

## Динамическая модель OxiD сооружений биологической очистки сточных вод

Большинство используемых сегодня в мировой практике моделей для расчета канализационных очистных сооружений представляют собой статические модели. В их основе лежат дифференциальные уравнения, описывающие процессы, происходящие в реакторах полного смешения или вытеснения. Уравнения при этом решаются традиционными методами дифференциальных исчислений [1; 2]. Статические модели охватывают широкий круг вопросов, однако не позволяют оценить реакцию сооружений на нестационарность поступающей нагрузки и, как следствие, определить конструктивные и технологические решения, позволяющие минимизировать проскоки качественных показателей очищенной воды в условиях реальных колебаний входных загрязнений.

Опыт работы сооружений биологического удаления азота и фосфора показывает, что основная проблема их эксплуатации состоит в обеспечении стабильности требуемого эффекта очистки при значительных колебаниях поступающей нагрузки. Задачи, связанные с колебаниями поступающих за-

грязнений, могут быть решены только с помощью динамических моделей, позволяющих количественно оценить реакцию сооружений на любой вид нестационарности входных потоков. Динамическое моделирование позволяет также рассчитать конструктивные и технологические параметры сооружений, которые обеспечат заданные качество и стабильность очищенных вод при реальной динамике входных загрязнений.

Разработанная автором динамическая модель OxiD сооружений биологической очистки сточных вод моделирует процессы нитрификации, денитрификации, биологического удаления фосфора и окисления органических соединений. Модель работает с произвольным количеством ячеек идеального смешения, представляющих собой произвольный набор анаэробных, аноксидных и аэробных зон, соединенных последовательно в любой комбинации с произвольным набором рециклов [3; 4].

Модель OxiD предназначена для определения динамики концентраций загрязнений в различных технологических зо-

нах аэротенка, а также на выходе из сооружения по заданной динамике входных параметров качественного состава сточных вод, их расхода, кинетическим константам активного ила, технологическим и конструктивным характеристикам рассматриваемых сооружений. Модель решает и обратную задачу – рассчитывает оптимальное количество ячеек, объемы аэробных, аноксидных и анаэробных зон, кислородный режим аэротенка, значения рециклов, а также производит подбор оптимальной конфигурации технологической схемы при известной динамике качественного состава сточных вод по требуемому качеству и стабильности очистки.

Модель OxiD состоит из нескольких расчетных блоков. Первый блок модели позволяет количественно оценить динамику колебаний концентраций  $N-NH_4$ ,  $P-PO_4$ , взвешенных веществ, значений ХПК и БПК<sub>полн</sub> (или БПК<sub>5</sub>) и в итоге определить диапазон частот, которые преобладают в спектре входных колебаний качественного состава рассматриваемых сточных вод, поступающих в рассматриваемые сооружения.

\* *Мойжес Оксана Викторовна, кандидат технических наук, руководитель Инженерно-технологического центра по проблемам канализации, МГУП «Мосводоканал»  
105005, Москва, Плетешковский пер., 2, тел.: (495) 263-93-50, e-mail: oksamos1@list.ru*

В модели используется математический аппарат случайных величин, с помощью которого определяются: корреляционная функция  $R(\tau)$ , математическое ожидание  $M(S)$ , дисперсия  $D(S)$ , среднее квадратичное отклонение  $\sigma(S)$  и спектральная плотность  $\Phi_s(\omega)$  рассматриваемого ряда значений концентраций загрязнений как поступающих на очистку, так и очищенных вод [5].

Спектральная плотность несет в себе информацию о распределении общей энергии входных колебаний по частотам, указывает частоты, которые преобладают, и частоты, которые практически не встречаются в спектре входного возмущения. Для обеспечения стабильного качества очистки сооружение рассчитывается в модели так, чтобы оно могло гасить поступающие колебания загрязнений в диапазоне преобладающих частот. Происходит это таким образом, чтобы сумма закладываемых в расчет максимальных проскоков и средних значений качественных характеристик очищенной воды не превышала заложенные в проекте значения качества очищенных сточных вод. Таким образом, рассчитывается сооружение, которое не допускает превышения качественных показателей очищенных вод над заданными проектом параметрами в реальных условиях колебания поступающих загрязнений при соблюдении заложенного в расчет технологического режима работы аэротенка.

В основу второго блока модели OxiD положена теория передаточных функций. Модель позволяет описывать работу аэротенков любого гидродинамического профиля, характеризующегося соответствующим количеством последовательно

соединенных ячеек идеального смешения, с учетом внешних и внутренних рециклов.

Для каждой ячейки идеального смешения, исходя из уравнения материального баланса, составляется дифференциальное уравнение, описывающее рассматриваемый биохимический процесс:

$$1/T_h (S_0 - S_i) - \rho(S)X = dS/dt, \quad (1)$$

где  $S_0$  – концентрация рассматриваемого вещества на входе в ячейку, мг/л;  $S_i$  – то же, на выходе из ячейки, мг/л;  $T_h$  – время нахождения сточной воды в ячейке, ч;  $X$  – доза активного ила, г/л;  $\rho(S)$  – скорость описываемого биохимического процесса, мг/(г·ч).

Уравнение (1) описывает работу ячейки идеального смешения с учетом как внешних воздействий (правая часть уравнения  $dS/dt$ ), так и процессов, происходящих внутри объекта (левая часть уравнения).

Для описания биохимических процессов в OxiD используется модель ASM-2, в которой скорость реакций описывается дробно-линейными функциями:

$$\rho(S) = \rho_{\max} S / (K_S + S) F, \quad (2)$$

где  $\rho_{\max}$  – максимальная скорость процесса, мг/(г·ч);  $K_S$  – константа насыщения под рассматриваемое загрязнение  $S$ , мг/л;  $F$  – множитель, описывающий влияние различных технологических условий организации процессов.

Для однозначного описания динамической связи между выходными и входными величинами используют передаточную функцию. Так как передаточная функция существует только для линейных систем, при решении уравнения (1) с учетом уравнения (2) необходимо выполнить его линеаризацию.

Для линеаризации нелинейной модели  $y = F(x)$  был применен метод малых отклонений. Для допустимости линеаризации достаточно, чтобы  $F(x)$  и  $\partial F/\partial x$  существовали и были непрерывны в некоторой окрестности точки  $(x_0, y_0)$ . Тогда линеаризация осуществляется при помощи разложения в ряд Тейлора функции  $F(x, y)$  в окрестности точки  $(x_0, y_0)$  и отбрасывания всех нелинейных членов этого ряда:

$$y = F(x_0) + (\partial F/\partial x)_0(x - x_0). \quad (3)$$

Индекс «0» означает, что производные берутся в точке  $x = x_0, y = y_0$ .

Таким образом, исходная нелинейная модель заменяется линейной:  $y = a_0 + a_1 x$ , где  $a_0 = F(x_0) - (\partial F/\partial x)_0 x_0$ ;  $a_1 = (\partial F/\partial x)_0$ . Такой способ линеаризации означает замену кривой  $y = F(x)$  касательной в точке  $(x_0, y_0)$  [6].

С помощью пакета Mathcad 13 была проведена линеаризация уравнения (2) путем разложения в ряд Тейлора с отбрасыванием нелинейных членов этого ряда высшего порядка малости:

$$\begin{aligned} \rho(S)_i &= \\ &= \rho_{\max} A S_i / (K_S + S_i) + \\ &+ \rho_{\max} A \frac{1 - S_i / (K_S + S_i)}{K_S + S_i} \times \\ &\times (S - S_i), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\rho(S)_i$  – линеаризованная функция скорости процесса в окрестности концентрации;  $S_i$  – текущее значение концентрации рассматриваемого вещества в точке линеаризации.

После проведения линеаризации передаточная функция ячейки идеального смешения имеет вид:

$$\begin{aligned} W_i(p) &= \prod_1^i 1 / (1 + T_h p + \\ &+ \rho_i(S) X T_h). \end{aligned} \quad (5)$$

Передаточная функция реактора  $W_{rec}$  с учетом рецикла  $R$  возвратного ила определяется через передаточную функцию сооружения, описываемого  $m$  последовательно соединенными ячейками идеального смешения  $W_m(p)$ :

$$W_{rec} = \frac{W_m(p)}{1 + R - RW_m(p)}. \quad (6)$$

С использованием формул (5) и (6) модель OxiD позволяет получать передаточные функции аэротенка любого гидродинамического профиля с учетом не только рецикла возвратного активного ила, но и внутренних рециклов сооружения, характерных для конкретной конструктивной схемы, а также технологических условий организации процесса.

На основании передаточной функции модель рассчитывает амплитудно-частотную характеристику проектируемых сооружений  $A(\omega)$ , которая показывает, во сколько раз снижается амплитуда колебаний качественных показателей очищенной воды по отношению к аналогичным показателям сточной воды, поступающей в

сооружение, в зависимости от частоты их колебаний.

Таким образом, просчитывая различные варианты конструктивных и технологических решений организации процессов биологической очистки сточных вод в аэротенках, модель OxiD рассчитывает амплитудно-частотную характеристику проектируемых сооружений. Это позволяет выбрать вариант, соответствующий требуемому эффекту очистки и заложенным в модель максимальным отклонениям качественных параметров очищенной воды от их среднего показателя.

Динамическая модель OxiD была использована при расчете схемы реконструкции одного из аэротенков старого блока Люберецких очистных сооружений (ЛОСст) производительностью 80 тыс. м<sup>3</sup>/сут с использованием технологии биологического удаления азота и фосфора.

Проведенный с помощью первого блока модели OxiD статистический анализ качественного состава осветленных сточных вод (в расчетах использовались данные разовых проб осветленной сточной воды ЛОСст, отбираемых один

раз в час) показал, что колебания значений концентраций  $N-NH_4$  и  $P-PO_4$  преобладают в области частот 0–0,15 и 0–0,12 1/ч соответственно. Для взвешенных веществ и ХПК диапазон преобладающих частот колебаний составляет 0–0,12 и 0–0,1 1/ч соответственно. Преобладание столь малых частот в спектре входных колебаний объясняется отсутствием выраженной цикличности суточной динамики качественного состава сточных вод ЛОСст (рис. 1–3).

Расчет аэротенков проводился для следующих показателей качества очищенных вод по биогенным элементам:  $N-NH_4$  – 0,7 мг/л;  $P-PO_4$  – 0,5 мг/л;  $N-NO_3$  – 9 мг/л. Учитывая, что сооружение должно обеспечивать заложенное в проект качество очистки в разовых пробах, в расчетах были приняты следующие значения математических ожиданий: для  $N-NH_4$  – 0,5 мг/л;  $P-PO_4$  – 0,3 мг/л;  $N-NO_3$  – 8 мг/л. Соответственно значения максимальных проскоков, заложенных в расчет, составляли 0,2, 0,2 и 1 мг/л. Таким образом, при заложенных в расчет средних значениях  $N-NH_4$ ,  $P-PO_4$

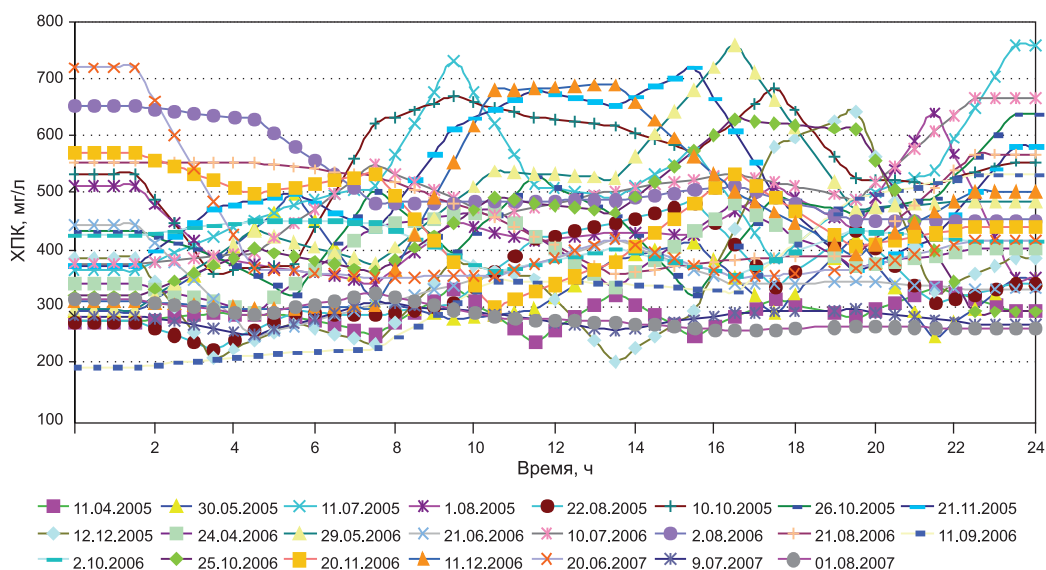


Рис. 1. Суточная динамика ХПК в осветленной сточной воде ЛОСст

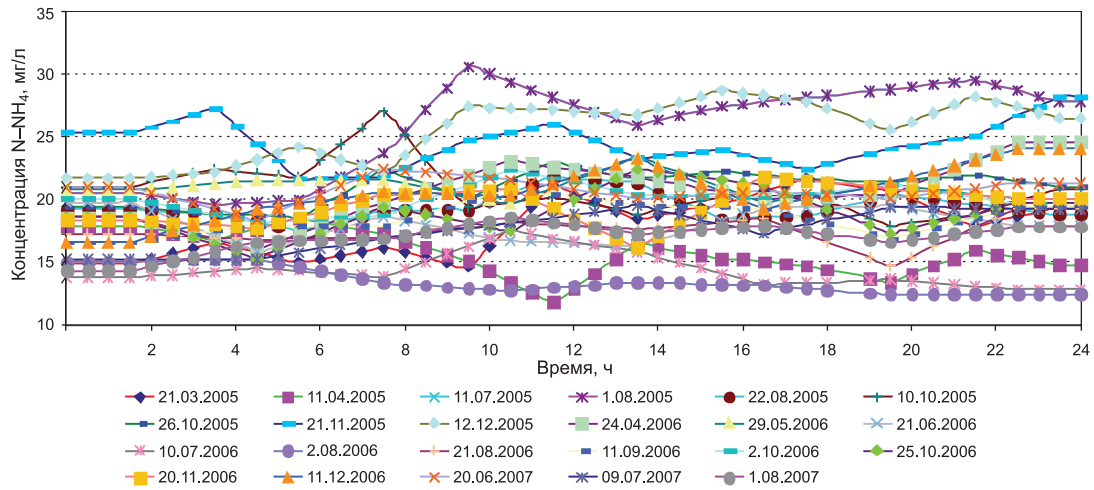


Рис. 2. Суточная динамика аммонийного азота в осветленной сточной воде ЛОСст

и  $N-NO_3$  с учетом максимальных проскоков  $\Delta(S)$  расчетное качество очищенной воды не превышает проектных показателей качества очистки.

Из формулы:

$$\Delta(S) = 3\sqrt{D_t(S)} \quad (7)$$

с учетом заданного пользователем значения  $\Delta(S)$  определяется требуемое значение дисперсии качества очищенной воды  $D_t(S)$  по рассматриваемому загрязнителю  $S$ .

В ходе расчета реконструируемого аэротенка ЛОСст были определены значения дисперсий концентраций  $N-NH_4$ ,  $P-PO_4$  и  $N-NO_3$  очищенной

воды, которые должно обеспечивать проектируемое сооружение. По расчетам, для обеспечения заложенных средних показателей качества очистки и максимальных проскоков дисперсии качества очищенных вод по  $N-NH_4$ ,  $P-PO_4$  и  $N-NO_3$  должны соответствовать следующим значениям:  $D_t(N-NH_4) = 0,06 \text{ (мг/л)}^2$ ,  $D_t(P-PO_4) = 0,06 \text{ (мг/л)}^2$  и  $D_t(N-NO_3) = 1,6 \text{ (мг/л)}^2$ .

Для существующей динамики качества поступающей на биологическую очистку сточной вод из формулы (7) были определены значения амплитудно-частотных характеристик про-

ектируемого аэротенка, которые обеспечат расчетные дисперсии качественных показателей очищенной воды:

$$D_t \approx \frac{b_0}{\pi} \int_{\omega_1}^{\omega_2} A^2(\omega) d\omega, \quad (8)$$

где  $b_0$  – среднее значение спектральной плотности качественных показателей входных стоков в диапазоне преобладающих частот, определяемое моделью по реальной динамике качественных показателей сточных вод, поступающих в аэротенк;  $A(\omega)$  – рассчитываемая по модели амплитудно-частотная характеристика проектируемого

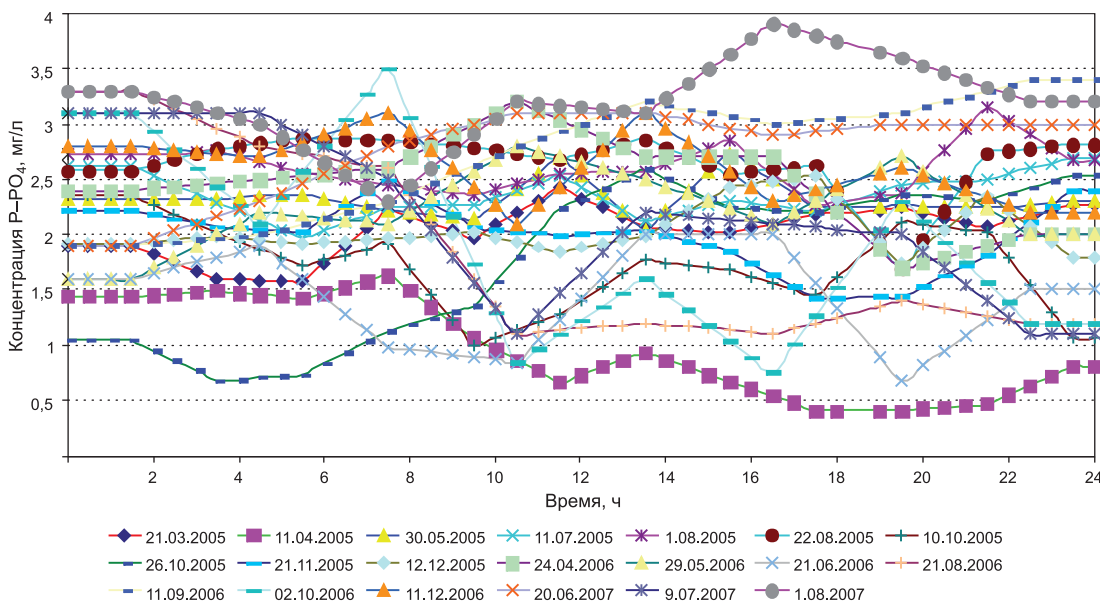


Рис. 3. Суточная динамика фосфора фосфатов в осветленной сточной воде ЛОСст

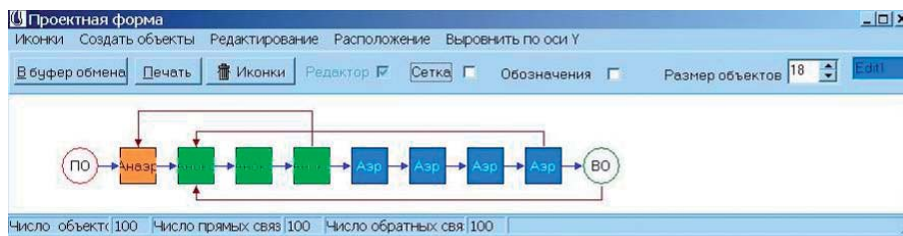


Рис. 4. Схема реконструкции аэротенка ЛОСст под технологии биологического удаления азота и фосфора

аэротенка;  $\omega_1, \omega_2$  – частоты, соответствующие границам диапазона преобладающих частот.

Проведенный расчет показал, что для сточных вод ЛОСст, поступающих на биологическую очистку, и заложенных значений средних показателей качественного состава очищенных вод и максимальных проскоков проектируемое сооружение должно иметь следующие значения амплитудно-частотной характеристики в области преобладающих частот изменения соответствующих качественных параметров стоков:

$$A(\omega)_{N-NH_4} = 0,2-0,28;$$

$$A(\omega)_{N-NO_3} = 0,25-0,4;$$

$$A(\omega)_{P-PO_4} = 0,15-0,25.$$

Второй блок модели позволяет по задаваемым конструктивным и технологическим параметрам проектируемого сооружения, динамике качественных показателей поступающей на очистку сточной воды рассчитывать амплитудно-

частотные характеристики аэротенка  $A_c(\omega)$ . Просчитывая различные технологические схемы, меняя в модели технологические режимы работы сооружения, были получены значения амплитудно-частотных характеристик различных вариантов расчета  $A_c(\omega)$ . Сравняя значения амплитудно-частотных характеристик  $A_c(\omega)$  для различных вариантов расчета со значениями  $A(\omega)$  выбираются такие конструктивные и технологические решения реализации процессов биологического удаления азота и фосфора, которые обеспечивают требуемое качество и стабильность очистки.

Так как реконструкция аэротенка под технологию биологического удаления азота и фосфора на ЛОСст проводилась на базе существующих сооружений, в расчет были заложены их гидродинамические характеристики. Проведенные экспериментальные исследования по трассированию аэротенков ЛОСст изотопами I-131

показали, что два коридора этих сооружений соответствуют 16–20 ячейкам идеального смешения.

Для описания скорости биохимических процессов в OxiD используются уравнения, заложенные в модель ASM-2. Кинетические константы, применяемые в данной модели, были получены в ходе лабораторных исследований.

С помощью модели OxiD были просчитаны различные схемы реализации процессов биологического удаления азота и фосфора в реконструируемом аэротенке ЛОСст. На рис. 4 представлена выбранная схема, расчетные значения амплитудно-частотных характеристик которой удовлетворяют требуемым значениям  $A_c(\omega)_{N-NH_4} = 0,15-0,2$ ;  $A_c(\omega)_{N-NO_3} = 0,22-0,32$ ;  $A_c(\omega)_{P-PO_4} = 0,12-0,18$ . Данная схема реализована на линии 2 экспериментального блока Люберецких очистных сооружений.

На рис. 5 представлены результаты работы реконструиро-

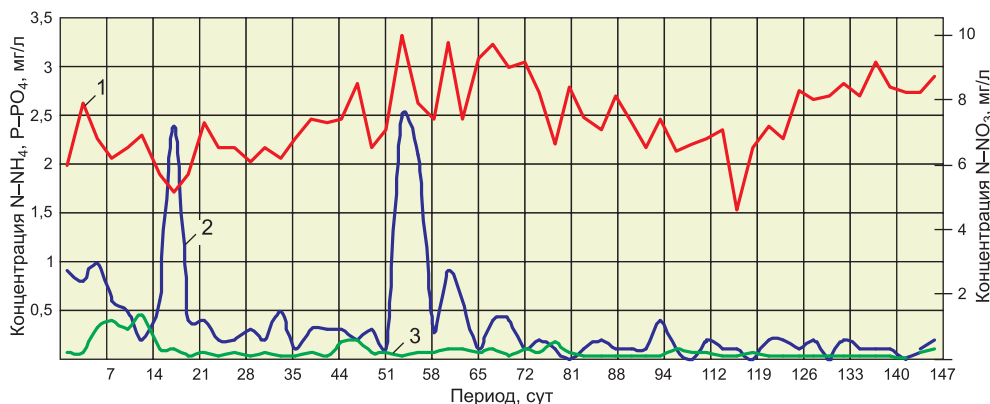


Рис. 5. Качество очищенной воды реконструируемого аэротенка линии 2 экспериментального блока ЛОСст 1 – N-NO<sub>3</sub>; 2 – N-NH<sub>4</sub>; 3 – P-PO<sub>4</sub>

ванного по приведенной выше схеме аэротенка экспериментальной линии ЛОСст производительностью 80 тыс. м<sup>3</sup>/сут.

Проведенный по модели OxiD расчет позволил запроектировать для конкретных условий ЛОС аэротенк, обеспечивающий заданную стабильность очистки. В первые две недели проходила технологическая отладка сооружения, связанная с установлением расчетного расхода осветленной воды, поступающей в аэротенк. В дальнейшем, в двух из 53 проб было выявлено превышение реального качества над расчетными показателями (по N–NH<sub>4</sub>). Это было связано со сбросом нефте-содержащих стоков, в результате чего концентрация растворенного кислорода в аэробной зоне сооружения снизилась до 0,7 мг/л (по расчету 2 мг/л). По содержанию фосфора фосфатов сооружение работало в соответствии с заданными параметрами.

### Выводы

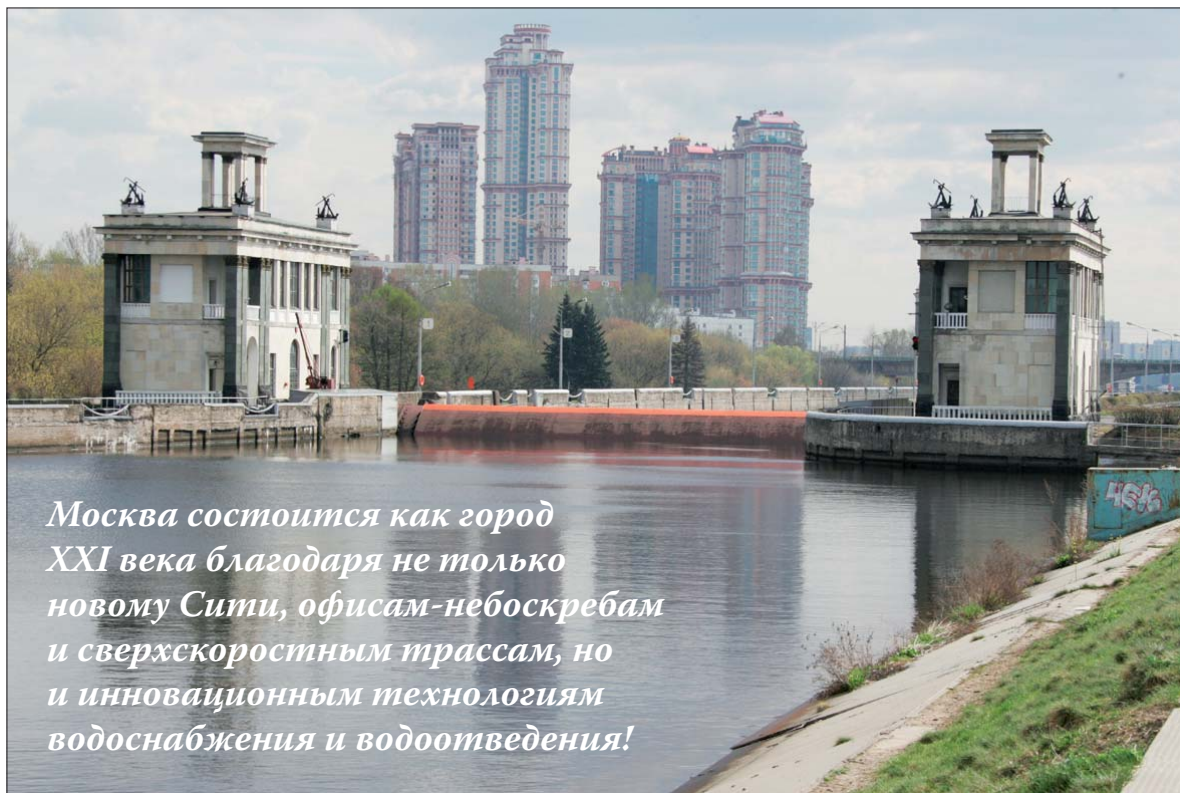
Применение динамического моделирования процесса биологического удаления азота и фосфора позволило запроектировать аэротенк, обеспечивающий заданные показатели качества и стабильность работы в реальных условиях изменения качественного состава поступающих сточных вод. Данные конструктивные и технологические решения положены в основу реконструкции аэротенков старого блока Люберецких очистных сооружений и нового блока Курьяновских очистных сооружений. Структура OxiD позволяет наращивать модель блоками сооружений механической очистки, сооружениями обработки осадка, увеличивать количество расчетных блоков и, как следствие, расширять круг решаемых задач.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. I. Takacs, G. G. Patry, V. Watson. Case studies in dynamic modelling of large-scale

wastewater treatment plants // Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems. 1995. V. 1. Issue 3.

2. Flora, etc. Treatment plant instructional modules based on SuperPro Designer // Environmental Modelling and Software. 1998. V. 14.
3. Мойжес О. В. Математическая модель процессов очистки сточных вод в аэротенках «OxiD» / Сб. тезисов конгресса «ЭКВАТЭК–2004». – М., 2004.
4. Мойжес О. В., Киндерова К. В. Оценка стабильности работы сооружений биологической очистки сточных вод с помощью математического аппарата случайных величин / Сб. тезисов конгресса «Вэйст-Тэк–2007». – М., 2007.
5. Вентцель Е. С. Теория вероятности / Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1999.
6. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1975.



*Москва состоится как город XXI века благодаря не только новому Сити, офисам-небоскрегам и сверхскоростным трассам, но и инновационным технологиям водоснабжения и водоотведения!*