100% от номинала), обеспечивает поддержание давления сжатого воздуха в общем воздуховоде в заданном диапазоне. Эта система

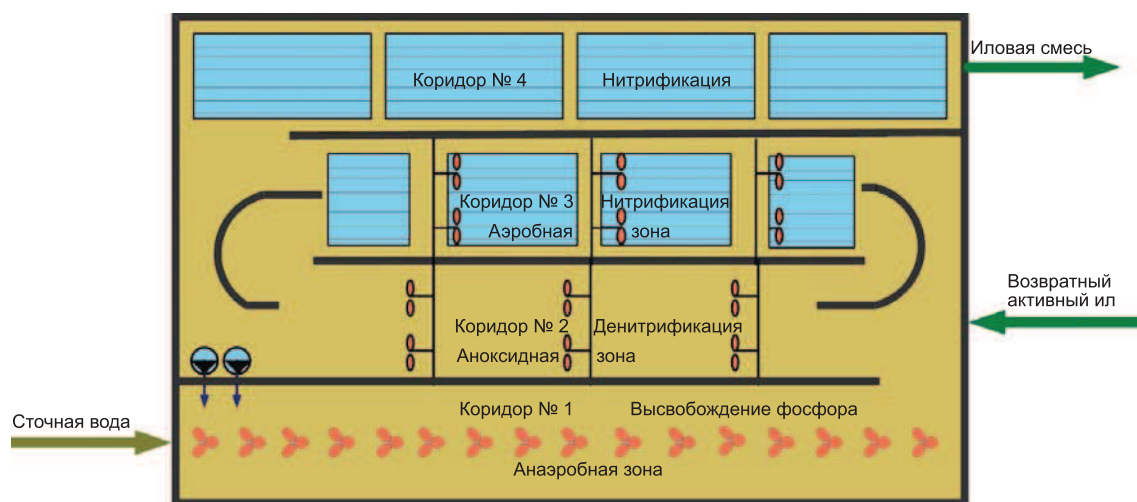
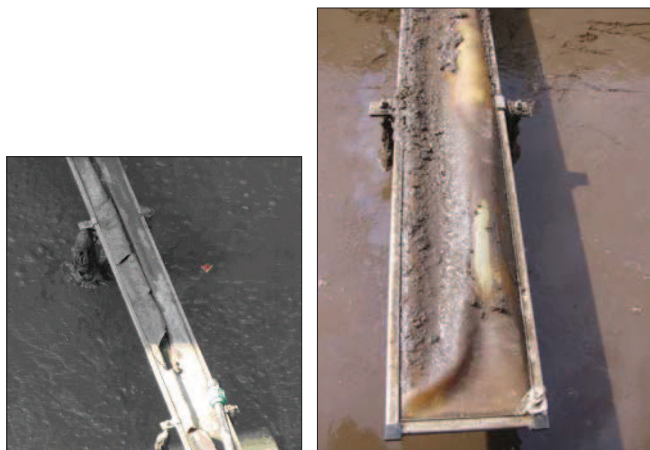


Рис. 2. Схема компоновки аэротенка блока УБЭ



**Рис. 3. Раскладка аэраторов AQUASTRIP. Аэротенк опорожнен для очистки аэраторов**



**Рис. 4. Дефекты мембран аэраторов AQUASTRIP**



**Рис. 5. Ручная очистка мембран аэраторов AQUASTRIP**

призвана поддерживать индивидуальную заданную концентрацию растворенного кислорода в различных аэротенках и их зонах, обеспечивая экономию энергии на аэрацию. Второй контур работал в штатном режиме с 2006 г. до первой половины 2013 г.

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

К 2009 г. обследование аэрационной системы показало, что все мембраны аэраторов в результате растяжения приобрели остаточную деформацию выгнутой формы. Отмечена высокая степень биообрастания (кольматации) поверхности мембран. На ряде аэраторов мембраны имели разрывы различной степени (рис. 4). Вследствие перечисленных причин рабочая площадь мембран аэраторов сократилась на 25–40%.

Для устранения этих дефектов использовалось рекомендованное фирмой-производителем «встряхивание мембран» с кратковременным полным закрытием подачи воздуха – простой, но, как оказалось, малоэффективный способ. Механическая очистка аэраторов вручную (рис. 5) позволила удалить часть обрастаний. После очистки интенсивность аэрации сразу возросла, 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 воздухопроводы. 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 жаркую погоду концентрация растворенного кислорода в третьих коридорах (основная зона аэрации) аэротенков блока УБЭ снижалась до 0,1–0,3 мг/л. В результате производительность блока в 2010 г. была существенно ниже проектной: службы эксплуатации старались не подавать на блок свыше 400–420 тыс. м<sup>3</sup>/сут сточных вод, т. е. не более 80–85% проектной нагрузки.

В связи с высоким износом и снижением эффективности работы аэраторов AQUASTRIP в 2011 г. Мосводоканалом осуществлена полная замена аэраторов во всех аэротенках блока УБЭ (конструкция данной системы в принципе не предусматривала замену только диспергатора). Была установлена система аэрации с дисковыми аэраторами АКВА-ТОР (АР-420) производства ЗАО «Экополимер-М» (рис. 6). Отличительной особенностью аэраторов АКВА-ТОР является оригинальная тороидальная конструкция, которая создает циркуляцию иловой смеси не только снаружи, но и внутри аэратора (через централь-





Рис. 6. Аэраторы АКВА-ТОР в аэротенках на Люберецких очистных сооружениях АО «Мосводоканал»

Таблица 1

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

ное 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 установлены в аэротенках общей производительностью около 4200 тыс. м<sup>3</sup>/сут сточных вод. Общая протяженность воздуховодов составляет около 115 км, общее количество дисков — более 140 тыс. Основные характеристики аэраторов АКВА-ТОР приведены в табл. 1.

В каждом аэротенке было установлено по 3325 дисков (в том числе в третьем коридоре — 2338 шт., в четвертом коридоре — 987 шт.), общая площадь аэрирующей поверхности составила 382 м<sup>2</sup>. При выборе количества дисков службой эксплуатации учитывалось 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 (которая приведет к увеличению органической нагрузки). С вводом новой аэрационной системы лимитирование по окислительной мощности было полностью устранено, в отдельные периоды на блок без ухудшения качества очистки подавался воздух до 25% выше проектной нагрузки. Наблюдавшийся ранее дефицит кислорода в аэротенках, когда регулирующие задвижки по воздуху открывались на 100%, отсутствовал. Обобщенные среднегодовые данные эксплуатации блока УБЭ Люберецких очистных сооружений приведены в табл. 2 [2].

Таблица 2

Показатель, мг/л	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.	Среднее за 5 лет	По проекту	Эффективность, %
Взвешенные вещества	86/5,2	108/6,2	98/6,2	113/6,5	139/6,4	109/6,1	—/8	
БПК <sub>5</sub>	89/1,5–2,2	119/1,5–2,2	120/1,5–2,2	128/1,5–2,2	136/1,5–2,2	118/1,8	—/4	
ХПК	278/31,9	325/26,6	318/27,9	323/32,8	361/34,4	321/30,7	—/30	
N <sub>общ</sub> (по расчету)	30,5/8,2	—/8,9	40/10	41,8/11,8	43,3/9,9	38,3/9,7	30/*	75
N–NH <sub>4</sub>	24,4	28,7/1,37	32/1,13	33,4/0,89	34,6/0,9	30,6/0,96	25/1	
N–NO <sub>2</sub>	—/0,03	—/0,04	—/0,05	—/0,07	—/0,21	—/0,08	—/0,02	
N–NO <sub>3</sub>	—/7,1	—/7	—/8,3	—/10,3	—/8,3	—/8,2	—/9,1	
P <sub>общ</sub>	4,8/1	5,5/0,6	5,5/1,6	5,5/1,3	5,5/1,2	5,4/1,1	—/*	78
P–PO <sub>4</sub>	2,5/0,8	3/0,4	3,2/1,2	3,5/0,9	3/0,8	3/0,83	3,3/0,9	
Примечание. В числителе — вода, поступающая на очистку, в знаменателе — очищенная вода.								
* Не нормируется.								

Информация о фактической эффективности аэрационных систем важна как для анализа эксплуатационных показателей аэротенков, так и для оценки при дальнейшем планировании работ по реконструкции аэрационных систем.

В практике АО «Мосводоканал» и других водоканалов для этой цели применяется оценка технологической либо энергетической эффективности аэрации — расход воздуха (или энергии) на 1 м<sup>3</sup> очищаемой сточной воды либо на 1 кг поступившей (или удаленной) БПК<sub>5</sub>. Такой подход давно устарел, так как в первом случае он не учитывает концентрации загрязняющих веществ, во втором — затраты кислорода на удаление азота, в обоих — глубину удаления азота. Во всех случаях не учитывается достаточность подачи воздуха. Для современных технологий в практике работы АО «Мосводоканал» было предложено относить энергопотребление к удаленному азоту, однако этот подход также очевидным образом не учитывает значительную часть потребления на удаление БПК.

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

Инженерно-технологическим центром Мосводоканала еще с конца 1990-х годов освоен и периодически применяется в научных целях и при пусконаладочных работах метод отходящих газов («газового купола»), разработанный ГНЦ «НИИ ВОДГЕО» и описанный ниже. Метод основан на прямом измерении концентрации кислорода в отходящих газах аэротенка. Он дает точную и объективную информацию об эффективности аэрационной системы, но обладает следующими недостатками (вернее, ограничениями): требует использования нескольких измерительных приборов; процедура работы с куполом весьма трудоемка; собранная 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.

Более доступной и информативной альтернативой может быть усовершенствованный метод массового баланса кислорода и кислородоокисляемых веществ в системе «аэротенк — отстойник». В его основе лежит полный учет процессов фактического растворения кислорода в сооружении и соотнесение этого количества с количеством кислорода в поданном воздухе. То есть 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.

Эффективность использования кислорода воздуха рассчитывается как отношение массы растворившегося кислорода к массе поданного кислорода:

$$\Theta = \frac{M_{O_2}}{W_{\text{возд}} S_{O_2}},$$

где  $M_{O_2}$  — полезный расход кислорода (включая насыщение иловой смеси на выходе из аэротенка), кг/сут;  $W_{\text{возд}}$  — фактический объем поданного воздуха (при атмосферном давлении), м<sup>3</sup>/сут;  $S_{O_2}$  — массовая концентрация кислорода в воздухе, кг/м<sup>3</sup>.

Полученная величина эффективности будет соответствовать фактическим условиям за период проведения замеров (температура иловой смеси и воздуха, атмосферное давление, содержание кислорода). Приведение величины  $\Theta$  к стандартным условиям описано ниже.

Масса растворившегося кислорода соответствует его потреблению на процессы очистки сточной воды (сумма расхода на процессы С-окисления и N-окисления) и массе растворенного кислорода в иловой смеси после аэротенков. Необходимо также учитывать поступление кислорода в аэротенки со сточной водой:

$$M_{O_2} = M_{O_2}^{\text{ХПК}} + M_{O_2}^{\text{N}} - M_{O_2}^{\text{с.в}} + M_{O_2}^{\text{ex}}.$$

Потребление кислорода на окисление органических загрязнений рассчитывается исходя из следующих уравнений массового баланса по ХПК:

$$M_{\text{ХПК}}^{\text{en}} = M_{\text{O}_2}^{\text{ХПК}} + M_{\text{ХПК}}^{\text{иан}} + M_{\text{ХПК}}^{\text{ex}}.$$

где  $M_{\text{ХПК}}^{\text{en}}$  — масса ХПК во входящей сточной воде (здесь и далее в описании массового баланса — в кг);  $M_{\text{O}_2}^{\text{ХПК}}$  — масса ХПК, подвергшаяся окислению в процессе биологической очистки (т. е. соответствующая фактическому потреблению кислорода на окисление органических и других веществ, определяемых как ХПК);  $M_{\text{ХПК}}^{\text{иан}}$  — масса ХПК в избыточном активном иле, отведенном из системы;  $M_{\text{ХПК}}^{\text{ex}}$  — масса ХПК в очищенной воде.

$$M_{\text{O}_2}^{\text{ХПК}} = M_{\text{ХПК}}^{\text{en}} - M_{\text{ХПК}}^{\text{иан}} - M_{\text{ХПК}}^{\text{ex}}.$$

Для азота баланс потребления кислорода определяется на основе следующих уравнений (аналогично стандарту ATV-131 [3]):

$$M_{\text{O}_2}^{\text{N}} = M_{\text{O}_2}^{\text{nitr}} - M_{\text{O}_2}^{\text{deni}};$$

$$M_{\text{N}}^{\text{nitr}} = 4,3(M_{\text{N-NO}_3}^{\text{D}} + M_{\text{N-NO}_3}^{\text{ex}});$$

$$M_{\text{N}}^{\text{deni}} = 2,9M_{\text{N-NO}_3}^{\text{D}};$$

$$M_{\text{N-NO}_3}^{\text{D}} = M_{\text{N-NO}_3}^{\text{en}} - M_{\text{N-NO}_3}^{\text{ex}} - M_{\text{N-NH}_4}^{\text{ex}} - M_{\text{N-NO}_3}^{\text{ex}} - M_{\text{N-NO}_3}^{\text{иан}},$$

где  $M_{\text{O}_2}^{\text{N}}$  — масса кислорода, потребленная на окисление азота;  $M_{\text{O}_2}^{\text{nitr}}$  — масса кислорода, потребленная на нитрификацию;  $M_{\text{O}_2}^{\text{deni}}$  — масса кислорода нитратов, использованная для окисления органических веществ в процессе денитрификации (поэтому вычитаемая из потребления кислорода на окисление азота);  $M_{\text{N-NO}_3}^{\text{ex}}$  — масса азота нитратов в очищенной воде;  $M_{\text{N-NO}_3}^{\text{D}}$  — масса азота нитратов, подвергшихся денитрификации;  $M_{\text{N-NO}_3}^{\text{en}}$  — масса общего азота в поступающей сточной воде;  $M_{\text{N-NO}_3}^{\text{ex}}$  — масса органического азота в очищенной воде;  $M_{\text{N-NH}_4}^{\text{ex}}$  — масса аммонийного азота в очищенной воде;  $M_{\text{N-NO}_3}^{\text{иан}}$  — масса органического азота в избыточном активном иле.

Тогда:

$$M_{\text{O}_2}^{\text{N}} = 4,3(M_{\text{N-NO}_3}^{\text{en}} - M_{\text{N-NO}_3}^{\text{ex}} - M_{\text{N-NH}_4}^{\text{ex}} - M_{\text{N-NO}_3}^{\text{ex}} - M_{\text{N-NO}_3}^{\text{иан}} + M_{\text{N-NO}_3}^{\text{ex}}) - 2,9(M_{\text{N-NO}_3}^{\text{en}} - M_{\text{N-NO}_3}^{\text{ex}} - M_{\text{N-NH}_4}^{\text{ex}} - M_{\text{N-NO}_3}^{\text{иан}});$$

$$M_{\text{O}_2}^{\text{N}} = 1,4(M_{\text{N-NO}_3}^{\text{en}} - M_{\text{N-NO}_3}^{\text{ex}} - M_{\text{N-NH}_4}^{\text{ex}} - M_{\text{N-NO}_3}^{\text{иан}}) - 2,9 M_{\text{N-NO}_3}^{\text{ex}}.$$

Поступление азота в виде нитратов и нитритов в сточных водах может быть принято несущественным.

Для таких составляющих баланса, как ХПК и азот в активном иле в случае существенных изменений массы ила в аэротенках (в результате изменений дозы ила и/или количества работающих аэротенков) накопленное (сократившееся) количество ила должно быть добавлено (вычтено) к количеству (из количества) избыточного активного ила, выведенного за суммарный вре-

менной отрезок, для которого рассчитывается баланс. Если для расчета задействованы не все дни промежутка времени, а только те, в которые проводился детальный технологический контроль, изменение массы ила должно производиться пропорционально отношению количества таких дней к общей продолжительности промежутка времени.

Реализация методики 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 со-

Таблица 3

Показатель	Проба и время определения
Сточная вода, поступающая в аэротенки	
Расход	Среднечасовая
Температура	Разовая, ежесуточно
ХПК	Отбиралась пробоотборником ежесуточно 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	
Избыточный активный ил	
Расход	Суммарная за сутки
Концентрация сухого вещества	Три раза в сутки
Очищенная сточная вода	
ХПК	Отбиралась пробоотборником ежесуточно 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

Показатель	Средне-суточное значение	За период эксперимента*
Объем поступивших сточных вод, тыс. м <sup>3</sup>	488	8304
Расход избыточного активного ила, тыс. м <sup>3</sup>	8,4	142
Температура иловой смеси, °С	23,5	—
Расход поданного воздуха, тыс. м <sup>3</sup>	1574	26 760
* Приняты в расчет только те дни наблюдений, когда проводились анализы (т. е. рабочие дни).		

держание ХПК и азота в избыточном активном иле было принято по литературным данным, метеорологические параметры (для приведения параметров поданного воздуха к стандартным условиям) — по данным Гидрометеослужбы.

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 качестве тест-объекта рассматривался блок УБЭ целиком (четыре аэротенка и семь вторичных отстойников). Подаваемый на блок расход сточных вод поддерживался на уровне около 470 тыс. м<sup>3</sup>/сут (при проектном расходе 500 тыс. м<sup>3</sup>/сут) и соответствовал сложившейся эксплуатационной практике исходя из обеспечения концентрации аммонийного азота в очищенной воде в соответствии с технологическим регламентом установки. Выполненные анализы и определения представлены 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 [4]. Однако подробное изложение методики, позволяющее ее воспроизвести, отсутствует.

Далее приводятся основные количественные результаты апробации методики на блоке УБЭ Люберецких очистных сооружений. Подробное изложение конкретных результатов расчета сделано для удобства применения методики специалистами других очистных сооружений.

Расчеты проводились для каждого суток измерений, результаты массового баланса суммировались. Средние и (или) суммарные результаты приборного контроля расходов приведены в

табл. 4, результаты аналитического контроля поступающей и очищенной воды — в табл. 5.

Расход подаваемого воздуха на блоке УБЭ осуществляется на входе в каждую из двух самостоятельно управляемых зон аэрации, расположенных соответственно в третьем и четвер-

Таблица 5

Показатель	Средне-суточное значение	За период эксперимента*
<b>Поступающая сточная вода</b>		
ХПК, мг/л $M_{\text{ХПК}}^{\text{en}}$ , т	373 —	— 3085
Общий азот, мг/л $M_{\text{N-общ}}^{\text{en}}$ , т	41 —	— 341
Растворенный кислород, мг/л $M_{\text{O}_2}^{\text{в}}$ , т	3 —	— 25
<b>Очищенная вода</b>		
ХПК, мг/л $M_{\text{ХПК}}^{\text{ex}}$ , т	36,6 —	— 302
Азот аммонийный, мг/л $M_{\text{N-NH}_4}^{\text{ex}}$ , т	0,49 —	— 4,1
Азот нитратов, мг/л $M_{\text{N-NO}_3}^{\text{ex}}$ , т	7,8 —	— 64
Азот органический, мг/л $M_{\text{N-орг}}^{\text{ex}}$ , т	1,9 —	— 16,2
Растворенный кислород (в иловой смеси), мг/л $M_{\text{O}_2}^{\text{ex}}$ , т	6,1 —	— 68*
Масса выведенного избыточного активного ила, т		1305
Масса активного ила, накопленного в системе «аэротенк — отстойник» за дни, когда проводился отбор проб, т		76
Масса активного ила, вынесенного с очищенной водой, т		49
Общая масса ила, образовавшаяся за время измерений, т		1430
Зольность активного ила, %		30,4
Удельное ХПК беззольного вещества [5], г/г		1,42
Масса ХПК в образовавшемся иле, т		1456
Удельный азот в образовавшемся иле [5], г/г		0,075
Масса азота в образовавшемся иле, т		74
<b>Результаты расчетов потребления кислорода на процессы очистки</b>		
Масса ХПК, подвергшаяся окислению в процессе биологической очистки, $M_{\text{O}_2}^{\text{ХПК}}$ , т		1447
Масса азота, подвергшаяся окислению в процессе биологической очистки, $M_{\text{O}_2}^{\text{N}}$ , т		535
Масса растворенного кислорода $M_{\text{O}_2}$ , т		1866
* С учетом расхода рециркулирующего ила.		

Таблица 6

Аэротенк	Избыточное давление на входе в зону аэрации, кПа		Расход воздуха на входе в зону аэрации, тыс. м³/сут	
	третий коридор	четвертый коридор	третий коридор	четвертый коридор
№ 1	58	60,3	217	190
№ 2	59,7	59,8	211	105
№ 3	59,4	58,8	274	147
№ 4	59,8	58,9	234	177
Среднее значение	59,2	59,4	234	155

том коридорах каждого из четырех аэротенков (рис. 2). Данные по средним за дни измерения расходам, а также избыточному давлению приведены в табл. 6.

Исходные данные были переведены в нормальные (стандартные) условия применительно к критериям оценки аэрационных систем ( $T_{н.у} = 20\text{ }^{\circ}\text{C} = 293,15\text{ K}$ ;  $P = 760\text{ мм рт. ст.} = 1,013\text{ бар}$ ), а также к влажности воздуха 0% с использованием известных формул пересчета.

Избыточное давление в воздуховодах было переведено в абсолютное давление с учетом атмосферного, принятого по данным метеонаблюдений (также в кПа).

Из величины атмосферного давления предварительно было вычтено произведение давления насыщенных паров воздуха и относительной влажности воздуха:

$$P_{\text{сух}} = P_{\text{изм}} - 0,01 R_h P_{\text{sat}},$$

где  $P_{\text{изм}}$  — измеренное давление атмосферного воздуха, кПа;  $R_h$  — относительная влажность воздуха, доли;  $P_{\text{sat}}$  — давление насыщенных паров воды при данной температуре, кПа.

Объем поданного воздуха был приведен к нормальным условиям по формуле, вытекающей из интегрального газового закона:

$$V_{н.у} = V_{\text{аэр}} \frac{P_{\text{аэр}}}{P_{н.у}} \cdot \frac{T_{н.у}}{T_{\text{аэр}}}.$$

Значения температуры воздуха, подаваемого в аэротенки,  $T_{\text{аэр}}$  приняты по температуре атмосферного воздуха с поправкой на его нагрев вследствие компримирования по результатам фактических замеров, проведенных до эксперимента с помощью термощупа, ввинчиваемого в специальную насадку на каждое ответвление воздуховода. Значения поправки составили  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  для аэротенка, ближнего к главному машинному зданию станции, и  $12\text{ }^{\circ}\text{C}$  — для дальнего.

Таким образом, средняя нагрузка на один аэратор (приведенная к нормальным условиям)

за период замеров составила: в третьем коридоре —  $6,4\text{ м}^3/\text{ч}$ , в четвертом коридоре —  $10,3\text{ м}^3/\text{ч}$  (по рекомендации производителя рабочий расход  $6\text{--}20\text{ м}^3/\text{ч}$ , оптимальный —  $10\text{--}12\text{ м}^3/\text{ч}$ ).

Содержание кислорода в воздухе, равное  $0,287\text{ кг/м}^3$ , было принято по данным метеонаблюдений средним за сентябрь 2013 г. (с учетом приведения к нормальным условиям).

Фактическая эффективность потребления кислорода ( $OTE$ ) составила:

$$\mathcal{E}_{O_2} = \frac{1895\text{ т}}{37\,473\text{ тыс. м}^3 \times 0,283\text{ кг/м}^3} = 17,6\%.$$

Для верификации предложенной расчетной методики одновременно со сбором и обработкой данных для реализации методики массового баланса были проведены прямые измерения эффективности использования кислорода воздуха с помощью метода «газового купола». Важно отметить, что эти измерения и последующее приведение их результатов к стандартным величинам эффективности потребления кислорода не входят в методику, предлагаемую для реализации в рамках производственного анализа работы очистных сооружений. Они выполнялись исключительно в целях ее апробации.

Газосборное устройство представляло собой снабженный поплавками металлический пря-



Рис. 7. Газосборное устройство





**Рис. 8. Штатив с измерительными приборами. Слева направо – измеритель скорости потока воздуха (скоростемер) фирмы Testo, кислородомер АКПМ российской компании «Альфа-Басенс» (кислород в воздухе), кислородомер фирмы WTW (растворенный кислород)**

моугольный купол с внутренними размерами 1200×1200×460 мм с центральным отводящим патрубком и шлангом (рис. 7). На поверхности аэротенка газосборник удерживался в заданной точке и перемещался с помощью тросов. Шланг газосборного устройства был присоединен к штативу, в котором вмонтированы приборы для регистрации измеряемых параметров (рис. 8).

Эффективность использования кислорода определялась на основании количественного измерения содержания кислорода и углекислого газа в поступающем и выходящем газах аэротенков. Для регистрации количества кислорода в газах использовался кислородомер с датчиком АКПМ-01 производства фирмы «Альфа-Басенс» (Россия).

Концентрацию углекислого газа в воздухе и в газе, выходящем из аэротенка, измеряли в опытах, проводимых параллельно с определением эффективности использования кислорода. Концентрацию  $\text{CO}_2$  определяли гравиметрическим методом с помощью поглотительных трубок; в качестве поглотителя использовали ангидрон (поглощение водяных паров) и аскарит (поглощение  $\text{CO}_2$ ).

Эффективность использования кислорода, %, рассчитывали по формуле:

$$\Xi = \frac{C_0 - C}{C_0} 100\%,$$

где  $C$  – расчетная концентрация кислорода в выходящем газе с поправкой на изменение объема (см. ниже);  $C_0$  – концентрация кислорода в воздухе.

При расчете эффективности использования кислорода принималось во внимание изменение

объема газа, выходящего из аэротенка, относительно объема воздуха, подаваемого на аэрацию, за счет поглощения кислорода активным илом и насыщения газовой смеси углекислым газом и водяными парами. Расчетная концентрация кислорода в выходящем газе равна:

$$C = C_x K;$$

$$K = V/V_0,$$

где  $C_x$  – измеряемая концентрация кислорода в выходящем газе (по показаниям кислородомера);  $K$  – поправка, учитывающая изменения объема;  $V_0$  – объем воздуха, подаваемого в аэротенк;  $V$  – объем воздуха, выходящего из аэротенка.

Соотношение объемов воздуха, подаваемого в аэротенк, и газа, выходящего из аэротенка, рассчитывалось по формуле:

$$V = V_0 - \left( V_0 \frac{C_0}{100} - V \frac{C_x}{100} \right) + \left( V \frac{C_{\text{CO}_2}^x}{100} - V_0 \frac{C_{\text{CO}_2}^b}{100} \right) + \left( V \frac{C_{\text{H}_2\text{O}}^x}{100} - V_0 \frac{C_{\text{H}_2\text{O}}^b}{100} \right),$$

т. е. объем воздуха, выходящего из аэротенка, равен объему воздуха, подаваемого в аэротенк, минус уменьшение объема за счет поглощения  $\text{O}_2$ , плюс увеличение за счет насыщения  $\text{CO}_2$ , плюс увеличение за счет насыщения парами воды, где  $C_x$  – измеряемая концентрация кислорода в выходящем газе (по показаниям кислородомера), %;  $C_{\text{CO}_2}^x$  – концентрация  $\text{CO}_2$  в выходящем газе, %;  $C_{\text{CO}_2}^b$  – концентрация  $\text{CO}_2$  в воздухе, %;  $C_{\text{H}_2\text{O}}^x$  – концентрация водяного пара в выходящем газе, %;  $C_{\text{H}_2\text{O}}^b$  – концентрация водяного пара в воздухе, %.

Так как концентрация углекислого газа в воздухе составляет 0,03%, в дальнейших расчетах эту величину можно не учитывать, и поправка на изменение объема газа за счет  $\text{CO}_2$  составит:

$$V \frac{C_{\text{CO}_2}^x}{100}.$$

Парциальное давление водяного пара в воздухе, выходящем из аэротенка, при влажности 100% и температуре 25–30 °С составляет приблизительно 2,3%. Следовательно:

$$V = V_0 \frac{1 - C_0/100}{1 - C_x/100 - C_{\text{CO}_2}^x/100};$$

$$K = \frac{V}{V_0} = \frac{1 - C_0/100}{1 - C_x/100 - C_{\text{CO}_2}^x/100}.$$

Данные измерения методом «газового купола» также имели целью получить данные о влиянии горизонтальной скорости потока в «кару-

Таблица 7

Номер замера	Эффективность использования кислорода, %	
	в условиях горизонтального потока	при отсутствии горизонтального потока
1	23,7	23,5
2	22,8	22
3	22,6	20,8
4	21,7	21,1
5	23,2	21,8
6	22,9	21
Среднее значение	22,8	21,7

сели» аэротенка на эффективность использования кислорода. С этой целью в сентябре 2013 г., одновременно с измерениями по вышеописанной методике, была проведена серия прямых замеров эффективности при различных значениях горизонтальной скорости потока. В табл. 7 приведены результаты измерений для регламентной скорости потока в «карусели» (около 0,28 м/с по среднему значению) и при отсутствии горизонтальной скорости (достигалось временным отключением мешалок в «карусели»).

Для сравнения результатов по эффективности использования кислорода, полученных различными методами и в разных условиях, данные необходимо привести к нормальным (стандартным) условиям. Для подаваемого воздуха этот переход уже произведен. Применительно к условиям растворения в иловой смеси в рассматриваемых условиях следует учесть: фактическую температуру иловой смеси; фактическую концентрацию кислорода (нормальные условия предполагают полный дефицит кислорода); скоростной режим (добавлено к стандартным процедурам на основании исследований, часть из которых приведена в настоящей статье).

В зарубежной литературе эта взаимосвязь выражена уравнением:

$$AOTE = T_t T_d T_p T_v SOTE,$$

где  $AOTE$  — актуальная (фактическая) эффективность передачи кислорода (*actual oxygen transfer efficiency*);  $SOTE$  — стандартная эффективность передачи кислорода (*standart oxygen transfer efficiency*);  $T_t$ ,  $T_d$ ,  $T_p$ ,  $T_v$  — поправки на температуру, концентрацию кислорода, атмосферное давление и скорость потока иловой смеси соответственно.

Искомая фактическая эффективность передачи кислорода:

$$SOTE = \frac{AOTE}{T_t T_d T_p T_v}.$$

Температурная поправка на повышение скорости растворения кислорода при увеличении температуры учтена по уравнению:

$$T_t = 1,024^{t-20}.$$

Для средней температуры иловой смеси 23,5 °С:  $T_t = 1,087$ .

Учет реального дефицита кислорода осуществляется по формуле:

$$T_d = \frac{C_s - C_x}{9,09},$$

где  $C_s$  — насыщающая концентрация в реальных условиях, зависящая от солевого содержания (в настоящем расчете не учтено), температуры, атмосферного давления, глубины расположения аэратора;  $C_x$  — содержание кислорода в иловой смеси; 9,09 — насыщающая концентрация кислорода при нормальных условиях.

В условиях эксперимента при средней температуре 23,5 °С насыщающая концентрация кислорода составит 8,61 мг/л.

Понижающая поправка на давление  $T_p$  (Люберецкие очистные сооружения расположены на отметке около 140 м над уровнем моря) определена как отношение среднего давления (745 мм) за период измерений к давлению 760 мм (нормальные условия) и равна 0,98. Тогда насыщающая концентрация в условиях, отличных от нормальных, составит  $C_t = 8,44$ .

Влияние глубины расположения аэратора (5,6 м) учтено по формуле [6]:

$$T_d = \frac{C_s K_H - C_x}{9,09 K_{H_0}};$$

$$K_H = \frac{P_{\text{атм}} + 0,4gH}{P_{\text{атм}}} = \frac{1013 + 0,4gH}{1013},$$

где  $K_H$  — коэффициент для фактического давления;  $K_{H_0}$  — коэффициент для нормальных условий.

Величина  $C_x$  для расчета по разработанной методике была определена он-лайн по данным кислородомеров, а также с учетом концентрации кислорода на выходе из аэротенков как средневзвешенная по расходу воздуха в два аэрируемых коридора аэротенков. При средних концентрациях 2,3 мг/л в третьем коридоре, 4,5 мг/л — в четвертом коридоре и распределении расходов воздуха 0,6:0,4 средневзвешенное значение  $C_x$  составило 3,2 мг/л. Для данных, полученных прямыми измерениями, принята концентрация

Таблица 8

Показатель	АКВА-TOP (2013 г.)		AQUASTRIP (2008 г.) для расчетного метода
	для расчетного метода	для прямого измерения методом «газового купола»	
Актуальная эффективность передачи кислорода ( <i>AOTE</i> )	16,5	22,8	11,8
Температурная поправка	1,087	1,087	1,024
Коэффициент дефицита кислорода	0,59	0,82	0,67
Скоростная поправка	1,03	1,054	1,03
Коэффициент $\alpha$ : в третьем коридоре в четвертом коридоре средневзвешенное значение	0,7 0,85 0,77	0,7 — 0,7	0,7 0,85 0,76
Коэффициент $\beta$	0,95		
Стандартная эффективность передачи кислорода <i>SOTE</i> , приведенная к глубине 6 м, %	34,9	37,8	24,3
Удельная эффективность <i>SOTE</i> ( <i>SSOTE</i> ), %/м	5,8	6,3	4,05
Расхождение между величинами <i>SSOTE</i> по двум методикам, %	8,5		—

растворенного кислорода, равная 1 мг/л (по непосредственным измерениям переносным прибором).

Коэффициент перехода от чистой к сточной воде  $T_p$  в литературе принято выражать как произведение  $\alpha\beta$  ( $\alpha$  — коэффициент, зависящий от содержания органических загрязнений;  $\beta$  — коэффициент насыщения, определяемый концентрацией растворенных солей). Как известно, значение коэффициента  $\alpha$  изменяется в чрезвычайно широком диапазоне — от 0,25 (в смеси или с исходной сточной водой) до 0,9 (на выходе из сооружения). Наличие в коридорном аэротенке рециклов значительно снижает градиент коэффициента по длине. Значения этих коэффициентов были не измеримы в условиях проведенных экспериментов. Для их получения необходимо проведение тестов на измерение эффективности аэрации в одной и той же установке по классической методике как на чистой, так и на сточной воде. В условиях данной работы для приведения результатов расчетного и прямого измерений эффективности к одинаковым условиям значения коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  были приняты по литературным данным (с учетом загрязненности жидкой фазы в рассматриваемых коридорах). Для расчетного метода значение  $\alpha$  было взято как средневзвешенное по третьему и четвертому коридорам.

Разработанная методика позволила также обработать имеющиеся эксплуатационные данные по УБЭ ЛОС за 2008 г., когда использовались аэраторы AQUASTRIP (табл. 8).

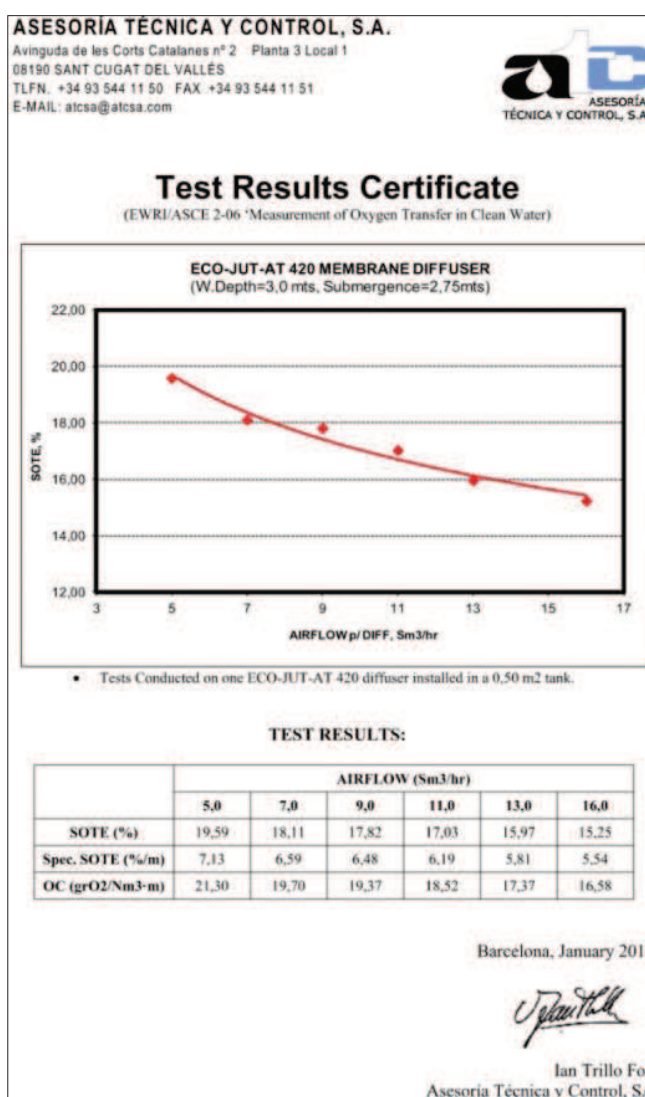


Рис. 9. Сертификат испытаний аэратора АКВА-TOP



Таким образом, проведенное параллельно определение эффективности передачи кислорода показало достаточно хорошую сходимость методов. Фактическая эффективность использования кислорода при применении аэраторов АКВА-TOP оказалась на 30% выше, чем австрийской системы AQUASTRIP.

Интересно сравнить полученные результаты с имеющимися стендовыми данными по стандартной эффективности передачи кислорода *SOTE*. На рис. 9 приведены результаты тестирования аэраторов АКВА-TOP (AP-420) в испанской тестовой лаборатории ATC. Согласно этим данным, *SSOTE* при нагрузках на диск, имевших место при замерах в сентябре 2013 г., составляет: 6,8 %/м при нагрузке 6,4 м³/ч и 6,2 %/м при нагрузке 10,3 м³/ч (к сожалению, замеры проводились с расположением аэраторов на глубине всего 2,75 м).

Средневзвешенная по расходу удельная эффективность *SSOTE* для нагрузок, имевших место при замерах на Люберецких очистных сооружениях, составила 6,44 %/м, что соответствует эффективности *SOTE* на глубине 6 м, равной 38,6%. Эта величина всего на 2% отличается от оценки, полученной по результатам прямого замера методом «газового купола» (как уже говорилось, поскольку величины коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  не измерялись, а назначались, правильно говорить именно об оценке величины *SOTE*).

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. 9. Расчет этих показателей (кроме последнего – энергоэффективности аэрации в стандартных условиях) также должен входить в методику анализа эффективности аэрации.

## Выводы

1. Разработана детальная методика оценки фактической эффективности аэрационных систем в аэротенках очистных сооружений канализации, основанная на известных закономерностях массового баланса процессов. Она позволяет в течение любого интервала времени и применительно к любому количеству аэротенков по фактическим данным эксплуатации рассчитывать фактическую эффективность использования (растворения) кислорода воздуха. Особенностью данного метода является полный учет всех факторов, оказывающих воздействие на реальную потребность сооружений в кислороде. Методика основана только на данных анализа качества поступающей и очищенной воды и измерения основных расходов воды, воздуха, ила и не требует существенных изменений системы технологического контроля.

2. Данная методика прошла апробацию на сооружениях биологической очистки с удалением азота и фосфора производительностью 500 тыс. м³/сут в сравнении с классическим методом прямого измерения в отходящих газах (метод «газового купола»). Полученное расхождение результатов (8,5%) соответствует точности измерений основных составляющих массового баланса.

3. Разработанная методика может применяться как для оценки эффективности систем аэрации, так и для решения задач внутриотраслевого анализа (бенчмаркинга). Рекомендуются использовать расчетную величину фактической эффективности потребления кислорода воздуха, а также энергозатрат на 1 кг фактически потребленного кислорода в качестве индикаторных целевых показателей развития очистных сооружений.

Таблица 9

Показатель	Значение
Расход электроэнергии на подачу воздуха в аэротенки, тыс. кВт·ч/сут	48,6
Расход сточных вод, подаваемых в дни замеров, тыс. м³/сут	488
Расход воздуха, поданного в аэротенки в дни замеров, тыс. м³/сут*	1574
Полезный расход кислорода, т/сут	111
Удельный расход электроэнергии: на очистку сточной воды, кВт·ч/м³ на подачу воздуха, кВт·ч/1000 м³ 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 ( <i>SAE</i> )**, кг/(кВт·ч)	4,8
* Измеренная величина при фактическом давлении. ** Приведена к стандартным условиям по данным табл. 9.	

4. Измерения, проведенные как по методике массового баланса, так и прямым методом отходящих газов, показали высокую эффективность работы аэрационной системы на основе аэраторов АКВА-ТОР (АР-420Т). 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 в Испании.

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

*Автор выражает благодарность сотрудникам АО «Мосводоканал» С. А. Стрельцову, Н. А. Белову, С. Н. Новикову, Г. Э. Хамидову, М. В. Кевбриной, А. В. Акментинной и другим за организацию проведения замеров в производственных условиях, кол-*

*лективу ЗАО «Экополимер-М» за предоставленную информацию, а также В. И. Баженову за ценные советы при подготовке статьи.*

#### 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. STANDARD ATV-DVWK-A 131E. Dimensioning of Single-Stage Activated Sludge Plants. 2000. ISBN 3-935669-96-8.
4. 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.
5. Хенце М., Армоэс П., Ля-Кур Янсен Й., Арван Э. Очистка сточных вод. Биологические и химические процессы: Пер. с англ. – М.: Мир, 2004. 280 с.
6. Degremont. Технический справочник по обработке воды. Т. 1. – СПб: Новый журнал, 2007. 1696 с.

---

## WASTEWATER TREATMENT

---

### ***The experience of improving and evaluating the efficiency of aeration systems***

**D. A. DANILOVICH\***

*\* Danilovich Dmitrii Aleksandrovich, PhD (Engineering), Deputy Executive Director on Engineering-Ecological Activity, Russian Water & Wastewater Association  
Buld. 2, 38 Leninskii Ave., 119334, Moscow, Russian Federation, tel.: +7 (495) 939-19-36, e-mail: da\_danilovich@mail.ru*

The experience of improving and evaluating the efficiency of aeration systems of the new line of the Liuberetskie wastewater treatment facilities of the Moscow wastewater system is described. In the operation of the treatment line with a design capacity of 500,000 m<sup>3</sup>/day biological removal of nitrogen and phosphorus used. Upon five years of operation Austrian-manufactured AQUASTRIP membrane type plate aerators were replaced with Russian-manufactured AR-420T disk membrane systems. This provided for significant increasing wastewater flow to the new line. In the course of studies two methods of evaluation of the aeration system efficiency were compared: the classical approach of direct «gas cap» measurement and the calculation method. In order to implement the calculation method a technique of evaluating the actual aeration efficiency of aeration tanks was developed based on the fundamental principles of the mass balance of the treatment processes. This technique allows calculating the actual efficiency of oxygen utilization supplied to the aeration system from the actual operation data for any time interval and with regard to any aeration tank number. In the course of the experiment about 9% divergence of the results of the two methods was obtained which corresponded to the measurement errors accepted as a basis of the calculations. The measurements and calculations showed that the specific efficiency of oxygen dissolution was around 6% per 1 meter of the aerator immersion depth which complied with the information submitted by the manufacturer («Ecopolymer-M» CJSC), and by 30% higher than shown by AQUASTRIP aerators. The developed method can be used both in evaluating the aeration system efficiency for the certain wastewater treatment facilities and in making the intra-sectoral analysis (benchmarking).

The calculated values of the atmospheric oxygen actual dissolution efficiency and power consumption per 1 kilogram of the actually dissolved oxygen are recommended for being used as the target indicators of the wastewater treatment facilities' improvement instead of the generally accepted air consumption (power consumption) per 1 m<sup>3</sup> of wastewater.

**Key words:** biological wastewater treatment, nutrients removal, diffused-air aeration, oxygen dissolution efficiency, calculation method.

#### REFERENCES

1. Danilovich D. A., Kozlov M. N., Moizhes O. V., Shotina K. V., Ershov B. A. [Large-scale wastewater biological treatment facilities with nutrients removal]. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaya Tekhnika*, 2008, no. 10, pp. 45–51. (In Russian).
2. Danilovich D. A. [The results of the operation of the nutrients removal line of the Liubertskie wastewater treatment facilities of Moscow – the biggest in Russia built by today's technologies]. *Voda i Ekologiya. Problemy i Resheniya*, 2014, no. 3, pp. 33–51. (In Russian).
3. STANDARD ATV-DVWK-A 131E. Dimensioning of Single-Stage Activated Sludge Plants. 2000. ISBN 3-935669-96-8.
4. 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, no. 1.
5. Henze M., Harremoës P., La Cour Jansen J., Arvin E. *Ochistka stochnykh vod. Biologicheskie i khimicheskie protsessy* [Wastewater Treatment. Biological and chemical processes: Translated from English. Moscow, Mir Publ., 2004. 280 p.].
6. Degrémont. *Tekhnicheskii spravochnik po obrabotke vody* [Degrémont. Water treatment handbook, v. 1. St. Petersburg, Novyi Zhurnal Publ., 2007, 1696 p.].



**16 декабря 2014 г. в городе Мышкине Ярославской области состоялась региональная акция «Дни воды», проводимая в рамках реализации Федеральной целевой программы «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012–2020 годах» («Вода России»).**

Во время проведения мероприятия состоялся круглый стол, в котором приняли участие представители Департамента охраны окружающей среды и природопользования Ярославской области, Администрации Мышкинского муниципального района, отдела водных ресурсов Верхне-Волжского БВУ по Ярославской области, ФГУ «Управление эксплуатации Угличского водохранилища», ФГУ «Управление эксплуатации Рыбинского и Шекснинского водохранилищ», а также специалисты водохозяйственного комплекса.

Участники круглого стола обсудили вопросы, связанные с экологическим состоянием Рыбинского водохранилища в черте г. Мышкина, выполнением задач Федеральной целевой программы «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012–2020 годах» на территории Ярославской области, строительством и модернизацией гидротехнических сооружений, очисткой и реабилитацией водных объектов, обеспечением защиты населения и объектов экономики от наводнений и других негативных воздействий.

Для этих целей ведутся работы по укреплению берегов Рыбинского водохранилища (общая площадь участков, подверженных эрозии, составляет около 250 км). Применяются различные методы, например высажено около 14 тыс. деревьев, которые со временем существенно снизят интенсивность разрушения. В ближайшее время планируется расчистка устьевой части реки Сить, по которой затруднено движение воды в результате сплава древесины на протяжении более чем 13 км. Эти работы обеспечат защиту прилегающих территорий от наводнений и улучшат проточность реки. В 2015 г. по берегам Рыбинского водохранилища планируется установить 592 водоохраных знака.

