

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА В КОРИДОРНОМ АЭРОТЕНКЕ

**Н. С. Попов, В. А. Лузгачев,
О. В. Пещерова, Чан Минь Тьинь**

*ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический
университет», г. Тамбов*

Рецензент д-р техн. наук, профессор В. Н. Шамкин

Ключевые слова: аэротенк и отстойник; моделирование; процесс биоочистки; экологическая безопасность; энергосбережение.

Аннотация: Предложены постановка задачи и варианты оптимизации электропотребления воздухоудвунной станцией. Обсуждается возможность превращения городских очистных сооружений в рентабельное предприятие по получению вторичных ресурсов.

Цели и задачи государственной Программы РФ «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года» направлены на обеспечение устойчивого экономического развития страны в условиях рационального и экологически ответственного использования энергоресурсов, модернизации технологического оборудования, разработки и внедрения современных информационно-измерительных и управляющих систем энергосбережения. При этом устойчивое развитие рассматривается не столько в единстве экономических, экологических и социальных факторов, сколько в аспекте нахождения условий для гармоничного взаимодействия промышленных объектов с экологическими. В научном плане это означает исследование предельных возможностей важнейшего класса вероятностных систем, именуемых природо-промышленными, с позиций оптимального потребления материально-энергетических ресурсов и допустимого уровня образования отходов [1].

Попов Николай Сергеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Природопользование и защита окружающей среды», e-mail: eco@nnn.tstu.ru; Лузгачев Валерий Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Природопользование и защита окружающей среды»; Пещерова Ольга Викторовна – аспирант кафедры «Природопользование и защита окружающей среды»; Чан Минь Тьинь – аспирант кафедры «Природопользование и защита окружающей среды», ТамбГТУ, г. Тамбов.

Для региональной экономики особое значение имеют природо-промышленные системы (ППС) муниципального уровня, обладающие экономической самостоятельностью, конкретными географическими особенностями и высоким уровнем энергопотребления. К таким ППС в данной работе отнесены городские очистные сооружения (ГОС), находящиеся в непрерывном взаимодействии с внешней средой: канализационной системой, метеофакторами, энергоресурсами, водоемом-приемником очищенных стоков и т.д.

Городские очистные сооружения обеспечивают экологическую безопасность территорий, а поэтому их проектирование традиционно направлено на предупреждение появления опасных для жизни и здоровья людей ситуаций в случаях неожиданно больших притоков сточной воды из коллектора, резкого увеличения примесей в воде из-за производственных аварий на заводах и транспорте, изменений климатических условий и т.д. Подобные ситуации всегда ведут к негативным последствиям в окружающей среде.

Именно по этим причинам в проект очистных сооружений закладывается вполне объяснимая конструктивно-технологическая избыточность, отражающаяся на капитальных затратах. Такая специфика свойственна всем системам защиты. Чтобы снизить общую стоимость проекта ГОС больше внимания требуется уделять минимизации затрат на обслуживание сооружений, ремонт, наладку, поиск путей экономии всех видов используемых ресурсов, оптимизации режимов работы сооружений в условиях переменной нагрузки, проектированию более эффективных систем контроля и управления процессами.

Создание ГОС с нулевым энергопотреблением и даже с положительным получением энергии сегодня становится действительностью [2]. Все больший смысл приобретает конверсия жидких отходов в ценностные материалы, отчего очистные сооружения из категории затратных систем экологической безопасности способны трансформироваться в категорию рентабельных предприятий по производству вторичных ресурсов.

Основные эксплуатационные расходы ГОС связаны с потреблением электроэнергии воздушными станциями. По данным работы [3] на аэрацию сточной воды приходится до 65 % всех энергозатрат, а использование современного управляемого воздушного оборудования с высоким КПД способно сократить энергопотребление до 35 %. Отсюда следует вывод о целесообразности разработки системы оптимального управления подачей воздуха в аэротенк.

Один из вариантов организации двухуровневой системы управления процессами биологической очистки предложен в работе [4]. Изучение ее возможностей в плане оптимизации воздухоподачи в коридорный аэротенк является целью настоящего исследования.

В качестве объекта управления выбрана первая очередь очистных сооружений г. Тамбова, проектная производительность которой составляет 17 тыс. м³/сут. Основной и наиболее чувствительной к изменениям входной нагрузки частью ГОС является подсистема «аэротенк – отстойник» (А – О), схема которой изображена на рис. 1. Аэротенк имеет три коридора с размерами 48 × 7 × 3,6 м и относится к аппаратам с вытеснением жидкости.

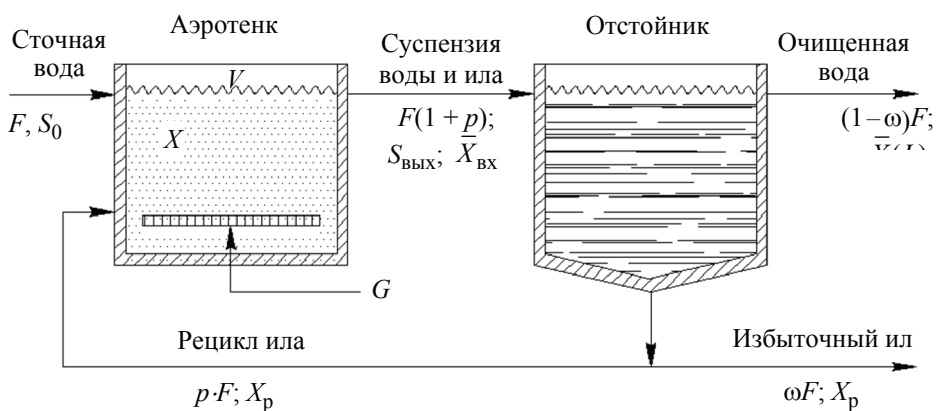
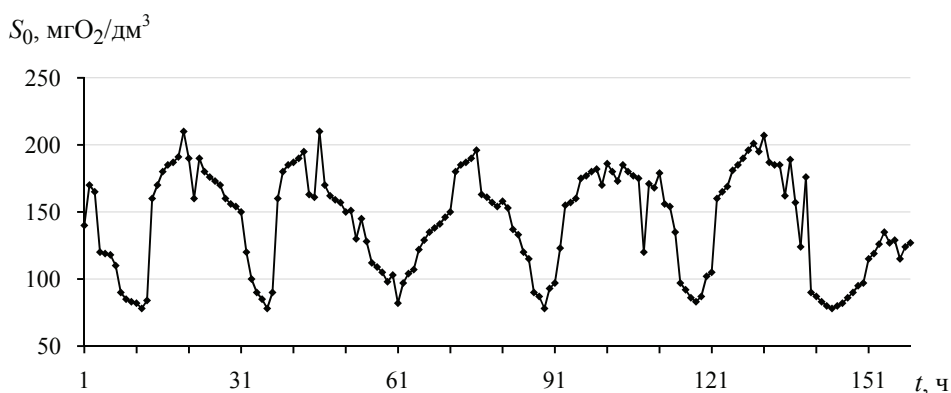
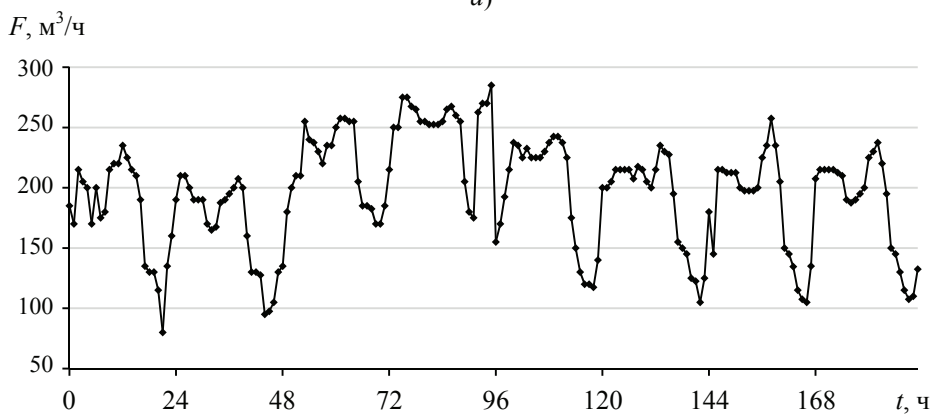


Рис. 1. Подсистема «аэротенк – отстойник»



а)



б)

Рис. 2. Изменение БПК₅ (а) и расхода сточной воды (б) на входе подсистемы А – О

Примеры реальных изменений расхода сточной воды и концентрации органических веществ в единицах БПК приведены на рис. 2. «Недогруженность» аэротенка по расходу и концентрации примесей поступающей сточной воды в определенные периоды времени является основанием для минимизации расхода воздуха по длине коридоров аэротенка.

Постановку интересующей задачи сформулируем следующим образом. Пусть подсистема А – О работает в квазистатическом режиме на интервалах времени Δt_l , $l = 1, 2, \dots$. Обозначим $Z_i = Z_i(g_i)$ – затраты на аэрацию в i -й секции аэротенка, где g_i – расход воздуха.

Требуется определить оптимальное распределение расходов g_i^* по длине аэротенка

$$g_i^* = \arg \min_{g_i \in G_i} \sum_{i=1}^k Z_i(g_i), \quad i = \overline{1, k}, \quad (1)$$

при условиях в виде уравнений модели:

$$S_j^{\text{ввх}} = f_j(\hat{S}_j, \hat{F}, X_v), \quad v = \overline{1, d}, \quad j = \overline{1, m}; \quad (2)$$

$$X_v = \varphi_v(\hat{S}_j, r_v(\hat{S}_j, T, \text{pH}, C, \hat{F})); \quad (3)$$

$$C = \Psi(\hat{S}_j, X_v, K_L a, \hat{F}); \quad (4)$$

$$(K_L a)_i = \Phi(g_i, d_n, h / H, f / B), \quad (5)$$

ограничения на суммарную подачу воздуха

$$\sum_{i=1}^k G_i \leq G^B \quad (6)$$

и концентрацию примесей в очищенной воде

$$S_j^{\text{ввх}} \leq S_j^H, \quad j = \overline{1, m}. \quad (7)$$

В (1) – (7) использованы следующие обозначения: f , φ , Ψ , Φ – функциональные операторы; \hat{S}_j и \hat{F} – прогнозируемые значения входной концентрации j -й примеси и расхода сточной воды соответственно; X_v – концентрация v -го типа микроорганизмов активного ила; C – концентрация кислорода; r_v – скорость биоокисления и нитрификации органических примесей; T , pH – температура и водородный показатель воды в аэротенке; d_n – диаметр пузырьков воздуха; f/B – отношение ширины полосы аэрации к ширине аэротенка; h – глубина погружения аэратора; H – глубина аэротенка; S_j^H – нормативный показатель качества очищенной воды; G_i – предельное значение расхода воздуха в i -й ячейке; G^B – суммарной расход воздуха в системе аэрации.

Решение задачи (1) – (7) предполагает использование математической модели процесса биологической очистки. Гидродинамику аэротенка-вытеснителя аппроксимировали цепочкой псевдоячеек идеального смешения, число которых i может варьироваться от трех до пяти, согласно выводам работы [5]. К основным процессам биоокисления отнесены процессы поглощения углерод- и азотсодержащих веществ, что отразилось на значениях стехиометрических коэффициентов.

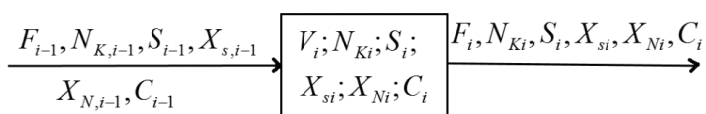


Рис. 3. Состав входных и выходных переменных i -й ячейки:
 F_{i-1}, F_i – расходы воды на входе и выходе i -й ячейки соответственно;
 V_i – объем ячейки; S_i – химическое потребление кислорода (ХПК);
 $X_{si}, X_{Ni}, N_{Ki}, C_i$ – концентрации микроорганизмов активного ила, нитрифицирующих бактерий, азотистых соединений и растворенного кислорода соответственно

На рисунке 3 даны условные обозначения переменных состояния i -й ячейки.

С учетом принятых обозначений уравнения модели аэротенка в статическом режиме работы имеют вид:

– концентрация гетеротрофных микроорганизмов X_s :

$$\frac{F_{i-1}}{V_i}(X_{s,i-1} - X_{si}) + \frac{Y_s K_{s \max} (S_i/X_{si})^n X_{si}}{K_s + (S_i/X_{si})^n} \frac{C_i}{K_{sc} + C_i} - b_s X_{si} = 0; \quad (8)$$

– концентрация нитрифицирующих бактерий X_N :

$$\frac{F_{i-1}}{V_i}(X_{N,i-1} - X_{Ni}) + \frac{Y_N K_{N \max} X_{Ni} N_{Ki}}{K_N + N_{Ki}} \frac{C_i}{K_{Nc} + C_i} - b_N X_{Ni} = 0; \quad (9)$$

– концентрация субстрата по ХПК S :

$$\frac{F_{i-1}}{V_i}(S_{i-1} - S_i) - \frac{K_{s \max} X_{si} (S_i/X_{si})^n X_{si}}{K_s + (S_i/X_{si})^n} \frac{C_i}{K_{sc} + C_i} = 0; \quad (10)$$

– концентрация аммонийного азота N_K :

$$\frac{F_{i-1}}{V_i}(N_{K,i-1} - N_{Ki}) - \frac{K_{N \max} X_{Ni} N_{Ki}}{K_N + N_{Ki}} \frac{C_i}{K_{Nc} + C_i} = 0; \quad (11)$$

– концентрация нитратного азота N_H :

$$\frac{F_{i-1}}{V_i}(N_{H,i-1} - N_{Hi}) + \frac{K_{N \max} X_{Ni} N_{Ki}}{K_N + N_{Ki}} \frac{C_i}{K_{Nc} + C_i} = 0; \quad (12)$$

– концентрация растворенного кислорода C :

$$\frac{F_{i-1}}{V_i}(C_{i-1} - C_i) + K_L a (C^* - C_i) - 1,42 \left(\frac{1}{Y_s} - 1 \right) \frac{Y_s K_{s \max} (S_i/X_{si})^n X_{si}}{K_s + (S_i/X_{si})^n} \frac{C_i}{K_{sc} + C_i} - (4,57 - 1,98 Y_N) \frac{K_{N \max} N_{Ki}}{K_N + N_{Ki}} \frac{C_i}{K_{Nc} + C_i} - 1,42 (b_s X_{si} + b_N X_{Ni}) = 0; \quad (13)$$

$$\hat{\mu}_s(T) = K_{s \max} Y_s(T) = \hat{\mu}_{20} \cdot 1,047^{T-20}; \quad (14)$$

$$\hat{\mu}_N(T) = K_{N_{\max}} Y_N(T) = 0,47 \left(e^{0,098(T-15)} \right) (1 - 0,833(7,2 - pH)) \times \\ \times \frac{N_{Ki}}{\left(N_{Ki} + 10^{(0,052T-1,158)} \right)} \frac{C_i}{(C_i + 1,3)}; \quad (15)$$

$$K_L a(T) = (K_L a)_{20} \theta^{T-20}, \quad \theta = 1,016 \dots 1,037; \quad (16)$$

$$T = 5 \dots 20 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad \text{pH} = 7,2 \dots 8,3; \quad (17)$$

$$(K_L a)_{20} = 0,041 \left(\frac{F_B}{(L_K D_K)} \frac{1}{d_n} \frac{h_A}{H_K} \left(\frac{f_A}{D_K} \right)^{0,16} \left(\frac{h_A}{d_n} \right)^{-0,33} \right); \quad (18)$$

$$C^*(T) = C_{\text{ч.в}}(T)\beta; \quad (19)$$

$$C_{\text{ч.в}}(T) = 14,652 - 0,41022 T + 0,007991 T^2 - 0,000077774 T^3, \quad (20) \\ \beta \approx 0,85 \dots 0,98,$$

где V_i – объем ячейки, м³; b_s , b_N – коэффициенты отмирания гетеротрофов и нитрификаторов соответственно, 1/ч; n – показатель степени, $n = 0,882$; Y_s , Y_N – коэффициенты прироста гетеротрофов и нитрификаторов соответственно, мг/мг; $K_{s_{\max}}$, $K_{N_{\max}}$ – максимумы удельных скоростей удаления ХПК гетеротрофами и аммонийного азота, 1/сут.; K_s – модифицированная константа полунасыщения по ХПК; K_N – константа полунасыщения по аммонийному азоту, мг/л; K_{sc} , K_{Nc} – константы полунасыщения по кислороду для гетеротрофов и нитрификаторов соответственно, мг/л; C^* – концентрация насыщения растворенного кислорода, мг/л; $C_{\text{ч.в}}(T)$ – концентрация растворенного кислорода в чистой воде, мг/л; $\hat{\mu}_s(T)$, $\hat{\mu}_N(T)$ – максимумы удельной скорости роста гетеротрофов и нитрификаторов соответственно, 1/сут.

Прямоугольный конусный вторичный отстойник подсистемы биологической очистки имеет размеры $12,5 \times 12,5$ м с глубиной осаждения ила 3 м и конической частью его уплотнения высотой 3,1 м. Для описания процесса осаждения ила использована модель [6]

$$D_x \frac{d^2 \bar{X}}{dx^2} - u \frac{d\bar{X}}{dx} - \frac{w_p}{H} (1-k) \bar{X} = 0 \quad (21)$$

с граничными условиями:

$$\bar{X} = x_0 \text{ при } x = 0; \quad (22)$$

$$D_x \frac{d\bar{X}}{dx} = 0 \text{ при } x = L, \quad (23)$$

где \bar{X} – усредненная по высоте отстойника H концентрация гетеротрофов и нитрификаторов, мг/л; x – продольное направление движения частиц ила, см; u – горизонтальная скорость движения суспензии, см/с; w_p – скорость осаждения хлопьев ила, см/с; H – высота зоны осаждения, см; D_x – коэффициент продольной диффузии, см²/с; k – коэффициент, характеризующий режим работы отстойника: $k > 1$ – тенденция к вымыванию частиц ила; $k = 1$ – баланс между осаждением и вымыванием; $0 < k < 1$ – тенденция к осаждению; $k = 0$ – только осаждение; L – длина зоны осаждения, см.

Для определения w_p воспользуется формулой из работы [7]

$$w_p = w_0 \exp(-4,5 \cdot 10^{-4} \bar{X}), \quad (24)$$

где w_0 – начальная скорость осаждения частиц, зависящая от возраста ила θ :

$$w_0 = \begin{cases} 10^{-4}(1,64 \cdot \theta - 1,628) \text{ м/с,} & \text{если } \theta < 15 \text{ сут.;} \\ 22,3 \cdot 10^{-4} \text{ м/с,} & \text{если } \theta > 15 \text{ сут.} \end{cases} \quad (25)$$

Возраст ила в подсистеме А – О определим по формуле

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^k V_i X_i}{\omega F X_p + (1 - \omega) F \bar{X}(L)}, \quad (26)$$

где X_i – концентрация гетеротрофов и нитрификаторов в i -й ячейке, мг/л; ω – коэффициент отвода избыточного ила; X_p – концентрация ила в рецикле; мг/л; $\bar{X}(L)$ – концентрация ила в очищенной воде, мг/л; F – расход сточной воды на входе в аэратенк, м³/сут.

Концентрация гетеротрофов и нитрификаторов в рецикле вычисляется по формуле

$$X_p = \frac{\bar{X}_{\text{вх}}(1 + p) - \bar{X}(L)(1 - \omega)}{p + \omega}, \quad (27)$$

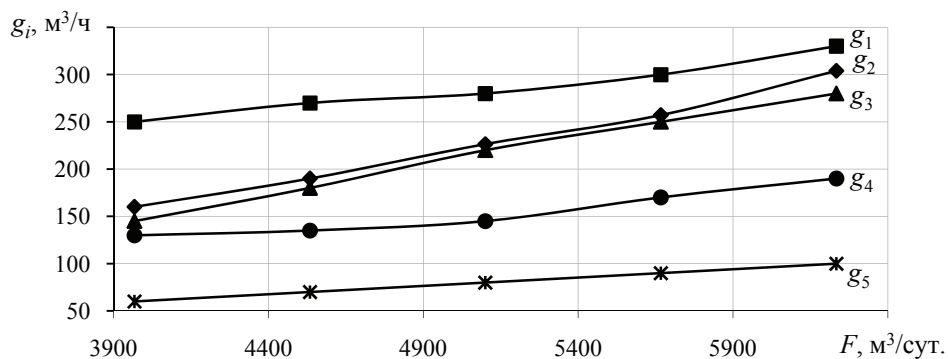
где $\bar{X}_{\text{вх}}$ – концентрация микроорганизмов активного ила на входе в отстойник (см. рис.1); p – соотношение расхода ила в рецикле к расходу жидкости, поступающей в аэротенк.

Параметрическая идентификация модели (8) – (20) осуществлялась поэтапно, согласно рекомендациям [8]. В качестве начальных приближений использованы значения кинетических констант процессов аэробного биокисления углерод- и азотсодержащих веществ, содержащихся в городских стоках. Значения данных констант приведены в работе [8, с. 111, 126]. Адекватность модели проверялась по специальной процедуре, названной «адекватностью по распределению», с уровнем значимости критерия $\alpha = 0,05$.

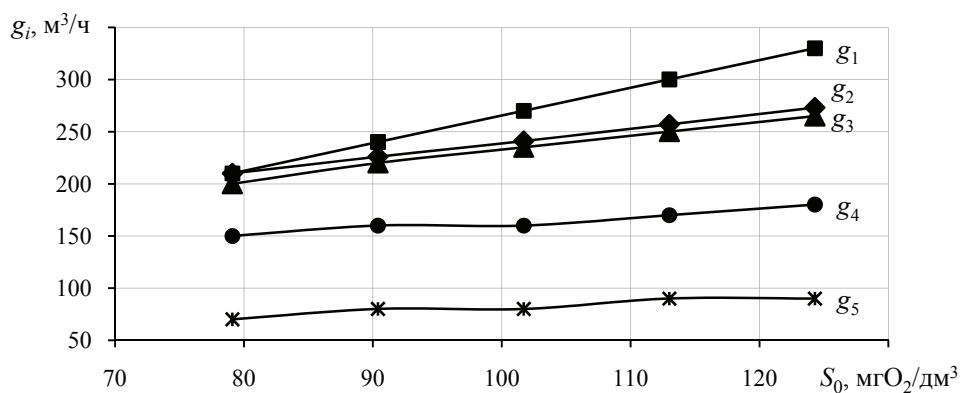
На рисунке 4 представлены отдельные результаты решения задачи (1) – (7). Из анализа графиков (рис. 4, а) следует, что с увеличением числа ячеек расход воздуха уменьшается, свидетельствуя о бóльшей эффективности режима вытеснения в сравнении с режимом идеального смешения. Рост концентрации органических веществ во входном потоке (рис. 4, б) требует значительного увеличения подачи кислорода воздуха.

На рисунке 5 представлен фрагмент часового изменения расхода сточной воды F со средним значением ХПК 113 мгО₂/л, а на графике рис. 6 показаны соответствующие по времени результаты расчета суммарного расхода воздуха. В сравнении с равномерным распределением расхода воздуха по ячейкам коридора (линия, параллельная оси абсцисс с $\sum_i g_i = 1318 \text{ м}^3/\text{ч}$), его оптимальное распределение по ячейкам дает существенную экономию подачи воздуха: 10 % при $n = 3$; 16 % при $n = 4$; 18 % при $n = 5$.

При вычислении g_i осуществлялся контроль за выполнением ограничений по ХПК и концентрации азота в очищенной воде. Эти значения не превышали нормативных в 30 мгО₂/л и 2 мг/л соответственно.



а)



б)

Рис. 4. Распределение расходов воздуха g_i по пяти ячейкам коридора:

а – при изменении расхода сточной воды F и $S_0 = 113 \text{ мгО}_2/\text{л}$;

б – при изменении БПК сточной воды и $F = 5667 \text{ м}^3/\text{сут}$.

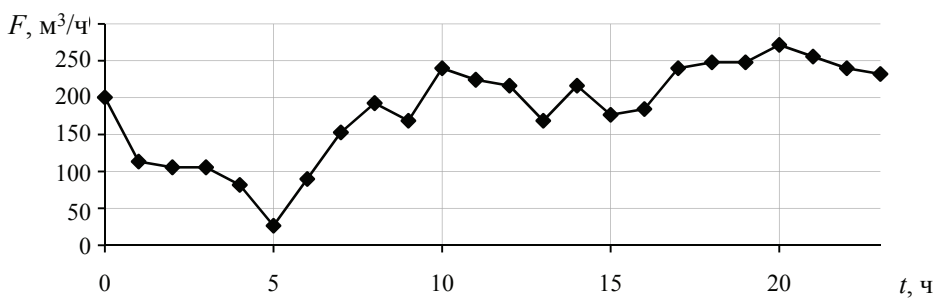


Рис. 5. Суточное изменение расхода сточной воды F

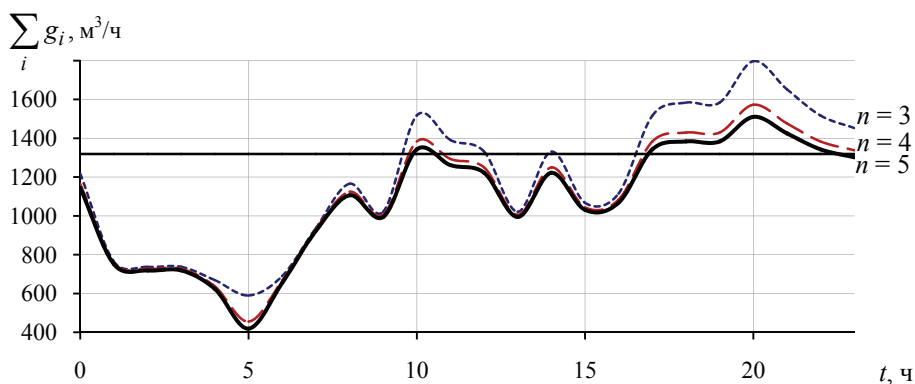


Рис. 6. Изменение суммарного расхода воздуха $\sum_i g_i$ при изменении расхода сточной воды F в течение суток для различного числа ячеек n

Поскольку с увеличением числа ячеек растет число клапанов и линий воздухоподачи, а значит растут и расходы на их обслуживание, необходимо осуществлять совместное проектирование аппаратно-технологической части очистных сооружений с информационно-аналитической в виде системы контроля и управления биотехнологическими процессами.

Список литературы

1. Повышение энергоэффективности природо-промышленных систем : учеб. пособие / Н. С. Попов [и др.] ; под общ. ред. Н. С. Попова. – Тамбов : Изд-во ИП Першина Р. В., 2014. – 146 с.
2. Nowak, O. Examples of Energy Self-Sufficient Municipal Nutrient Removal Plants / O. Nowak, S. Keil, C. Fimml // Wat. Sci. Tech. – 2011. – Vol. 64 (1). – P. 1 – 6.
3. Баженов, В. И. Энергосбережения из «воздуха». Повышение энергоэффективности очистных сооружений водоотведения [Электронный ресурс] / В. И. Баженов // Энергосовет : электрон. журн. – 2013. – № 1 (26). – С. 32 – 42. – Режим доступа : http://www.energsovet.ru/bul_stat.php?idd=362 (дата обращения: 15.02.2016).
4. Попов, Н. С. О структуре системы управления процессом биологической очистки сточных вод / Н. С. Попов, О. В. Пещерова, Чан Минь Тинь // Вопр. соврем. науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2015. – № 3 (57). – С. 34 – 45.
5. Murphy, K. L. Longitudinal Mixing in Spiral Flow Aeration Tanks / K. L. Murphy, B. I. Boyko // Journal of the Sanitary Engineering Division: Proceeding of the American Society of Civil Engineering. – 1970. – Vol. 96. – P. 211 – 221.

6. Effects of Deposit Resuspension of Setting Basin / T. Takamasu [et. al.] // *Journal of the Environmental Engineering Division*. – 1974. – Vol. 100, no. 4. – P. 883 – 903.
7. Paterson, R. B. Computer-Aided Design and Control of an Activated Sludge Process / R. B. Paterson, M. M. Denn // *The Chem. Eng. J.* – 1983. – Vol. 27, No. 1. – P. B13 – B27.
8. Очистка сточных вод / М. Хенце [и др.]. – М. : Мир, 2004. – 480 с.

References

1. Popov N.S., Bianco V., Lyisenko I.O., P. Novakovski P., Chan Minh Tin, Chuksina L.N., Yakunina I.V. *Povyshenie energoeffektivnosti prirodno-promyshlennyih system* [Energy Efficiency Improving in Natural and Industrial Systems], Tambov: Izdatel'stvo Pershina R.V., 2014, 146 p. (In Russ.)
2. Nowak O., Keil S., Fimml C. Examples of energy self-sufficient municipal nutrient removal plants, *Wat. Sci. Tech.*, 2011, no. 64(1), pp. 1-6.
3. Bazhenov V.I. [Energy Conservation from the “air”. Improving energy efficiency wastewater treatment facilities], *Energosovet* [Energy Council], no. 1 (26), 2013, pp. 32-42, available at: http://www.energosovet.ru/bul_stat.php?idd=362 (accessed 15 February 2016). (In Russ.)
4. Popov N.S., Peshcherova O.V., Tran Minh Chinh [On the Structure of the Process Control System of Biological Wastewater Treatment], *Voprosy sovremennoj nauki i praktiki. Universitet im. V.N. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2015, no. 3 (57), pp. 34-45. (In Russ., abstract in Eng.)
5. Murphy K.L., Boyko. B.I. Longitudinal mixing in spiral flow aeration tanks, *Journal of the Sanitary Engineering Division: Proceeding of the American Society of Civil Engineering*, 1970, vol. 96, pp. 211-221.
6. Takamasu T., Naito M., Shiba S., Ueda Y. Effects of Deposit Resuspension of Setting Basin, *Journal of the environmental engineering division*, 1974, vol. 100, no. 4, pp. 883-903.
7. Paterson R.B., Denn M.M. Computer-aided Design and Control of an Activated Sludge Process, *The Chem. Eng. J.*, 1983, vol. 27, no. 1, pp. B13-B27, doi: 10.1016/0300-9467(83)80051-3.
8. Henze, M., Harremoës P., Jansen J. la Cour, Arvin E. *Wasterwater Treatment. Biological and Chemical Processes*, Berlin: Springer, 2002.

Simulation of Optimal Air Distribution in Tunnel Aeration Tank

N. S. Popov, V. A. Luzgachev, O. V. Peshcherova, Tran Minh Chinh

Tambov State Technical University, Tambov

Keywords: environmental safety; energy conservation; aeration tank and settling tank; modeling; bio-purification process.

Abstract: The paper proposes the formulation of the problem and options for optimizing electric power consumption of the air blower house. We discuss the idea of conversion of municipal wastewater treatment plants into cost-effective enterprises for the production of secondary resources.

© Н. С. Попов, В. А. Лузгачев,
О. В. Пещерова, Чан Минь Тъинь, 2016