

# ВОДА MAGAZINE

№6 (94) Июнь 2015

[www.watermagazine.ru](http://www.watermagazine.ru)

**Министр строительства и ЖКХ  
Омской области Станислав  
Гребенщиков: «В основу  
модернизации положен  
комплексный подход»**

**В Гатчине завершена  
реконструкция  
канализационных очистных  
сооружений**

**Обзор российского рынка  
корреляционных  
течеискателей**

**Анаэробная обработка  
высокоуплотненных  
осадков сточных вод в  
термофильных условиях**





# Обеспечение энергоэффективной работы очистных сооружений канализации за счет оптимизации подачи воздуха в аэротенк

Владимир Ким, Николай Большаков, Виктор Татаркин

Около 60% общего энергопотребления канализационных очистных сооружений (КОС) приходится на работу воздухоподувающих агрегатов, обеспечивающих подачу сжатого воздуха в систему биологической очистки аэротенк-вторичный отстойник. На КОС, где отсутствуют такие энергоемкие стадии, как механическое обезвоживание осадков и УФ-обеззараживание, затраты на аэрацию сточных вод достигают 82%. Расход подаваемого на аэрацию воздуха зависит от следующих факторов:

1. Характеристика поступающих на сооружения биологической очистки сточных вод.

2. Применяемая технология биологической очистки (технология аэробной биологической очистки от органических веществ без нитрификации и с нитрификацией, технология нитриденитрификации, технология одновременного глубокого удаления органических веществ, азота и фосфора) и технологического режима работы сооружений биологической очистки сточных вод.

3. Тип и характеристики используемого аэрационного оборудования (с учетом схемы размещения аэраторов в аэротенке).

4. Правильность подбора и возможностей используемого воздухоподувающего оборудования.

5. Уровень автоматизации подачи воздуха в аэротенк.

На практике реализация мероприятий по оптимизации процесса подачи воздуха в аэротенк начинается с проведения технологических расчетов с целью определения требуемого количества воздуха на аэрацию. Для этого необходимо иметь надежную методику расчета, позволяющую определять требуемое количество воздуха на аэрацию в зависимости от характеристик поступающей на очистку сточной воды, используемой технологии биологической очистки, принятого технологического режима, а также типа и характеристик аэрационного оборудования. Расход воздуха на

**В статье приведена методология повышения энергоэффективности работы канализационных очистных сооружений, предложена новая методика расчета требуемого количества воздуха на аэрацию. Рассмотрены этапы повышения эффективности подачи воздуха на КОС: выбор технологии биологической очистки, модернизация аэрационной системы, регулировка подачи аэрирующего воздуха и использование с этой целью регулируемых воздухоподувающих агрегатов. Описанный подход к оптимизации подачи воздуха в аэротенк был использован на КОС МУП г. Сарепула «Сарепульский водоканал».**

**Ключевые слова:** энергоэффективность; очистные сооружения; аэрация; расход воздуха; потребление кислорода; нитрификация; денитрификация; эндогенное дыхание; аэрационная система; турбокомпрессор.

аэрацию  $Q_a$  ( $\text{м}^3/\text{час}$ ) можно рассчитать по методике, приведенной в [1]:

$$Q_a = Q_{\text{воды}} \times q_{\text{air}}; \quad (1)$$

$$q_{\text{air}} = \frac{\Delta O_2}{k_1 k_2 k_3 k_T (c_a - c_o)}; \quad (2)$$

$$\Delta O_2 = q_0 \cdot (S_{\text{en}} - S_{\text{ex}}); \quad (3)$$

где  $Q_{\text{воды}}$  расчетный расход сточной воды для аэротенков,  $\text{м}^3/\text{час}$ ;  $q_{\text{air}}$  - удельный расход воздуха на  $1\text{м}^3$  очищаемой воды,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $\Delta O_2$  - общее потребление молекулярного кислорода в аэротенке,  $\text{мг}/\text{л}$ ;  $k_1, k_2, k_3, k_T$  - коэффициенты [1], зависящие от типа аэрационного оборудования, глубины его погружения, температуры и состава сточных вод;  $c_a, c_o$  - растворимость кислорода воздуха в воде и средняя концентрация кислорода в аэротенке соответственно,  $\text{мг}/\text{л}$ ;  $q_0$  - удельный расход кислорода воздуха,  $\text{мг}$  на  $\text{мг}$  снятой БПК<sub>п</sub>;  $S_{\text{en}}$  - БПК<sub>п</sub> поступающей в аэротенк сточной воды,  $\text{мг}/\text{л}$ ;  $S_{\text{ex}}$  - БПК<sub>п</sub> очищенной воды,  $\text{мг}/\text{л}$ .

Слабым местом методики [1], на наш взгляд, является расчет величины общего потребления молекулярного кислорода в аэротенке по уравнению (3). В результате не обеспечивается требование п. 9.2.7.14 [2], согласно которому при определении расчетной потребности сооружений биологической очистки в кислороде также следует учитывать потребление кислорода на окисление соединений азота, с учетом использования кислорода нит-

ратов. Методика [1] не учитывает возможность работы аэротенка в различных технологических режимах. Для преодоления указанных трудностей нами предложен новый подход для расчета величины общего потребления молекулярного кислорода в аэротенке. Краткое описание новой методики расчета и ее основные расчетные зависимости приведены ниже.

Общее потребление молекулярного кислорода в аэротенке ( $\Delta O_2$ ,  $\text{мг}/\text{л}$ ) можно представить в виде двух слагаемых: потребление кислорода на биоокисление органических веществ ( $\Delta O_{2\text{ов}}$ ,  $\text{мг}/\text{л}$ ) и потребление кислорода на биоокисление аммонийного азота до нитратного азота в ходе нитрификации ( $\Delta O_{2\text{н}}$ ,  $\text{мг}/\text{л}$ ). Соответственно, можно записать:

$$\Delta O_2 = \Delta O_{2\text{ов}} + \Delta O_{2\text{н}}. \quad (4)$$

Величина складывается из трех составляющих:

1. Потребление кислорода (включая кислород нитратов) на биоокисление растворенных органических веществ ( $\Delta O_{2\text{л}}$ ,  $\text{мг}/\text{л}$ ) с целью получения энергии необходимой для биосинтеза (роста клеток).

2. Потребление кислорода (включая нитратный кислород) на эндогенное дыхание активного ила ( $\Delta O_{2\text{энд}}$ ,  $\text{мг}/\text{л}$ ).

3. Экономия молекулярного кислорода за счет использования нитратов на биоокисление части органи-

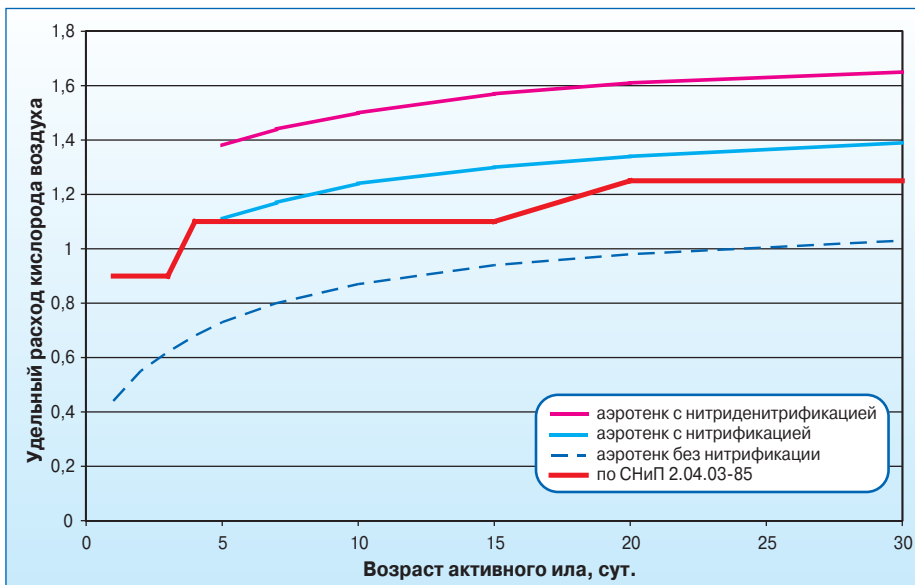
**Ким Владимир Станиславович**, генеральный директор GSP-Project Ltd (CEO@gsp-project.com, +79118298284)

**Большаков Николай Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент, научный консультант GSP-Project Ltd (N.Bolshakov@gsp-project.com, +79110385296)

**Татаркин Виктор Николаевич**, начальник КОС МУП г. Сарепула «Сарепульский водоканал» (sarapul\_vodokanal@mail.ru, тел. +79128781642)



■ Рис. 1. Зависимость удельного расхода кислорода воздуха от возраста активного ила



ческих веществ в ходе денитрификации ( $\Delta O_{2D}$ , мг/л).

Следовательно, справедливо выражение:

$$\Delta O_2 = \Delta O_{2L} + \Delta O_{2\text{эно}} + \Delta O_{2H} - \Delta O_{2D}; \quad (5)$$

Величины  $\Delta O_{2L}$ ,  $\Delta O_{2\text{эно}}$ ,  $\Delta O_{2H}$  и  $\Delta O_{2D}$  задаются уравнениями [3]:

$$\Delta O_{2L} = z_0(L_{en} - L_{ex}); \quad (6)$$

$$\Delta O_{2\text{эно}} = \frac{Ab\tau_x}{1+b\tau_x} [y_0L_{en} + B_{ex}(1-f_B)]; \quad (7)$$

$$\Delta O_{2H} = 4,57\Delta N_H; \quad (8)$$

$$\Delta O_{2D} = 2,86\Delta n_D; \quad (9)$$

где  $z_0$  - истинный энергетический коэффициент, кгO<sub>2</sub>/кгБПК;  $L_{en}$ ,  $L_{ex}$  БПКп фильтрованной пробы сточной воды на входе и выходе аэротенка соответственно, мг/л;  $A$  - кислородный эквивалент самоокисляющейся биомассы, кгO<sub>2</sub>/кг беззольной массы активного ила;  $b$  - константа скорости самоокисления биомассы, сут<sup>-1</sup>;  $\tau_x$  - возраст активного ила, сут;  $y_0$  - истинный экономический коэффициент, кг/кгХПК;  $B_{ex}$  - концентрация взвешенных веществ в сточной воде на входе аэротенка, мг/л;  $f_B$  - небиodeградируемая часть в исходных взвешенных веществах;

$$\Delta N_H = N_{en} + \Delta N_{ox} - N_{ex}^a;$$

$$\Delta n_D = \Delta N_H + n_{en} - n_{ex}^a;$$

$\Delta N_H$  - количество нитрифицированного азота, т.е. количество аммонийного азота окисленного до азота, нитратного в ходе нитрификации, мгN/л;  $N_{en}$  - эффективная концентрация аммонийного азота на входе аэротенка (концентрация аммонийного азота в сточной воде на входе аэротенка за вычетом его потребления на синтез биомассы, но с учетом выхода аммонийного азота из органических веществ при их окислении в ходе эндогенного дыхания), мгN/л;

$\Delta N_{ox}$  - вторичное загрязнение воды аммонийным азотом в ходе биодеструкции взвешенных веществ сточной воды и биомассы активного ила, мгN/л;  $N_{ex}^a$  - концентрация аммонийного азота на выходе аэротенка, мгN/л;  $n_{en}$ ,  $n_{ex}^a$  - концентрации нитратного азота на входе и выходе аэротенка соответственно.

Подставив соотношения (6)-(9) в формулу (5), получим выражение для  $\Delta O_2$ :

$$\Delta O_2 = z_{0\text{БПК}}(L_{ex} - L_{вх}) + \frac{Ab\tau_x}{1+b\tau_x} \cdot [y_0L_{ex} + B_{ex}(1-f_B)] + 4,57\Delta N_H - 2,86\Delta n_D; \quad (10)$$

Выражение (10) описывает потребление кислорода по всем составляющим.

По уравнениям новой методики расчета и [1] построим зависимость  $q_0 = f(\tau_x)$  для сточных вод Центральной станции аэрации г. Санкт-Петербурга (производительность КОС по сточной воде - 1 000 000 м<sup>3</sup>/сут.) при следующих допущениях:

- при возрасте ила меньше трех суток нитрификации нет, соответственно, нет потребления кислорода на нитрификацию;

- при возрасте ила больше пяти суток нитрификация достаточно полная, т.е. протекает эффективно, а следовательно, концентрация аммонийного азота на выходе аэротенка пренебрежимо мала по сравнению с концентрацией аммонийного азота в поступающей сточной воде.

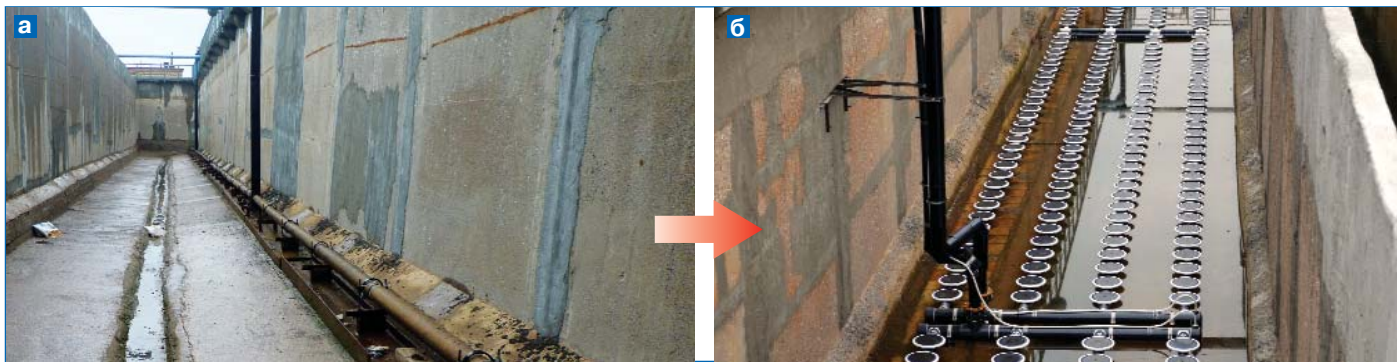
Результаты расчета зависимости  $q_0 = f(\tau_x)$  показаны на рис. 1. Сравним полученную зависимость с величиной  $q_0$ , приведенной в [1]. В [1] рекомендуется принимать следующие значения удельного расхода кислорода воздуха: при возрасте активного ила меньше 3 сут.  $q_0 = 0,9 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ; при возрасте активного ила от 3 до 20±25 сут.  $q_0 = 1,1 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ; для систем с продленной аэрацией  $q_0 = 1,25 \text{ м}^3/\text{м}^3$ . Из рис. 1 видно, что результаты расчета по модели могут существенно отличаться от расчетов по [1], где не учтена возможность работы аэротенка в различных технологических режимах, при этом оптимальным режимом, на наш взгляд, является режим нитриденитрификации, т.к. при этом обеспечивается не только достаточно низкий удельный расход кислорода воздуха, но и высокая эффективность очистки по органическим веществам и азоту. Таким образом, первым этапом повышения энергоэффективности подачи воздуха на КОС является выбор технологии биологической очистки.

www.gsp-project.com  
 190013, Россия, г. Санкт-Петербург,  
 Московский пр., 22, Лит. Т, БЦ «Адмиралтейский»  
 Тел./факс: +7 812 670 13 07  
 E-mail: info@gsp-project.com





**Рис. 2.** Переход со среднепузырчатой пристеночной аэрации (а) на дисковую мембранную мелкопузырчатую аэрационную систему (б)



В значительной мере потребное количество воздуха на аэрацию будет определяться типом и характеристиками используемого аэрационного оборудования. Особенности аэрационного оборудования позволяет учесть знаменатель  $k_{L\alpha}(C_s - C)$  в формуле (2), который принято называть окислительной способностью (ОС) в расчете на 1 м<sup>3</sup> воздуха (гО<sub>2</sub>/м<sup>3</sup>·ч) [4]. В зарубежной литературе ОС принято называть SOTR (standard oxygen transfer rate). Обычно мелкопузырчатые диффузоры могут существенно увеличить общую эффективность передачи воздуха в смешанную жидкость. Так, например, при переходе со среднепузырчатой пристеночной аэрации на дисковую мембранную мелкопузырчатую аэрационную систему (рис. 2) потребное количество воздуха на аэрацию сокращается в 2,5-3 раза (при этом также важна плотность установки аэрационного оборудования).

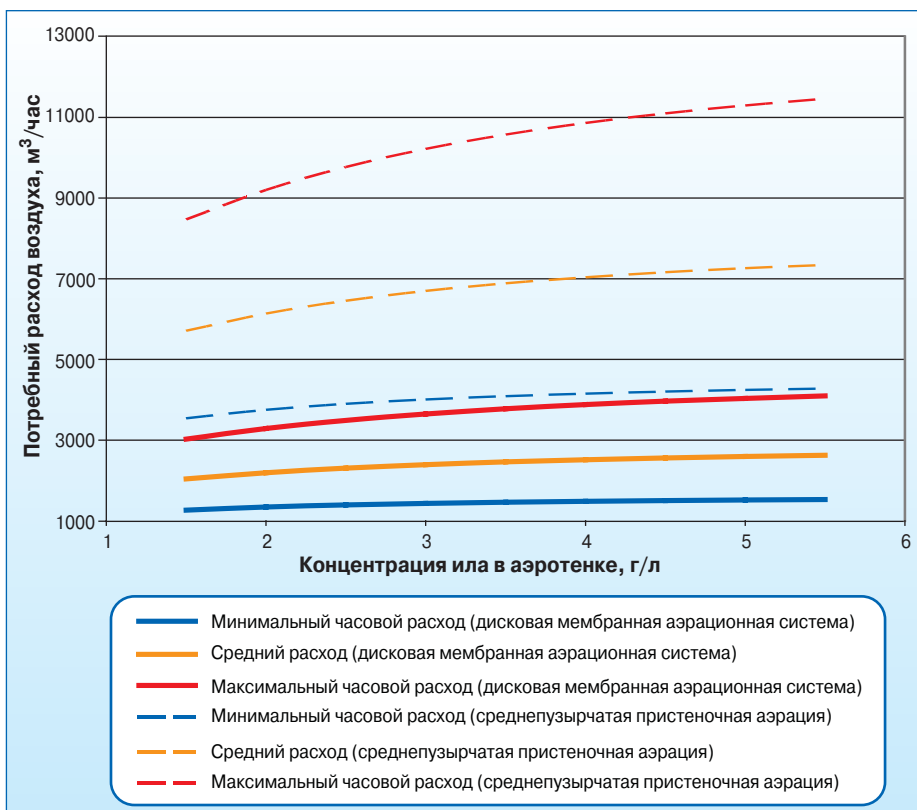
Результаты проектных расчетов потребного количества воздуха на аэрацию при переходе со среднепузырчатой пристеночной аэрации на дисковую мембранную мелкопузырчатую аэрационную систему иллюстрирует рис. 3 (производительность КОС по сточной воде - 20 000 м<sup>3</sup>/сут.). На рис. 3 приведены зависимости потребного количества аэрирующего воздуха при различных режимах биологической очистки, полученные по уравнению (10). Из рис. 3 видно, что установка современной аэрационной системы позволяет снизить максимальное потребное количество аэрирующего воздуха с 11 463 м<sup>3</sup>/час для среднепузырчатой пристеночной аэрации до 4 094 м<sup>3</sup>/час для дисковой мембранной аэрационной системы, т.е. в 2,8 раза! При этом для среднепузырчатой пристеночной аэрации изменение потребного количества воздуха на аэрацию происходит в ши-

роком диапазоне: от 3 539 м<sup>3</sup>/час до 11 463 м<sup>3</sup>/час, в то время как для дисковой мембранной мелкопузырчатой аэрационной системы диапазон изменения потребного количества воздуха на аэрацию более узкий: от 1 264 м<sup>3</sup>/час до 4 094 м<sup>3</sup>/час. Т.е. в случае использования современной аэрационной системы в 2,8 раза сокращается как потребное количество воздуха на аэрацию, так и потребный диапазон регулирования расхода. Отсюда следует важный вывод: вторым этапом на пути сокращения затрат электроэнергии на работу воздухоподводящих агрегатов и оптимизации подачи воздуха в аэротенк является модернизация аэрационной системы.

Широкий диапазон потребного расхода воздуха на аэрацию в значительной мере определяется суточными и сезонными колебаниями расхода и состава поступающих на биологическую очистку сточных вод (см. зависимости (1), (2), (10)). После установки на КОС дисковой мембранной аэрационной системы, с целью определения фактического расхода воздуха, была проведена серия специальных промышленных экспериментальных исследований, обобщенные результаты которых приведены на рис. 4. Данные промышленных экспериментальных исследований по определению фактических значений расхода аэрирующего воздуха показали, что минимальный расход воздуха составляет 1 290 м<sup>3</sup>/час, максимальный расход воздуха на аэрацию - 3 786 м<sup>3</sup>/час, т.е. промышленные исследования подтвердили высокую точность проектных расчетов (рис. 3). Из рис. 4 следует, что третьим этапом сокращения эксплуатационных расходов на аэрацию является регулировка подачи аэрирующего воздуха и использование для этой цели регулируемых воздухоподводящих агрегатов. При этом в случае автоматизации процесса подачи воздуха, например, в зависимости от концентрации растворенного кислорода в аэробных зонах аэротенка будет обеспечена максимальная энергоэффективность работы КОС.

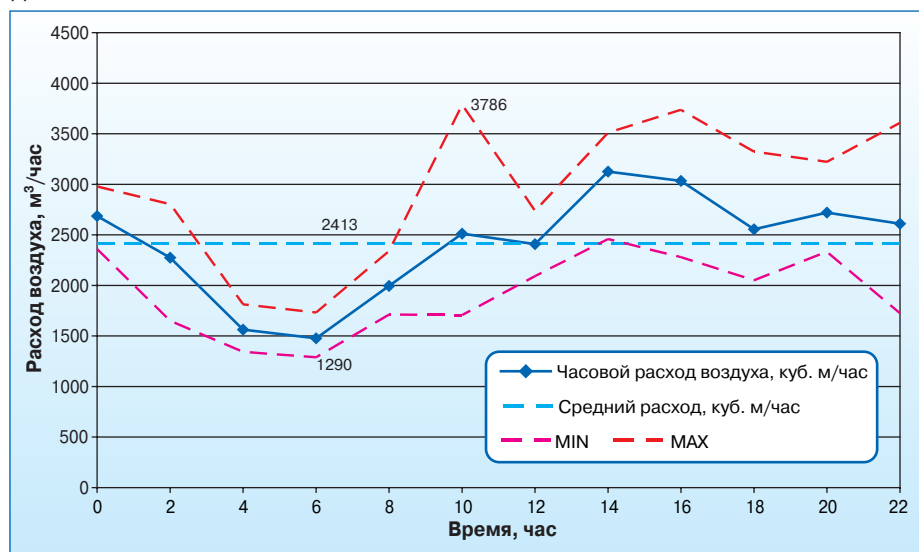
Имеющийся опыт эксплуатации воздухоподводящих агрегатов позволяет рекомендовать к использованию турбоком-

**Рис. 3.** Результаты расчета потребного количества воздуха на аэрацию





■ **Рис. 4.** Обобщенные результаты промышленных экспериментальных исследований



прессоры Sulzer ABS HST, номинальный КПД которых превышает КПД наиболее широко распространенных в России турбокомпрессоров серии ТВ, а также роторных нагнетателей. Отличительными особенностями турбокомпрессоров Sulzer ABS HST являются:

- магнитные подшипники, обеспечивающие отсутствие механического износа и минимальные потери энергии на трение;
- электродвигатель на постоянных магнитах, обладающий самым высоким на сегодня классом КПД;
- конструкция, интегрирующая компрессор, двигатель, преобразователь частоты, шкаф управления;
- массо-габаритные характеристики, что позволяет снизить расходы на строительство и реконструкции;
- низкая стоимость монтажных работ - из-за отсутствия необходимости специального фундамента, использования грузоподъемной техники;
- модульность системы, позволяющая параллельную работу группы компрессоров;
- совместимость с другими типами воздухоподводящих машин, что делает

возможным поэтапную модернизацию воздухоподводящих станций, для экономии средств.

Способность регулировать скорость нагнетания, а соответственно - подачу воздуха в систему аэрации в широком диапазоне расхода (до 50 % от номинального расхода), позволяет оптимизировать процесс аэрации в зависимости от множества показателей. Система управления частотным преобразователем способна принимать как аналоговые, так и цифровые сигналы для управления производительностью всей системы. Таким образом, применение турбокомпрессоров Sulzer ABS HST с высокоскоростными электродвигателями на магнитных подшипниках является на сегодняшний день наиболее оптимальным инженерным решением для реализации энергоэффективных технологий очистки стоков при проектировании новых и реконструкции существующих очистных сооружений.

Описанный выше подход к оптимизации подачи воздуха в аэротенк был использован на КОС МУП г. Сарпула «Сарпульский водоканал». Ана-

лиз существующего положения показал, что существующая на КОС МУП г. Сарпула технология биологической очистки не позволит обеспечить качество очистки сточных вод в пределах действующего норматива НДС. С целью обеспечения действующего норматива НДС и повышения энергоэффективности работы КОС были разработаны мероприятия по модернизации сооружений биологической очистки:

1. Разработка новой технологии биологической очистки для перевода аэротенка в режим работы по технологии нитриденитрификации.

2. Установка в зонах нитрификации современной дисковой мембранной аэрационной системы с высокой плотностью размещения аэраторов.

3. Замена четырех существующих турбокомпрессоров ТВ-175-1,6 на два высокоскоростных турбокомпрессора Sulzer ABS HST 40-400-1-Н.

Проведение оптимизации подачи воздуха на КОС МУП г. Сарпула «Сарпульский водоканал» согласно приведенным выше принципам позволяет существенно повысить энергоэффективность работы очистных сооружений. Экономический результат от внедрения новой технологии - более 15 млн. руб./год при сроке окупаемости затрат на модернизацию около 4 лет. С учетом снижения платы за сброс биогенов и сокращение затрат на ремонт и обслуживание турбокомпрессоров, реальный экономический результат будет еще выше.

#### Литература:

1. СНиП 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения. - М.: ОАО «ЦПП», 2008. - 87 с.
2. СП 32.13330.2012. Канализация. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85. - М.: Министерство регионального развития РФ, 2012. - 85 с.
3. Большаков Н.Ю. Очистка от биогенных элементов на городских очистных сооружениях. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. - 112 с.
4. Мишуков Б.Г., Соловьева Е.А. Расчет и подбор аэрационного и перемешивающего оборудования для биологической очистки сточных вод: учебное пособие / СПб. гос. архит.-строит. ун-т. - СПб., 2007. - 40 с.

## Ensuring energy efficient operation of the wastewater treatment facilities by the optimization of air supply to the aeration tank

Kim Vladimir Stanislavovich, CEO GSP-Project Ltd

(CEO@gsp-project.com, +79118298284)

Bolshakov Nikolai Iurevich, Ph.D., Associate Professor, GSP-Project Ltd

(N.Bolshakov@gsp-project.com, +79110385296)

Tatarin Viktor Nikolaevich, Head of Wastewater Treatment Facilities, «Sarapul Vodokanal» MUE, Sarapul

(sarapul\_vodokanal@mail.ru, тел. +79128781642)

The article describes the method of improving the energy efficiency of the wastewater treatment facilities operation. A new method of calculating the air flow rate for aeration is suggested. The stages of improving the efficiency of air supply to the wastewater treatment facilities are considered: the selection of biological treatment technology, aeration system upgrade, control of aerating air supply and the use of adjustable air blowers for this purpose. The described approach to the optimization of air supply to the aeration tanks was used at the wastewater treatment facilities of «Sarapul Vodokanal» MUE of Sarapul city.

**Key words:** energy efficiency; wastewater treatment facilities; aeration; air flow rate; oxygen consumption; nitrification; denitrification; endogenous respiration; aeration system; turbocompressor.