



В. С. Ним
генеральный директор
ООО GSP-Project

Н. Ю. БОЛЬШАКОВ
к. т. н., доцент,
ведущий специалист
ООО GSP-Project

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОДАЧИ ВОЗДУХА В АЭРОТЕНК КАК ОСНОВА ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КОС

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. Характеристики поступающих на сооружения биологической очистки сточных вод.
2. Применяемой технологии 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. Типа и характеристик используемого аэрационного оборудования (с учетом схемы размещения аэраторов в аэротенке).
4. Правильности подбора и возможностей используемого воздухоподувающего 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 необходимого на аэрацию количества воздуха. Для этого необходимо иметь надежную методику расчета, позволяющую определять необходимое на аэрацию количество воздуха 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_v ($\text{м}^3/\text{ч}$) можно рассчитать по методике, приведенной в [1]:

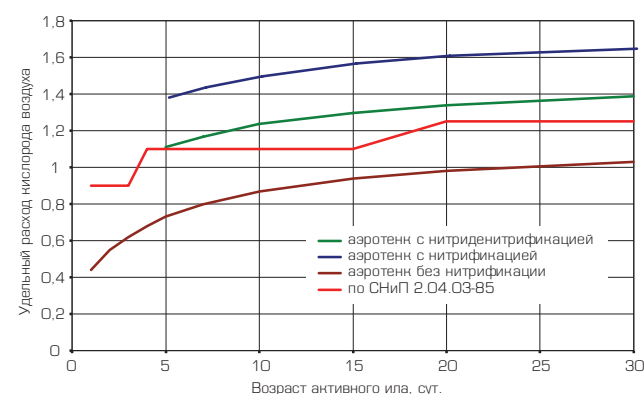
$$Q_v = Q_{\text{воды}} \times q_{\text{air}} \quad (1)$$

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

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

где $Q_{\text{воды}}$ — расчетный расход сточной воды для аэротенков, $\text{м}^3/\text{ч}$;
 q_{air} — удельный расход воздуха на 1 м^3 очищаемой воды, $\text{м}^3/\text{м}^3$;

РИС. 1



ЗАВИСИМОСТЬ УДЕЛЬНОГО РАСХОДА КИСЛОРОДА ВОЗДУХА ОТ ВОЗРАСТА АКТИВНОГО ИЛА

ΔO_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, мг на мг снятой БПК_н;

S_{en} — БПК_н поступающей в аэротенк сточной воды, $\text{мг}/\text{л}$;

S_{ex} — БПК_н 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 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 молекулярного кислорода в аэротенке. Краткое описание новой методики расчета и ее основные расчетные зависимости приведены ниже.

Общее потребление молекулярного кислорода в аэротенке (ΔO_2 , $\text{мг}/\text{л}$) можно представить в виде двух слагаемых: потребление кислорода на биоокисление

органических веществ ($\Delta O_{2об}$, мг/л) и потребление кислорода на биоокисление аммонийного азота до нитратного азота в ходе нитрификации ($\Delta O_{2н}$, мг/л). Соответственно, можно записать:

$$\Delta O_2 = \Delta O_{2об} + \Delta O_{2н} \quad (4)$$

Величина $\Delta O_{2н}$ складывается из трех составляющих.

1. Потребление кислорода (включая кислород нитратов) на биоокисление растворенных органических веществ ($\Delta O_{2л}$, 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 ($\Delta O_{2д}$, мг/л). Следовательно, справедливо выражение:

$$\Delta O_2 = \Delta O_{2л} + \Delta O_{2энд} + \Delta O_{2н} - \Delta O_{2д} \quad (5)$$

Величины $\Delta O_{2л}$, $\Delta O_{2энд}$, $\Delta O_{2н}$ и $\Delta O_{2д}$ задаются уравнениями [3]:

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

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

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

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

где z_0 — истинный энергетический коэффициент, кг O_2 /кг БПК;
 L_{en} , L_{ex} — БПК_n фильтрованной пробы сточной воды на входе и выходе аэротенка соответственно, мг/л;
 A — кислородный эквивалент самоокисляющейся биомассы, кг O_2 /кг беззольной массы активного ила;
 b — константа скорости самоокисления биомассы, сут⁻¹;
 τ_x — возраст активного ила, сут;
 y_0 — истинный экономический коэффициент, кг/кг ХПК;
 B_{ex} — концентрация взвешенных веществ в сточной воде на входе аэротенка, мг/л;
 f_B — небиодegradируемая 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, 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), мг N/л;
 ΔN_{ox} — вторичное загрязнение воды аммонийным азотом в ходе биодеструкции взвешенных



ПЕРЕХОД СО СРЕДНЕПУЗЫРЧАТОЙ ПРИСТЕНОЧНОЙ АЭРАЦИИ НА ДИСКОВУЮ МЕМБРАННУЮ МЕЛКОПУЗЫРЧАТУЮ АЭРАЦИОННУЮ СИСТЕМУ С ШИРОКОЙ АЭРИРУЕМОЙ ПОЛОСКОЙ

веществ сточной воды и биомассы активного ила, мг N/л;
 N_{ex}^a — концентрация аммонийного азота на выходе аэротенка, мг N/л;
 n_{en} , n_{ex}^a — концентрации нитратного азота на входе и выходе аэротенка соответственно.

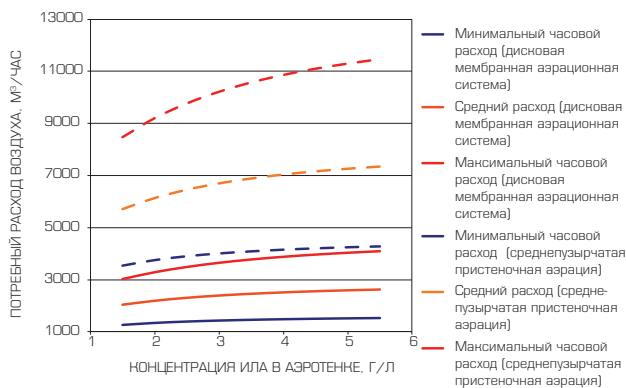
Подставив соотношения (6)–(9) в формулу (5), получим выражение для ΔO_2 :

$$\Delta O_2 = z_{0БПК}(L_{ex} - L_{вых}) + \frac{Ab\tau_x}{1 + b\tau_x} \quad (10)$$

$$[y_0L_{ex} + B_{ex}(1 - f_B)] + 4,57 \Delta N_H - 2,86 \Delta n_D$$

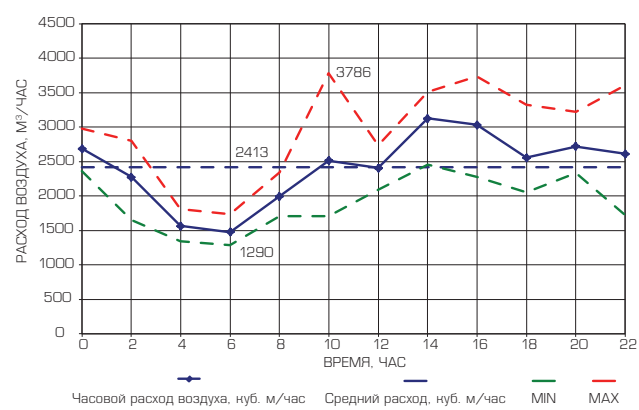
Выражение (10) описывает потребление кислорода по всем составляющим.

РИС. 4



РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ПОТРЕБНОГО КОЛИЧЕСТВА ВОЗДУХА НА АЭРАЦИЮ

РИС. 5



ОБОБЩЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

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 м³/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 рисунке 1. Сравним полученную зависимость с величиной q_0 , приведенной в [1]. В [1] рекомендуется принимать следующие значения удельного расхода кислорода воздуха:

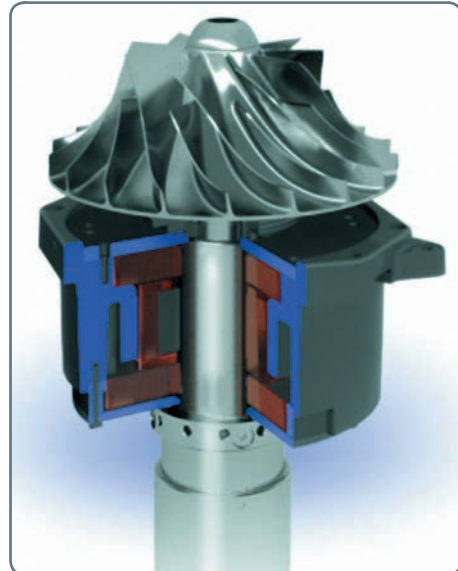
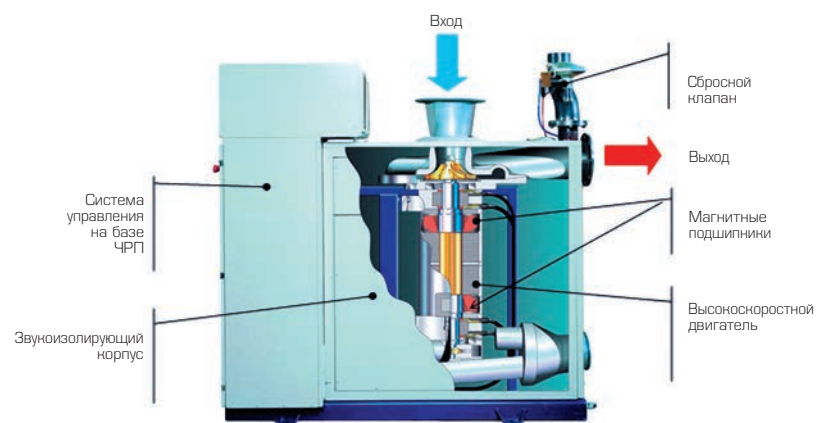
- при возрасте активного ила меньше 3 сут. $q_0=0,9 \text{ м}^3/\text{м}^3$;
- при возрасте активного ила от 3 до 20 ÷ 25 сут. $q_0 = 1,1 \text{ м}^3/\text{м}^3$;
- для систем с продленной аэрацией $q_0 = 1,25 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

Из 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, *реальная возможность повышения энергоэффективности работы КОС появляется на этапе выбора технологии биологической очистки.*

В значительной мере потребное количество воздуха на аэрацию будет определяться типом и характеристиками используемого аэрационного оборудования. Особенности аэрационного оборудования позволяет учесть знаменатель $k_1k_2k_3k_T (c_a - c_0)$ в формуле (2), который принято называть окислительной способностью (ОС) в расчете на 1 м³ воздуха (г О₂/м³·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 проектных расчетов потребного количества воздуха на аэрацию при переходе

РИС. 3



УСТРОЙСТВО ТУРБОКОМПРЕССОРА SULZER ABS HST



со среднепузырчатой пристеночной аэрации на дисковую мембранную мелкопузырчатую аэрационную систему иллюстрирует рис. 3 (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/ч для среднепузырчатой пристеночной аэрации до 4 094 м³/ч 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 3539 м³/ч до 11 463 м³/ч, в то время как для дисковой мембранной мелкопузырчатой аэрационной системы диапазон изменения потребного количества воздуха на аэрацию более узкий: от 1264 м³/ч до 4094 м³/ч. 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: *замена аэрационной системы является важнейшим этапом на пути сокращения затрат электроэнергии на работу воздуходувных агрегатов и оптимизации подачи воздуха в аэротенк.*

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 рисунке 4. Данные промышленных экспериментальных исследований по определению фактических значений расхода аэрирующего воздуха показали, что минимальный расход воздуха составляет 1290 м³/ч, максимальный расход воздуха на аэрацию — 3786 м³/ч, т. е. промышленные исследования подтвердили высокую точность проектных расчетов (рис. 3). Из рисунка 4 также следует вывод о существовании реальной возможности значительно снизить эксплуатационные расходы на аэрацию за счет регулировки подачи аэрирующего воздуха и использования регулируемых воздуходувных агрегатов.

Имеющийся опыт эксплуатации воздухонагнетателей позволяет рекомендовать к использованию турбокомпрессоры *Sulzer ABS HST* (см. рис. 5), номинальный КПД которых (72 ÷ 80 %) превышает КПД наиболее широко распространенных в России многоступенчатых центробежных компрессоров (50 ÷ 76 %), а также роторных нагнетателей (45 ÷ 60 %). 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;
- массогабаритные характеристики, что позволяет снизить расходы на строительство и реконструкции;

- [1] СНиП 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения. — М.: ОАО «ЦПП», 2008.
- [2] СП 32.13330.2012. Канализация. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85. — М.: Министерство регионального развития РФ, 2012.
- [3] Большаков Н. Ю. Очистка от биогенных элементов на городских очистных сооружениях. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010.
- [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.

- 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 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. Саранпула «Саранпульский водоканал». Анализ существующего положения показал, что существующая на КОС МУП г. Саранпула технология биологической очистки не позволяет 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:

- разработка новой технологии биологической очистки для перевода аэротенка в режим работы по технологии нитриденитрификации;
- установка в зонах нитрификации современной дисковой мембранной аэрационной системы с высокой плотностью размещения аэраторов;
- 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. Саранпула «Саранпульский водоканал» позволяет существенно повысить энергоэффективность работы очистных сооружений. Экономический результат от реализации 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. ●