



ОПТИМИЗАЦИЯ ПОДАЧИ ВОЗДУХА В АЭРОТЕНК КАК ОСНОВА ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КОС

Ким В.С.
генеральный директор

Большаков Н.Ю.
канд. техн. наук, доцент,
ведущий специалист

ООО «Джи-Эс-Пи Проект»

В статье приведена методология повышения энергоэффективности работы канализационных очистных сооружений, предложена новая методика расчета потребного количества воздуха на аэрацию. Представлены результаты реализации мероприятий по повышению эффективности работы КОС г. Тихвин.

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

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

1. Характеристики поступающих на сооружение биологической очистки сточных вод.

2. Применяемой технологии биологической очистки и технологического режима работы сооружений биологической очистки сточных вод.

3. Типа и характеристик используемого аэрационного оборудования.

4. Правильности подбора и возможностей используемого воздухоподводящего оборудования.

5. Уровня автоматизации подачи воздуха в аэротенк.

На практике реализация мероприятий по оптимизации процесса подачи воздуха в аэротенк начинается с проведения технологических расчетов с целью определения потребного коли-

чества воздуха на аэрацию. Для этого необходимо иметь надежную методику расчета, позволяющую определять потребное 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 аэрацию Q_a (м³/час) можно рассчитать по методике, приведенной в [1]:

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

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

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

где $Q_{\text{воды}}$ – расчетный расход сточной воды для аэротенков, м³/час; q_{air} – удельный расход воздуха на 1 м³ очищаемой воды, м³/м³; ΔO_2 – общее потребление молекулярного кислорода в аэротенке, мг/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, мг/л; q_o – удельный расход кислорода воздуха,

мг на мг снятой БПК_п; S_{en} – БПК_п поступающей в аэротенк сточной воды, мг/л; S_{ex} – БПК_п очищенной воды, мг/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 нитратов. Методика [1] не учитывает возможность работы аэротенка в различных технологических режимах. Для преодоления указанных трудностей нами предложен новый подход для расчета величины общего потребления молекулярно кислорода в аэротенке. Краткое описание новой методики расчета и её основные расчетные зависимости приведены ниже.

Общее потребление молекулярного кислорода в аэротенке (ΔO_2 , мг/л) можно представить в виде двух слагаемых: потребление кислорода на биоокисление органических веществ (ΔO_{2OB} , мг/л) и потребление кислорода на биоокисление аммонийного азота до нитратного азота в ходе нитрификации (ΔO_{2H} , мг/л). Соответственно, можно записать:

$$\Delta O_2 = \Delta O_{2OB} + \Delta O_{2H}. \quad (4)$$

Величина ΔO_{2OB} складывается из трех составляющих:

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

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

3. Экономия молекулярного кислорода за счет использования нитратов на биоокисление части органических веществ в ходе денитрификации (ΔO_{2D} , мг/л).

Следовательно, справедливо выражение:

$$\Delta O_2 = \Delta O_{2L} + \Delta O_{2энд} + \Delta O_{2H} - \Delta O_{2D}. \quad (5)$$

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

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

$$\Delta O_{2энд} = \frac{Ab\tau_x}{1 + b\tau_x} [y_0 L_{en} + B_{ex} (1 - f_B)]; \quad (7)$$

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

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

где z_0 – истинный энергетический коэффициент, кгO₂/кгБПК; L_{en} , L_{ex} – БПК_п фильтрованной пробы сточной воды на входе и выходе аэротенка соответственно, мг/л; A – кислородный эквивалент самоокисляющейся биомассы, кгO₂/кг беззольной массы активного ила; b – константа скорости самоокисления биомассы, сут.⁻¹; τ_x – возраст активного ила, сут.; y_0 – истинный экономический коэффициент, кг/кгХПК; B_{en} – концентрация взвешенных веществ в сточной воде на входе аэротенка, мг/л; f_B – небиodeградируемая часть в исходных взвешенных веществах; $\Delta N_H = N_{en} + \Delta N_{ox} - N_{ex}^a$; $\Delta n_D = \Delta N_H + n_{en} - n_{ex}^a$; ΔN_H – количество нитрифицированного азота, т.е. количество аммонийного азота окисленного до азота нитратного в ходе нитрификации, мг/Нл; 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), мг/Нл; ΔN_{ox} – вторичное загрязнение воды аммонийным азотом в ходе биодеструкции взвешенных веществ сточной воды и биомассы активного ила, мг/Нл; N_{ex}^a – концентрация аммонийного азота на выходе аэротенка, мг/Нл; n_{en} , n_{ex}^a – концентрации нитратного азота на входе и выходе аэротенка соответственно.

Подставив соотношения (6)-(9) в формулу (5), получим выражение для ΔO_2 :

$$\begin{aligned} \Delta O_2 = & z_{0БПК} (L_{en} - L_{ex}) + \\ & + \frac{Ab\tau_x}{1 + b\tau_x} [y_0 L_{en} + B_{en} (1 - f_B)] + \\ & + 4,57 \Delta N_H - 2,86 \Delta n_D. \end{aligned} \quad (10)$$

Выражение (10) описывает потребление кислорода по всем составляющим.

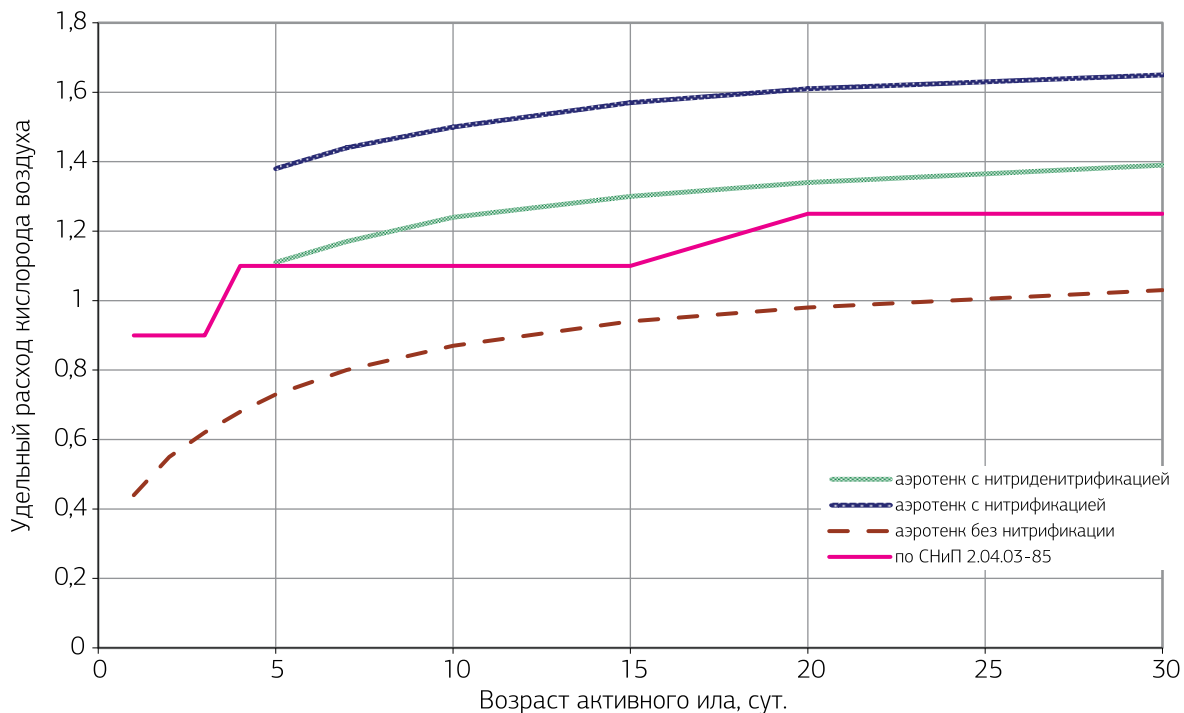
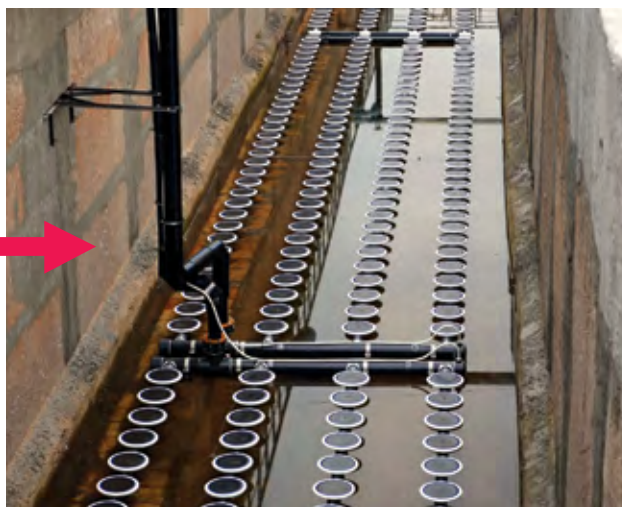


Рисунок 1

Зависимость удельного расхода кислорода воздуха от возраста активного ила.



А



Б

Рисунок 2

Переход со среднепузырчатой пристеночной аэрации (А) на дисковую мембранную мелкопузырчатую аэрационную систему (Б).

Основным параметром, определяющим режим биологической очистки и, соответственно, его эффективность, в методике принят возраст активного ила. Математическое описание возраста и прироста активного ила разработано на основе известных интегральных моделей, которые были модифицированы [3]. В результате для расчета прироста и возраста активного ила получена система уравнений (11):

$$\begin{cases} \tau_x = \frac{\tau X}{\Delta X} \\ \Delta X = \frac{0,45L_{en}(1+0,2b_T\tau_x) + B_{en}(1+0,5b_T\tau_x)}{1+b_T\tau_x}, \end{cases} \quad (11)$$

где τ – время пребывания сточной воды в аэротенке, сут.; ΔX – прирост активного ила, мг/л; X – средняя по объему концентрация ила в аэротенке, мг/л.

Данная система уравнений была неоднократно апробирована на сооружениях биологической очистки сточных вод и, в отличие от методики расчета прироста ила [1], учитывает влияние на прирост температуры сточных вод, имеющуюся взаимосвязь между приростом и возрастом ила.

По уравнениям новой методики расчета и [1] построим зависимость $q_0 = f(\tau_x)$ для Центральной станции аэрации г. Санкт-Петербурга (проектная производительность КОС по сточной воде – 1,5 млн. м³/сутки), 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 рисунке 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 суток $q_0 = 0,9$ м³/м³; при возрасте активного ила от 3 до 20÷25 суток $q_0 = 1,1$ м³/м³; для систем с продленной аэрацией $q_0 = 1,25$ м³/м³. Из рисунка 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.*

В значительной мере потребное количество воздуха на аэрацию будет определяться типом и характеристиками используемого аэрационного оборудования. Обычно применение мелкопузырчатых диффузоров позволяет существенно увеличить общую эффективность передачи воздуха в смешанную жидкость. Особенности аэрационного оборудования позволяет учесть знаменатель в формуле (2), который принято называть окислительной способностью (ОС) в расчете на 1 м³ воздуха ($гО_2/м^3 \cdot ч$) [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÷3,0 раза (при этом также важна плотность установки аэрационного оборудования).

Результаты расчетов потребного количества воздуха на аэрацию для КОС г. Тихвин при переходе со среднепузырчатой пристеночной аэрации на дисковую мембранную мелкопузырчатую аэрационную систему иллюстрирует рисунок 3

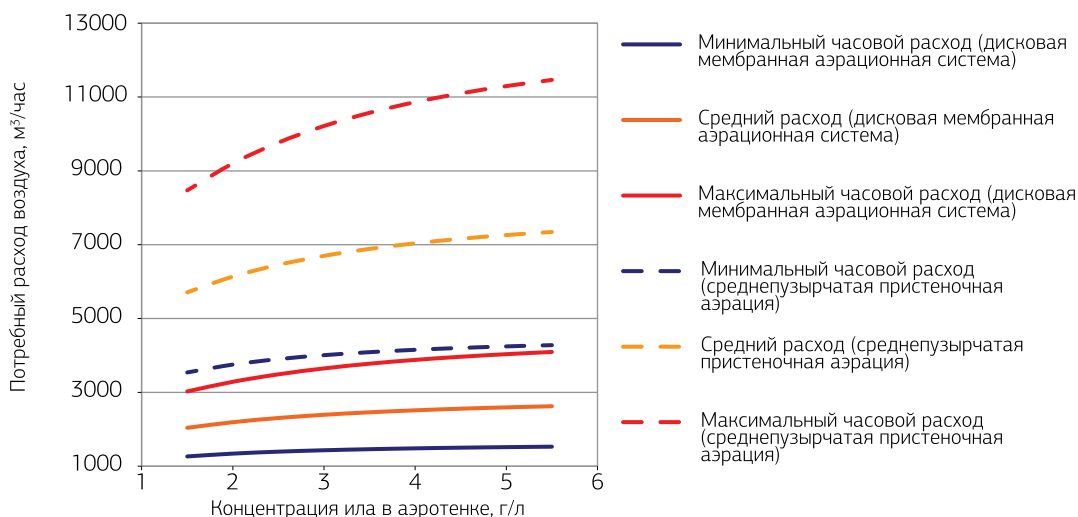


Рисунок 3

Результаты расчета потребного количества воздуха на аэрацию.

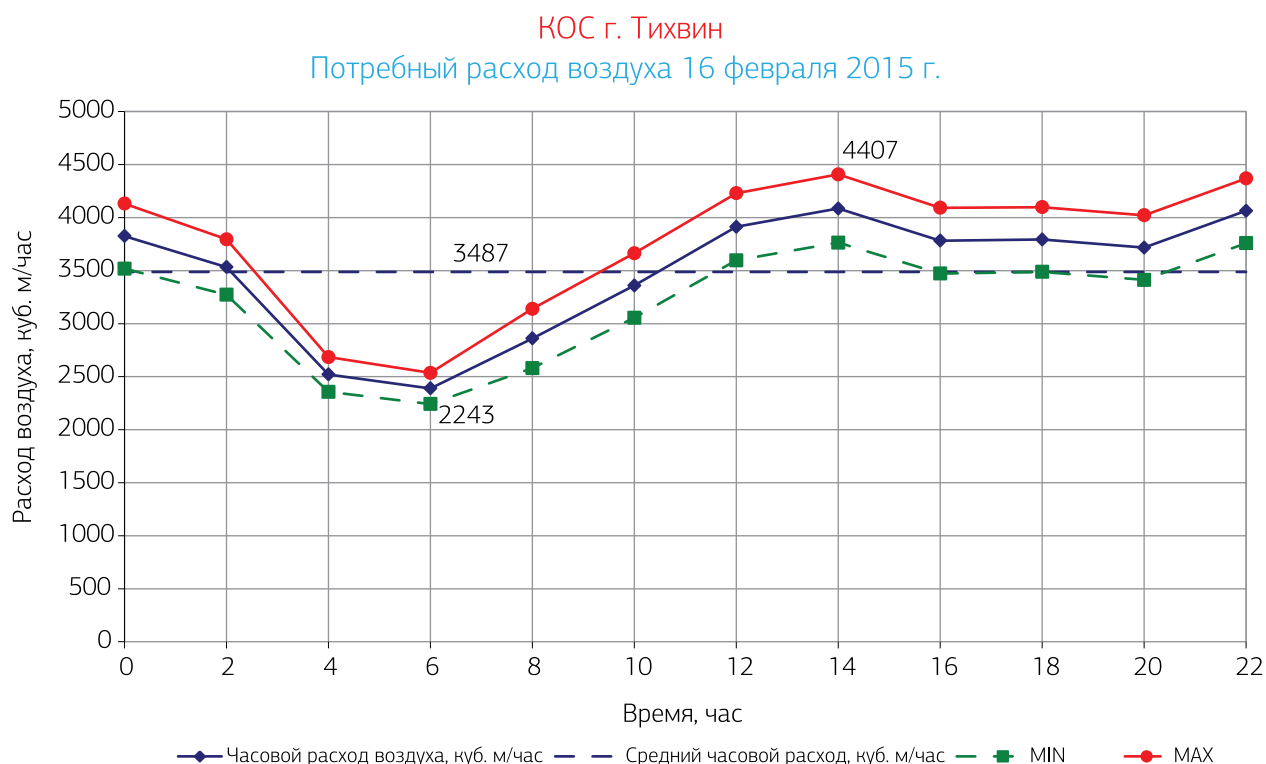


Рисунок 4

Результаты определения потребного расхода воздуха 16 февраля 2015 г.

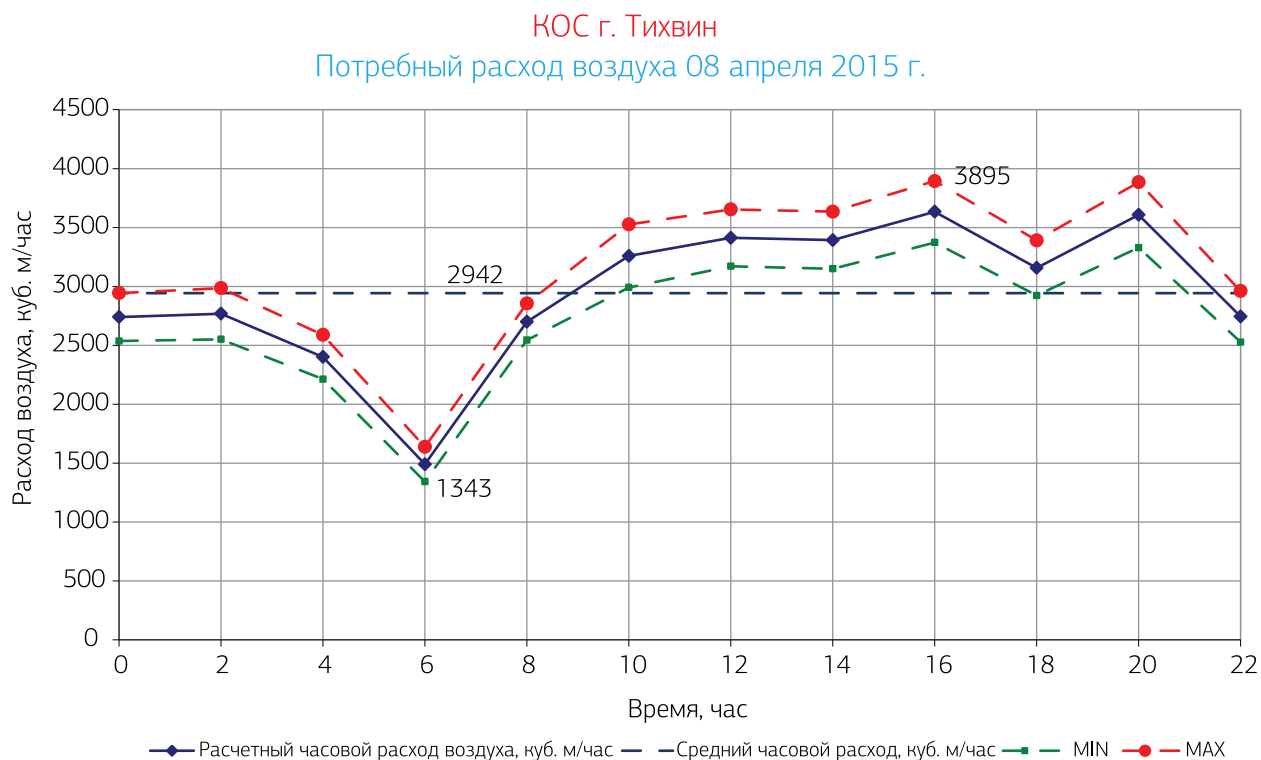


Рисунок 5

Результаты определения потребного расхода воздуха 8 апреля 2015 г.

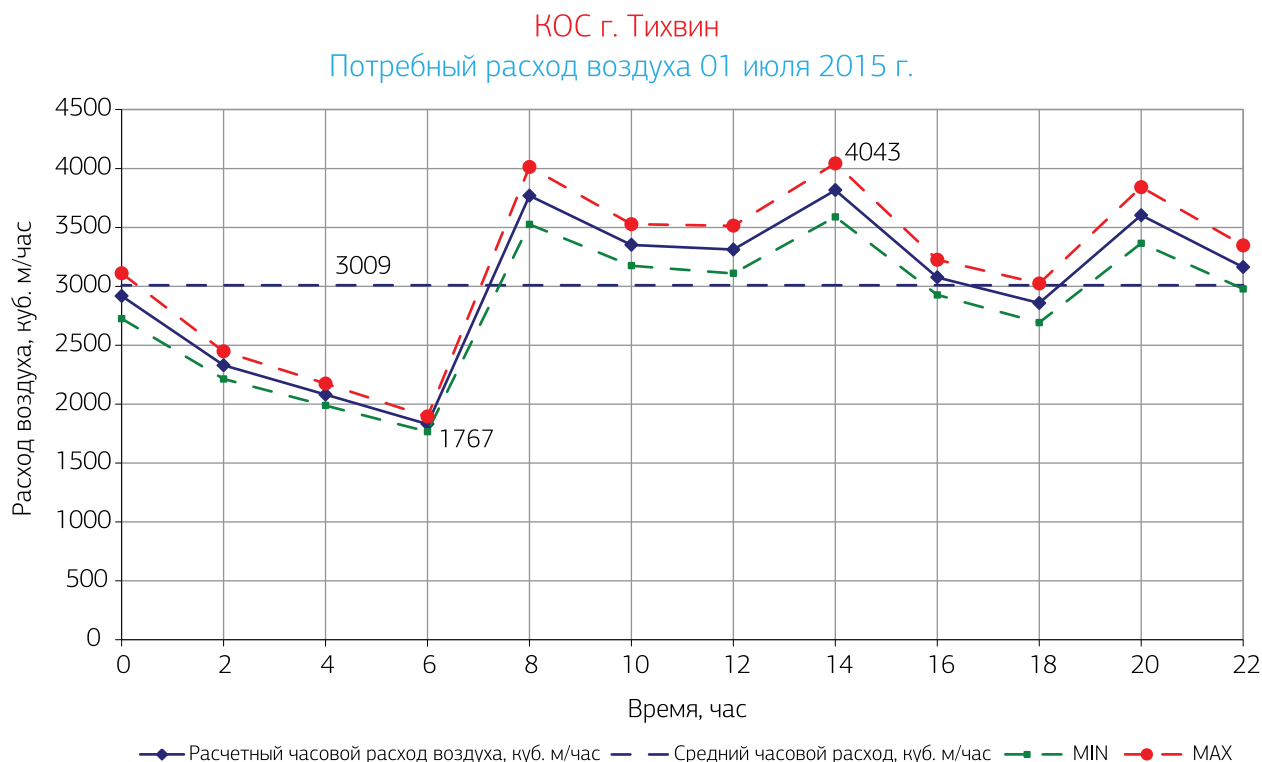


Рисунок 6

Результаты определения потребного расхода воздуха 1 июля 2015 г.

(производительность КОС по сточной воде – 20 000 м³/сут.). На рисунке 3 приведены зависимости потребного количества аэрирующего воздуха при различных режимах биологической очистки, полученные по уравнению (10). Из рисунка 3 видно, что установка современной аэрационной системы позволяет снизить максимальное потребное количество аэрирующего воздуха с 11 463 м³/час для среднепузырчатой пристеночной аэрации до 4 094 м³/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 широком диапазоне: от 3 539 м³/час до 11 463 м³/час, в то время как для дисковой мембранной мелкопузырчатой аэрационной системы диапазон изменения потребного количества воздуха на аэрацию более узкий: от 1 264 м³/час до 4 094 м³/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 воздухоу-*

ных 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 (зависимости (1), (2), (10)). С целью уточнения потребного расхода воздуха на КОС г. Тихвин была проведена серия специальных промышленных экспериментальных исследований, обобщенные результаты которых приведены на рисунках 4-6. Данные промышленных экспериментальных исследований по определению фактических значений расхода аэрирующего воздуха показали, что минимальный потребный расход воздуха составляет 1 343 м³/час, максимальный расход воздуха на аэрацию – 4 407 м³/час, т.е. промышленные исследования подтвердили высокую точность предварительных расчетов. Из полученных экспериментальных данных следует, что *третьим этапом оптимизации подачи воздуха в аэротенк является установка современных регулируемых воздухоу- дувных агрегатов и реализация АСУТП подачи воздуха в аэротенк.*

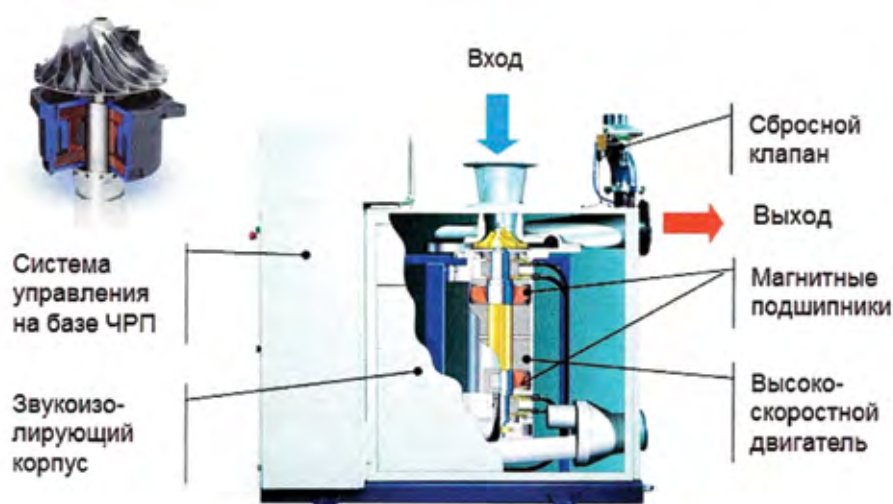


Рисунок 7

Устройство турбокомпрессора Sulzer ABS HST.

Имеющийся опыт эксплуатации воздуходувателей позволяет рекомендовать к использованию турбокомпрессоры Sulzer ABS HST (рис. 7), номинальный КПД которых превышает КПД наиболее широко распространенных в России турбокомпрессоров серии TB, а также роторных нагнетателей. Отличительными особенностями турбокомпрессоров Sulzer ABS HST являются:

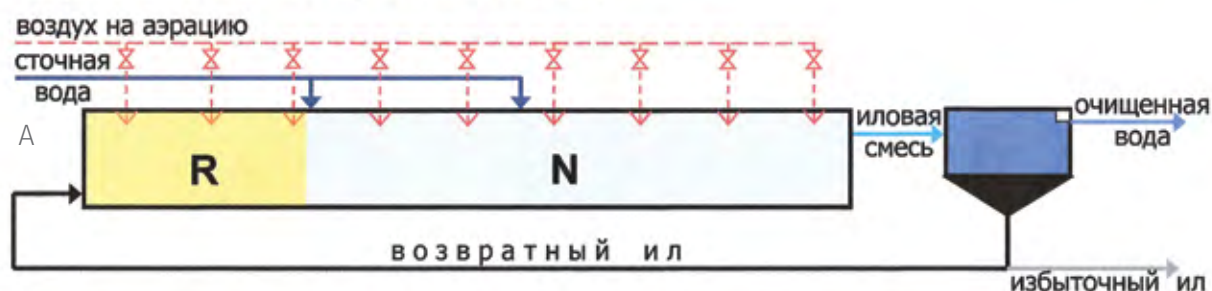
- магнитные подшипники, обеспечивающие отсутствие механического износа и минимальные потери энергии на трение;
- электродвигатель на постоянных магнитах, обладающий самым высоким на сегодня, классом КПД;
- конструкция, интегрирующая компрессор, двигатель, преобразователь частоты, шкаф управления;
- массо-габаритные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

Способность регулировать скорость нагнетания, а соответственно – подачу воздуха в систему аэрации в широком диапазоне расхода

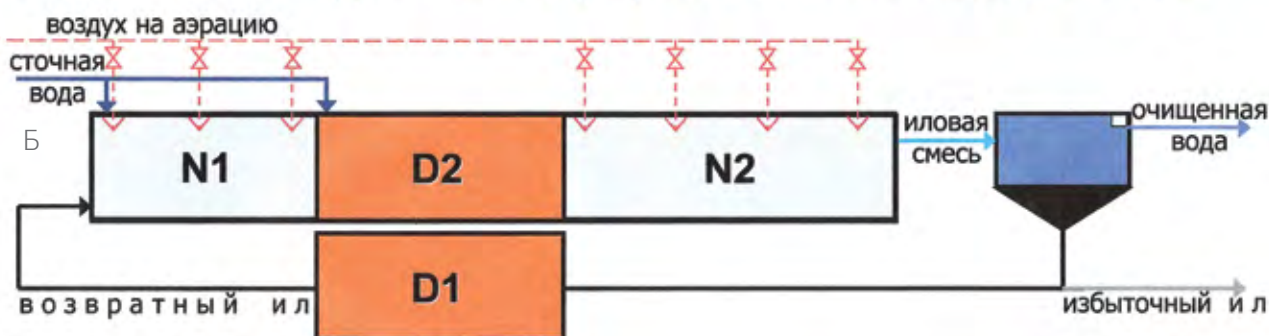
(до 50% от номинального расхода), позволяет оптимизировать процесс аэрации в зависимости от множества показателей. Система управления частотным преобразователем способна принимать как аналоговые, так и цифровые сигналы для управления производительностью всей системы. *Таким образом, применение турбокомпрессоров Sulzer ABS HST с высокоскоростными электродвигателями на магнитных подшипниках является на сегодняшний день 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 при модернизации сооружений биологической очистки КОС г. Тихвин. На КОС г. Тихвин проектом была предусмотрена типовая схема очистки сточных вод: механическая очистка на решетках, песколовках и первичных отстойниках и биологическая очистка в системе аэротенк – вторичный отстойник. Технология очистки сточных вод в аэротенке – традиционная биологическая очистка от органических веществ с нитрификацией (рис. 8, а). В состав аэротенка КОС г. Тихвин входят три четырехкоридорных секции. Установленная для КОС г. Тихвин допустимая концентрация на сброс загрязняющих веществ по нормативу НДС составляет: аммонийный азот – 0,4 мг/л, азот нитратов – 9,1 мг/л, азот нитритов – 0,05 мг/л. При работе аэротенка по технологии традиционной аэробной биологической очистки с нитрификацией наблюдалось превышение норматива на сброс соединений азота.

ТЕХНОЛОГИЯ АЭРОБНОЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ОТ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ С РЕГЕНЕРАЦИЕЙ АКТИВНОГО



ТЕХНОЛОГИЯ НИТРИДЕНИТРИФИКАЦИИ, РЕАЛИЗОВАННАЯ НА КОС Г. ТИХВИН



Условные обозначения: R – регенератор (аэробные условия);

N – зона нитрификации (аэробные условия);

D – зона денитрификации (аноксидные условия).

Рисунок 8

Технология биологической очистки на КОС г. Тихвин.

Технология нитриденитрификации в системе аэротенк – вторичный отстойник, реализованная при модернизации КОС г. Тихвин приведена на рисунке 8, б. В ходе модернизации сооружений биологической очистки в аэробных зонах аэротенка была произведена замена аэрационного оборудования. К применяемому аэрационному оборудованию предъявлялись следующие требования:

- большая эффективность использования кислорода аэрирующего воздуха;
- широкая аэрируемая полоса;
- аэрационные элементы новой аэрационной системы не должны относиться к типу незащищенных.

После рассмотрения различных вариантов аэрационной системой, полностью удовлетворяющей перечисленным выше требованиям была признана система дисковой аэрации

«ABS Noron». Данная аэрационная система была установлена в аэротенке КОС г. Тихвин в октябре 2014 г. Сравнение интенсивности аэрации до и после установки новой аэрационной системы в секции аэротенка КОС г. Тихвин показано на рисунке 9. Результаты контроля работы секции аэротенка подтвердили правильность реализованных решений: при работе на воздухоудвке ТВ-175-1,6 концентрация растворенного кислорода в аэробных зонах аэротенка существенно увеличилась (до 6 мг/л), что позволило не только обеспечить требуемую эффективность очистки по всем соединениям азота и улучшить седиментационные свойства активного ила, но и повысить энергоэффективность работы КОС – перейти на воздухоудвку меньшей производительности.

При работе аэротенка в режиме нитриденитрификации сброс соединений азота оказался существенно ниже установленного норматива.



Рисунок 9

Интенсивность аэрации до и после установки новой аэрационной системы.

Очистка от азота на КОС г. Тихвин до и после перехода на технологию нитриденитрификации

Таблица 1

Применяемая технология	Концентрация в очищенной воде (выход очистных сооружений г. Тихвин), мг/л					
	$N-NH_4^+$	$N-NO_2^-$	$N-NO_3^-$	Азот неорганический	Азот органический	Общий азот
Традиционная технология	0,96	0,21	16,9	18,1	0,78	18,9
Технология нитриденитрификации	0,18	0,05	5,9	6,13	0,75	6,9

Достигнутые после перевода азротенка КОС г. Тихвин в режим нитриденитрификации результаты приведены в таблице 1.

До перехода на технологию нитриденитрификации и замены аэрационной системы использовался турбокомпрессор ТВ-175-1,6 (потребляемая мощность 250 кВт/час), после модернизации сооружений стало возможным использование одной воздушовулки ТВ-80-1,6 (потребляемая мощность 132 кВт/час). При ставке платы за потребляемую электроэнергию 3 руб. 33 коп. за кВт, экономический результат для МП «Водоканал

г. Тихвин» составил 3 442 154 руб./год. В случае установки нового регулируемого турбокомпрессора Sulzer ABS HST 20-4500-1-125-40, мощность которого при максимальном расходе воздуха 5200 м³/час – 96 кВт, при минимальном расходе воздуха 2400 м³/час – всего 46 кВт, становится возможным получение дополнительного экономического результата: экономия платы за потребляемую электроэнергию составит 2 409 548 руб./год при сроке окупаемости затрат на приобретение нового турбокомпрессора 3,6 года. С учетом снижения платы за сброс биогенных элементов, реальный экономический результат оказывается 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.