

УДК 681.54

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.4.59

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ УДАЛЕНИЯ СОЕДИНЕНИЙ АЗОТА ИЗ СТОЧНЫХ ВОД

Е. К. Грудяева^{а, 1}, аспирант^аСанкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, РФ

Введение: существующие системы очистки сточных вод активным илом используются для узкого диапазона концентраций загрязнений. Применение регулирования позволяет расширить диапазон, однако при изменении состава воды на входе системы или условий внешней среды требуется постоянная перенастройка параметров регулятора. **Цель исследования:** синтез системы управления с логико-динамическим регулятором для удаления загрязнителей в широком диапазоне концентраций. **Результаты:** на основе математического описания модели ASM1 построена схема взаимодействия компонентов биохимических реакций. Представлена управляемая математическая модель удаления соединений азота в двухзонном биореакторе с рециклом нитратов, блоком ультрафильтрационных мембран и возвратным иловым потоком в первую зону. Введены показатели качества процессов для системы управления биологической очисткой стоков. На их основе разработана методика параметрической настройки регулятора с логически перестраиваемой структурой. Введены понятия ведущего и ложного ведущего регуляторов. В соответствии с разработанной моделью в среде MatLab/Simulink построена компьютерная модель. Результаты моделирования демонстрируют возможность качественной очистки в условиях широкого изменения уровней входных многокомпонентных загрязнений в заданном неизменном объеме биореактора. **Практическая значимость:** применение логико-динамического регулятора с оптимальными настройками параметров позволяет обеспечивать допустимые концентрации аммония, нитратов и химическое потребление кислорода на выходе на всех рабочих режимах системы управления.

Ключевые слова — нитрификация, денитрификация, активный ил, двухзонный биореактор, рециркуляционный поток, математическое моделирование, ASM1, логико-динамический регулятор.

Введение

Потребность в разработке математических моделей (ММ) обусловлена требованиями высокого качества управления технологическим процессом (ТП), ограниченным набором средств измерения, а также временными затратами при использовании лабораторных анализов и сложностью качественного анализа проб иловой массы. Процессы биологической очистки сточных вод активным илом описываются ММ различной степени сложности и адекватности.

Одной из ММ, представляющих основные процессы в активном иле, является модель ASM1 [1, 2]. Эта нелинейная модель характеризует процессы удаления соединений азота в результате жизнедеятельности групп бактерий. Бактерии автотрофы обеспечивают процесс нитрификации при наличии кислорода, в результате которого аммонийный азот окисляется до нитратного. Процесс денитрификации обусловлен действием бактерий гетеротрофов, которые в бескислородных условиях удаляют нитратный азот, преобразуя его в газообразный. В дальнейшем модель ASM1 берется за основу моделирования.

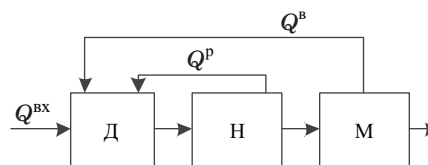
¹ Научный руководитель — доктор технических наук, профессор кафедры автоматики и процессов управления Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» С. Е. Душин.

Математические модели

Рассматриваемый биореактор (рис. 1) состоит из зон денитрификации D и нитрификации H , причем, из H в D предусмотрен рециркуляционный поток. Возвратный поток из мембранного блока M поступает в зону денитрификации, а фильтрат — на последующее обеззараживание и далее — потребителю (обозначения потоков приводятся ниже в таблице).

Размер пор в мембранах ультрафильтрации блока M составляет 0,03–0,1 мкм. Взвешенные частицы имеют размер более 0,1 мкм, размер бактерий нитрификаторов — от 0,8 мкм, денитрификаторов — от 1 мкм. Таким образом, принимается, что ультрафильтрационные мембраны фильтруют все взвешенные вещества и бактерии.

Модель должна учитывать химическое потребление кислорода (ХПК) — количество кислорода, потребляемое при химическом окислении содержащихся в воде органических веществ



■ Рис. 1. Схема биореактора

под действием различных сильных окислителей в присутствии катализатора. Показатель ХПК характеризует необходимые затраты кислорода на удаление загрязняющих веществ из сточной воды [2] и рассчитывается как сумма следующих фракций [3]: растворенное легко разлагаемое органическое вещество; растворенное биологически инертное органическое вещество; взвешенное медленно биологически разлагаемое органическое вещество; взвешенное биологически инертное разлагаемое органическое вещество; биомассы бактерий нитрификаторов и денитрификаторов. С учетом принятого допущения о фильтрации мембранами всех взвешенных веществ и бактерий, ХПК после мембранного блока складывается из растворенных веществ — легко разлагаемого органического и биологически инертного.

При разработке ММ принимались следующие ограничения и допущения:

- зоны биореактора характеризуются идеальным перемешиванием; пространственная распределенность потоков не учитывается;
- состав активного ила образован бактериями нитрификаторов и денитрификаторов;
- температура в технологическом пространстве аппарата фиксирована и равна 20 °С;
- на вход биореактора поступают аммонийный азот, нитратный азот, растворенное биологически

разлагаемое органическое вещество, а также взвешенное органически медленно разлагаемое вещество; входные стоки также характеризуются щелочностью;

— в модели мембранного блока процессы нитрификации и денитрификации не учитываются.

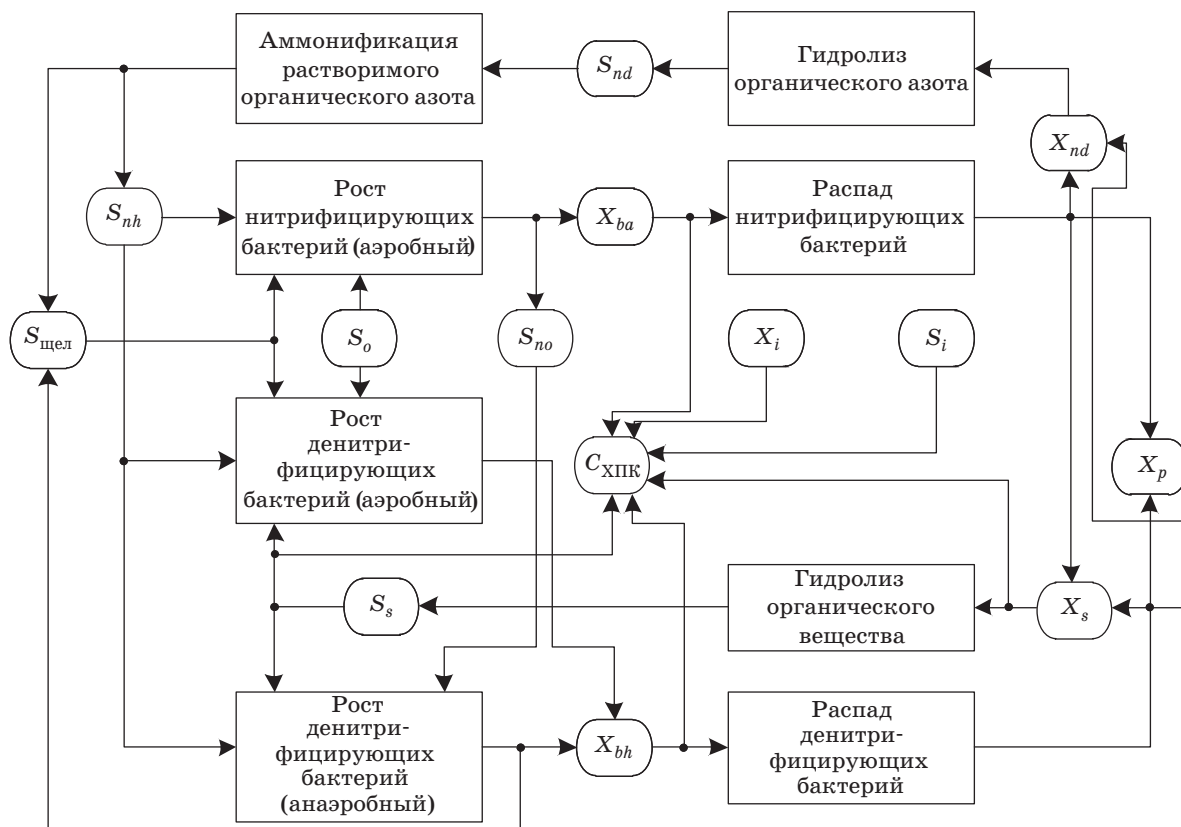
Процессы в зонах нитрификации и денитрификации характеризуются одноподобными уравнениями химической кинетики. Подача кислорода в зону нитрификации позволяет учесть преобладание нитрифицирующих процессов, тогда как в бескислородной зоне эффективнее протекают процессы денитрификации. Схема, дающая представление о взаимодействии компонентов модели ASM1, представлена на рис. 2.

Для удобства восприятия составляющие модели, их обозначения и размерности сведены в таблицу.

С учетом обозначений процессы в зонах Д и Н описываются системами нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений.

Модель зоны Д (денитрификация):

$$\frac{dX_{ba1}}{dt} = \frac{Q^P}{V_1} X_{ba2} + \frac{Q^B}{V_1} X_{ba3} - \frac{Q^{BX} + Q^P + Q^B}{V_1} X_{ba1} + r_{ba1}(S_{nh1}, S_{o1}, X_{ba1});$$



■ Рис. 2. Схема взаимодействия компонентов модели ASM1

■ Таблица

№	Наименование величин и параметров	Обозначение	Размерность
1	Концентрация бактерий-нитрификаторов	X_{ba}	г ХПК/м ³
2	Концентрация бактерий-денитрификаторов	X_{bh}	г ХПК/м ³
3	Концентрация аммония и аммонийного азота	S_{nh}	г NH ₄ ⁺ /м ³
4	Концентрация нитратного азота	S_{no}	г NO ₃ ⁻ /м ³
5	Концентрация растворенного биологически разлагаемого органического вещества	S_s	г ХПК/м ³
6	Концентрация взвешенного органического медленно разлагаемого вещества	X_s	г ХПК/м ³
7	Концентрация растворенного кислорода	S_o	г O ₂ /м ³
8	Концентрация растворенного органического азота	S_{nd}	г N/м ³
9	Концентрация взвешенного органического медленно разлагаемого азота	X_{nd}	г N/м ³
10	Щелочность	$S_{щел}$	экв/м ³
11	Концентрация твердых продуктов распада биомассы	X_p	г ХПК/м ³
12	Концентрация растворимого инертного органического вещества	S_i	г ХПК/м ³
13	Концентрация взвешенного инертного органического вещества	X_i	г ХПК/м ³
14	Химическое потребление кислорода	$C_{ХПК}$	г ХПК/м ³
15	Удельная объемная скорость роста концентрации вещества j , где j — составляющие модели ASM1 1 — 11, [...] — соответствующая единица измерения массы	r_j	г [...] / м ³
16	Расход сточных вод входного потока биореактора	Q^{BX}	м ³ /сут
17	Расход рециркуляционного потока нитратов	Q^P	м ³ /сут
18	Расход возвратного потока из мембранного блока	Q^B	м ³ /сут
19	Объем зоны i биореактора	V_i	м ³

$$\begin{aligned} \frac{dX_{bh1}}{dt} &= \frac{Q^P}{V_1} X_{bh2} + \frac{Q^B}{V_1} X_{bh3} - \\ &- \frac{Q^{BX} + Q^P + Q^B}{V_1} X_{bh1} + r_{bh1}(S_{no1}, S_{s1}, S_{o1}, X_{bh1}); \\ \frac{dS_{nh1}}{dt} &= \frac{Q^{BX}}{V_1} S_{nh}^{BX} + \frac{Q^P}{V_1} S_{nh2} + \\ &+ \frac{Q^B}{V_1} S_{nh3} - \frac{Q^{BX} + Q^P + Q^B}{V_1} S_{nh1} + \\ &+ r_{nh1}(S_{nh1}, S_{no1}, S_{s1}, S_{o1}, S_{nd1}, X_{ba1}, X_{bh1}); \\ \frac{dS_{no1}}{dt} &= \frac{Q^{BX}}{V_1} S_{no}^{BX} + \frac{Q^P}{V_1} S_{no2} + \\ &+ \frac{Q^B}{V_1} S_{no3} - \frac{Q^{BX} + Q^P + Q^B}{V_1} S_{no1} + \\ &+ r_{no1}(S_{no1}, S_{s1}, S_{o1}, S_{nd1}, X_{ba1}, X_{bh1}); \\ \frac{dS_{s1}}{dt} &= \frac{Q^{BX}}{V_1} S_s^{BX} + \frac{Q^P}{V_1} S_{s2} + \\ &+ \frac{Q^B}{V_1} S_{s3} - \frac{Q^{BX} + Q^P + Q^B}{V_1} S_{s1} + \\ &+ r_{ss1}(S_{no1}, S_{s1}, S_{o1}, X_{bh1}, X_{s1}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dX_{s1}}{dt} &= \frac{Q^{BX}}{V_1} X_s^{BX} + \frac{Q^P}{V_1} X_{s2} + \\ &+ \frac{Q^B}{V_1} X_{s3} - \frac{Q^{BX} + Q^P + Q^B}{V_1} X_{s1} + \\ &+ r_{xs1}(S_{no1}, S_{o1}, X_{ba1}, X_{bh1}, X_{s1}); \\ \frac{dS_{o1}}{dt} &= \frac{Q^P}{V_1} S_{o2} + \frac{Q^B}{V_1} S_{o3} - \frac{Q^{BX} + Q^P + Q^B}{V_1} S_{o1} + \\ &+ r_{o1}(S_{nh1}, S_{s1}, S_{o1}, X_{ba1}, X_{bh1}); \\ \frac{dS_{nd1}}{dt} &= \frac{Q^P}{V_1} S_{nd2} + \frac{Q^B}{V_1} S_{nd3} - \frac{Q^{BX} + Q^P + Q^B}{V_1} S_{nd1} + \\ &+ r_{snd1}(S_{no1}, S_{o1}, X_{ba1}, X_{bh1}, X_{nd1}, X_{s1}); \\ \frac{dX_{nd1}}{dt} &= \frac{Q^P}{V_1} X_{nd2} + \frac{Q^B}{V_1} X_{nd3} - \frac{Q^{BX} + Q^P + Q^B}{V_1} X_{nd1} + \\ &+ r_{xnd1}(S_{no1}, S_{o1}, X_{ba1}, X_{bh1}, X_{nd1}, X_{s1}); \\ \frac{dS_{щел1}}{dt} &= \frac{Q^{BX}}{V_1} S_{щел}^{BX} + \frac{Q^P}{V_1} S_{щел2} + \\ &+ \frac{Q^B}{V_1} S_{щел3} - \frac{Q^{BX} + Q^P + Q^B}{V_1} S_{щел1} + \\ &+ r_{щел1}(S_{nh1}, S_{no1}, S_{s1}, S_{o1}, S_{nd1}, X_{ba1}, X_{bh1}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dX_{p1}}{dt} &= \frac{Q^D}{V_1} X_{p2} + \frac{Q^B}{V_1} X_{p3} - \\ &+ \frac{Q^{BX} + Q^D + Q^B}{V_1} X_{p1} + r_{p1}(X_{ba1}, X_{bh1}); \\ C_{ХПК1} &= S_{s1} + S_i + X_{s1} + X_i + X_{xba1} + X_{xbh1}. \end{aligned} \quad (1)$$

Модель зоны Н (нитрификация):

$$\begin{aligned} \frac{dX_{ba2}}{dt} &= \frac{Q^{BX} + Q^D + Q^B}{V_2} (X_{ba1} - X_{ba2}) + \\ &+ r_{ba2}(S_{nh2}, S_{o2}, X_{ba2}); \\ \frac{dX_{bh2}}{dt} &= \frac{Q^{BX} + Q^D + Q^B}{V_2} (X_{bh1} - X_{bh2}) + \\ &+ r_{bh2}(S_{no2}, S_{s2}, S_{o2}, X_{bh2}); \\ \frac{dS_{nh2}}{dt} &= \frac{Q^{BX} + Q^D + Q^B}{V_2} (S_{nh1} - S_{nh2}) + \\ &+ r_{nh2}(S_{nh2}, S_{no2}, S_{s2}, S_{o2}, S_{nd2}, X_{ba2}, X_{bh2}); \\ \frac{dS_{no2}}{dt} &= \frac{Q^{BX} + Q^D + Q^B}{V_2} (S_{no1} - S_{no2}) + \\ &+ r_{no2}(S_{no2}, S_{s2}, S_{o2}, S_{nd2}, X_{ba2}, X_{bh2}); \\ \frac{dS_{s2}}{dt} &= \frac{Q^{BX} + Q^D + Q^B}{V_2} (S_{s1} - S_{s2}) + \\ &+ r_{ss2}(S_{no2}, S_{s2}, S_{o2}, X_{bh2}, X_{s2}); \\ \frac{dX_{s2}}{dt} &= \frac{Q^{BX} + Q^D + Q^B}{V_2} (X_{s1} - X_{s2}) + \\ &+ r_{xs2}(S_{no2}, S_{o2}, X_{ba2}, X_{bh2}, X_{s2}); \\ \frac{dS_{o2}}{dt} &= \frac{Q^{BX} + Q^D + Q^B}{V_2} (S_{o1} + S_o^{BX} - S_{o2}) + \\ &+ r_{o2}(S_{nh2}, S_{s2}, S_{o2}, X_{ba2}, X_{bh2}); \\ \frac{dS_{nd2}}{dt} &= \frac{Q^{BX} + Q^D + Q^B}{V_2} (S_{nd1} - S_{nd2}) + \\ &+ r_{snd2}(S_{no2}, S_{o2}, X_{ba2}, X_{bh2}, X_{nd2}, X_{s2}); \\ \frac{dX_{nd2}}{dt} &= \frac{Q^{BX} + Q^D + Q^B}{V_2} (X_{nd1} - X_{nd2}) + \\ &+ r_{xnd2}(S_{no2}, S_{o2}, X_{ba2}, X_{bh2}, X_{nd2}, X_{s2}); \\ \frac{dS_{щел2}}{dt} &= \frac{Q^{BX} + Q^D + Q^B}{V_2} (S_{щел1} - S_{щел2}) + \\ &+ r_{щел2}(S_{nh2}, S_{no2}, S_{s2}, S_{o2}, S_{nd2}, X_{ba2}, X_{bh2}); \\ \frac{dX_{p2}}{dt} &= \frac{Q^{BX} + Q^D + Q^B}{V_2} (X_{p1} - X_{p2}) + \\ &+ r_{p2}(X_{ba2}, X_{bh2}); \\ C_{ХПК2} &= S_{s2} + S_i + X_{s2} + X_i + X_{xba2} + X_{xbh2}. \end{aligned} \quad (2)$$

В мембранном блоке происходит разделение потока на возвратный и выходной. Модель возвратного потока включает все компоненты потока иловой смеси из биореактора. В потоке фильтрата присутствуют только растворенные компоненты смеси. Таким образом, концентрация нерастворимых веществ в возвратном потоке увеличивается обратно пропорционально расходу.

Модель возвратного потока:

$$\begin{aligned} X_{ba3}Q^B &= X_{ba2}Q^{BX}; \quad X_{bh3}Q^B = X_{bh2}Q^{BX}; \\ S_{nh3} &= S_{nh2}; \quad S_{no3} = S_{no2}; \quad S_{s3} = S_{s2}; \\ X_{s3}Q^B &= X_{s2}Q^{BX}; \quad S_{o3} = S_{o2}; \quad S_{nd3} = S_{nd2}; \\ X_{nd3}Q^B &= X_{nd2}Q^{BX}; \quad S_{щел3} = S_{щел2}; \\ Q^B X_{p3} &= X_{p2}Q^{BX}; \\ C_{ХПК3} &= S_{s3} + S_i + X_{s3} + X_i + X_{xba3} + X_{xbh3}. \end{aligned} \quad (3)$$

Модель выходного потока фильтрата:

$$\begin{aligned} X_{ba4} &= 0; \quad X_{bh4} = 0; \quad S_{nh4} = S_{nh2}; \\ S_{no4} &= S_{no2}; \quad S_{s4} = S_{s2}; \quad X_{s4} = 0; \quad S_{o4} = S_{o2}; \\ S_{nd4} &= S_{nd2}; \quad X_{nd4} = 0; \\ S_{щел4} &= S_{щел2}; \quad X_{p4} = 0; \quad C_{ХПК4} = S_{s2} + S_i. \end{aligned} \quad (4)$$

В биореакторе зоны нитрификации и денитрификации принимаются одинаковыми. Соотношение входного и возвратного потоков определяется из технических характеристик ультрафильтрационных мембранных блоков.

Постановка задачи

Для каждой составляющей загрязнения при технологическом расчете системы очистки используются фиксированные средние показатели, по которым вычисляют конструктивные параметры реактора и значение поступающего расхода. Анализ литературных источников [4–6] показал, что для ТП многозонного реактора с рециклом и подачей кислорода принятые за рубежом нормы очистки сточных вод на порядок хуже, чем требуется по нормам, принятым в Российской Федерации [7].

Поскольку состав сточных вод на выходе реактора является многокомпонентным и концентрации компонентов меняются в различных диапазонах, выделяются три составляющие субстрата: аммоний, нитраты и быстро биологически разлагаемое вещество. На основе данных, полученных с 28 очистных сооружений в России и странах ближнего зарубежья, были найдены минималь-

ные, средние и максимальные по уровню значению загрязнений по аммонiu, нитратам и легко биологически разлагаемому веществу, определяющие режимы работы системы. Объем всех зон реактора принимался одинаковым и равным 100 м³. Как показали исследования, при подаче на вход реактора даже «средних» загрязнений получаемая на выходе концентрация аммония оказывалась выше установленных норм, что требует обеспечения эффективного его удаления из системы.

Ставится задача разработки ММ управляемых ТП очистки сточной воды, удовлетворяющих требованиям СНиП и показателям качества процессов управления на основе использования логико-динамического регулятора. Кроме того, необходимо, чтобы производительность установки очистки была максимальна при удовлетворении этих условий.

Показатели качества процессов управления

Установившиеся и переходные процессы в динамических системах биоочистки, представленные нелинейными моделями (1)–(4), характеризуются определенными показателями качества управления.

Одними из основных показателей качества, которые непосредственно характеризуют степень очистки сточных вод при использовании ММ ASM1, являются установившиеся ошибки по концентрациям аммония $e_{nh}^{уст}$, нитратов $e_{no}^{уст}$ и ХПК $e_{ХПК}^{уст}$:

$$\begin{aligned} e_{nh}^{уст} = S_{nh}^3 - S_{nh}^{уст} \geq 0; \quad e_{no}^{уст} = S_{no}^3 - S_{no}^{уст} \geq 0; \\ e_{ХПК}^{уст} = S_{ХПК}^3 - S_{ХПК}^{уст} \geq 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где S_{nh}^3 , S_{no}^3 , $S_{ХПК}^3$ — заданные значения концентраций (уставки) по аммонiu, нитратам и ХПК; $S_{nh}^{уст}$, $S_{no}^{уст}$, $S_{ХПК}^{уст}$ — установившиеся значения концентраций, подлежащие измерению.

На выходные концентрации накладываются ограничения в виде $S_{nh} \leq S_{nh}^{доп}$, $S_{no} \leq S_{no}^{доп}$, $S_{ХПК} \leq S_{ХПК}^{доп}$, где $S_{nh}^{доп}$, $S_{no}^{доп}$, $S_{ХПК}^{доп}$ — допустимые по СНиП установившиеся значения.

При использовании ПИ (ПИД)-регуляторов по ошибкам уставки принимают значения $S_{nh}^3 = S_{nh}^{доп}$, $S_{no}^3 = S_{no}^{доп}$, $S_{ХПК}^3 = S_{ХПК}^{доп}$. В случае использования П-регуляторов по ошибкам для уставок можно принять $S_{nh}^3 < S_{nh}^{доп}$, $S_{no}^3 < S_{no}^{доп}$, $S_{ХПК}^3 < S_{ХПК}^{доп}$.

К важному динамическому показателю очистки относят максимальное положительное отклонение концентрации от установившегося значения. При регулировании процессов это значение

не должно превышать 5 % от допустимого значения:

$$\begin{aligned} S_{nh}^{max} \leq 1,05 \cdot S_{nh}^{доп}; \quad S_{no}^{max} \leq 1,05 \cdot S_{no}^{доп}; \\ S_{ХПК}^{max} \leq 1,05 \cdot S_{ХПК}^{доп}. \end{aligned} \quad (6)$$

Другим важным динамическим показателем очистки, характеризующим скорость ее протекания, является время установления $t^{уст}$ переходного процесса, который требуется минимизировать:

$$t^{уст} = \min. \quad (7)$$

Установившееся значение расхода субстрата на входе реактора $Q^{уст}$ целесообразно максимизировать. Это требование обусловлено необходимостью переработки установкой определенного количества сточных вод, т. е. производительность установки должна быть адекватна требованиям нагрузки, что обеспечивает очистку подаваемых стоков в течение продолжительного периода. Теми же соображениями обусловлено требование максимизации интегрального показателя входного расхода, характеризующего суммарный объем стоков, прошедших через систему за период очистки t_u :

$$V_{\Sigma}^{BX} = \int_0^{t_u} Q^{BX} dt = \max. \quad (8)$$

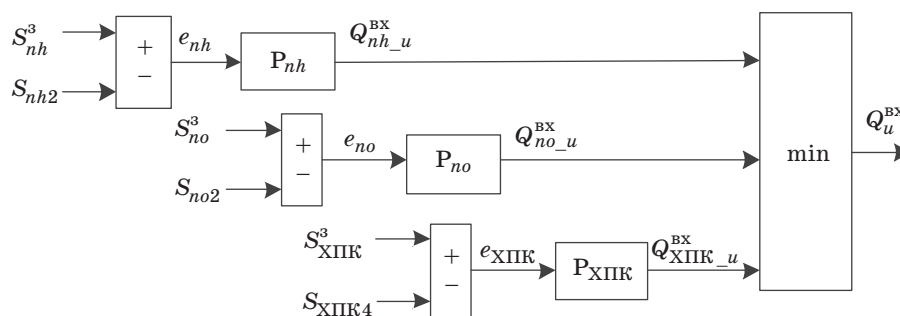
В случае неоднозначности выбора настроек регулирования вводятся в рассмотрение также интегральные показатели загрязнений, характеризующие суммарное покомпонентное количество загрязнений на выходе системы за период очистки t_u , которые подлежат минимизации в результате регулирования:

$$\begin{aligned} S_{nh\Sigma} = \int_0^{t_u} S_{nh2} dt = \min; \quad S_{no\Sigma} = \int_0^{t_u} S_{no2} dt = \min; \\ S_{ХПК\Sigma} = \int_0^{t_u} S_{ХПК4} dt = \min. \end{aligned} \quad (9)$$

Приведенные показатели качества являются наиболее характерными для рассматриваемых технологических процессов.

Методика параметрической настройки

Методика отражает порядок настройки логико-динамического регулятора системы управления биореактора с выносным мембранным блоком фильтрации. Регулятор входного расхода (рис. 3) состоит из трех ПИД-субрегуляторов P . Его работа основана на выборе минимального управляющего воздействия.



■ Рис. 3. Схема регулятора

Методика настройки ПИД-субрегуляторов осуществляется в соответствии с показателями качества, приведенными ранее, и сводится к следующему.

1. На вход системы подается субстрат со «средними» концентрациями аммония, нитратов и легко биологически разлагаемого вещества среднего уровня. Коэффициенты интегральной и дифференциальной составляющих субрегуляторов полагаются равными нулю. Отслеживаются значения аммония, нитратов, ХПК на выходах системы, управляющих воздействий каждого субрегулятора, а также результирующего управляющего воздействия регулятора. По графикам процессов изменения концентраций определяется выполнение условий (5).

Если условия (5) нарушаются, то по графикам управляющих воздействий субрегуляторов выявляется регулятор, выход которого совпадает с результирующим воздействием, т. е. воздействие которого является минимальным. Этот регулятор считается ведущим. Воздействие ведущего регулятора определяется формулой

$$Q_u^{BX} = \min(Q_i^{BX}), \quad i = 1, 2, 3,$$

где Q_i^{BX} — воздействие i -го регулятора, причем $i = 1$ для регулятора концентрации аммония, $i = 2$ — концентрации нитратов и $i = 3$ — концентрации ХПК.

2. Для ведущего регулятора производится увеличение пропорционального коэффициента и сравнение показателей качества процессов в порядке приоритетности с показателями, полученными в п. 1.

3. Если в соответствии с (5) значения установившихся ошибок приблизились к нулевым значениям, настройки п. 2 считаются лучше, чем в п. 1.

4. Если значения ошибок не изменились, то берется следующий по приоритетности показатель качества, и в соответствии с (6) определяются лучшие настройки. В случае невозможности определить лучший вариант, сравнение продолжается по каждому следующему показателю качества с (7) по (9).

5. Если увеличение коэффициента приводит к ухудшению показателей качества процессов, то пропорциональный коэффициент следует уменьшать относительно значения, полученного в п. 1. Далее сравнение настроек проводится так же, как в пп. 4 и 5.

6. Изменение пропорционального коэффициента проводится до тех пор, пока не обеспечиваются условия (5) либо по условию (5) лучшие результаты не достигаются, а в соответствии с условиями (6) или (7) изменения коэффициента не принесут лучших результатов.

7. Подключается интегральная составляющая ведущего регулятора, и показатели качества получившихся процессов сравниваются с предыдущими (лучшими) в п. 7.

8. Проводится изменение интегрального коэффициента в целях улучшения качества процессов до тех пор, пока не выполняются условия (5), а в соответствии с условиями (6) или (7) изменения коэффициента не принесут лучших результатов; в противном случае интегральная составляющая отключается.

9. Подключается дифференциальная составляющая, и настройка проводится аналогично пп. 8 и 9.

10. В процессе изменения коэффициентов (параметров) ведущий регулятор может меняться. В этом случае продолжается настройка по указанному алгоритму уже для другого ведущего регулятора.

11. При настройке необходимо отслеживать возникновение ложного ведущего регулятора. Управляющий сигнал ложного ведущего регулятора совпадает с результирующим воздействием, однако концентрация загрязнителя, на регулирование которой он направлен, гораздо ниже допустимого значения, т. е. установившаяся ошибка отрицательна, и превышения допустимого значения нет. При этом концентрация другого загрязнителя превосходит допустимое значение.

Управляющее воздействие ложного ведущего регулятора определяется условиями

$$Q_{u'}^{BX}(t) = \min(Q_i^{BX}(t)), \quad e_j^{yct} < 0, \quad i \neq j.$$

Ложный ведущий регулятор может быть настроен таким образом, что все показатели качества по регулируемой им концентрации удовлетворяются. В данном случае необходимо проводить настройку ложного ведущего регулятора таким образом, чтобы его управляющий сигнал превысил воздействие регулятора концентрации, не удовлетворяющей показателям качества. Как правило, для этого следует в несколько раз увеличить пропорциональную составляющую ложного ведущего регулятора.

После того как регулятор настроен на очистку «средних» загрязнений, аналогично производится настройка для максимальных и минимальных по уровням загрязнений (соответствующих режимов) на входе. Поскольку выделены три компонента загрязнения, то всего возможны 27 динамических ситуаций. Для каждой ситуации находятся свои оптимальные настройки субрегуляторов и свои ведущие регуляторы.

При переходе к настройкам каждой следующей динамической ситуации используются настройки той ситуации, значения концентраций загрязнений на входе которой близки к текущей, а ведущий регулятор совпадает.

Полученная серия настроек регуляторов запоминается и используется в зависимости от того, в каком из режимов (с минимальным, средним или максимальным уровнем) находится каждый из трех субстратов, причем переключение субрегуляторов происходит автоматически.

Параметрический синтез системы управления

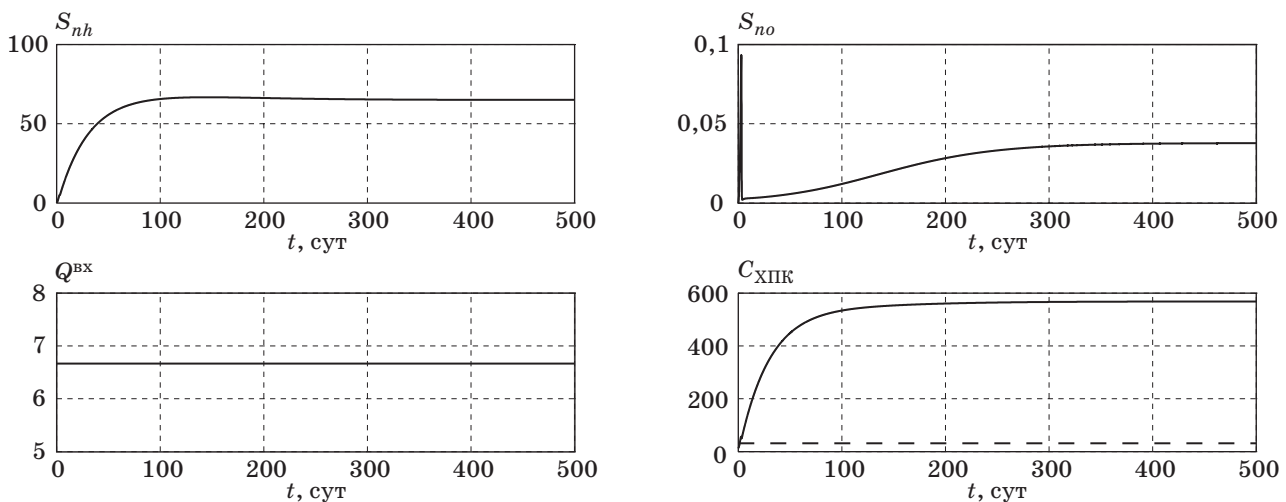
Ниже приводятся результаты исследования поведения системы биоочистки при различных уровнях загрязнений на входе.

Процесс изменения концентраций загрязнений на выходе мембранного блока при постоянном расходе на входе биореактора без регулирования отражен на рис. 4. Концентрации аммония и легко биоразлагаемого субстратов на входе максимальны, концентрация нитратов минимальна. Штриховой линией обозначена 5%-я зона допустимых концентраций. Как видно из графиков, концентрации аммония и ХПК во много раз превышают допустимые уровни.

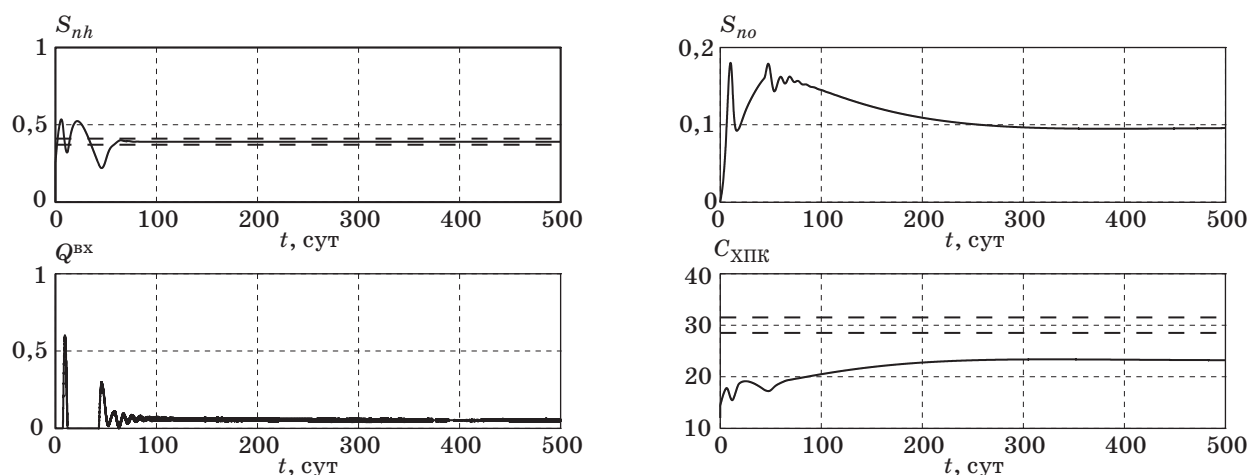
Результаты моделирования управляемых процессов удаления загрязнений из сточных вод с помощью регулятора входного расхода при наилучших настройках параметров приводятся на рис. 5. Даже в этом случае на графике концентрации аммония наблюдается отклонение от установившегося значения, что можно объяснить ограниченной скоростью роста популяции бактерий-нитрификаторов.

Графики концентраций на выходе системы без регулирования при подаче максимальной концентрации нитратов, концентрации аммония и легко биоразлагаемого субстратов на входе представлены на рис. 6. Наблюдается превышение концентрации нитратов в установившемся режиме, а также превышение концентрации по аммоний в переходном режиме.

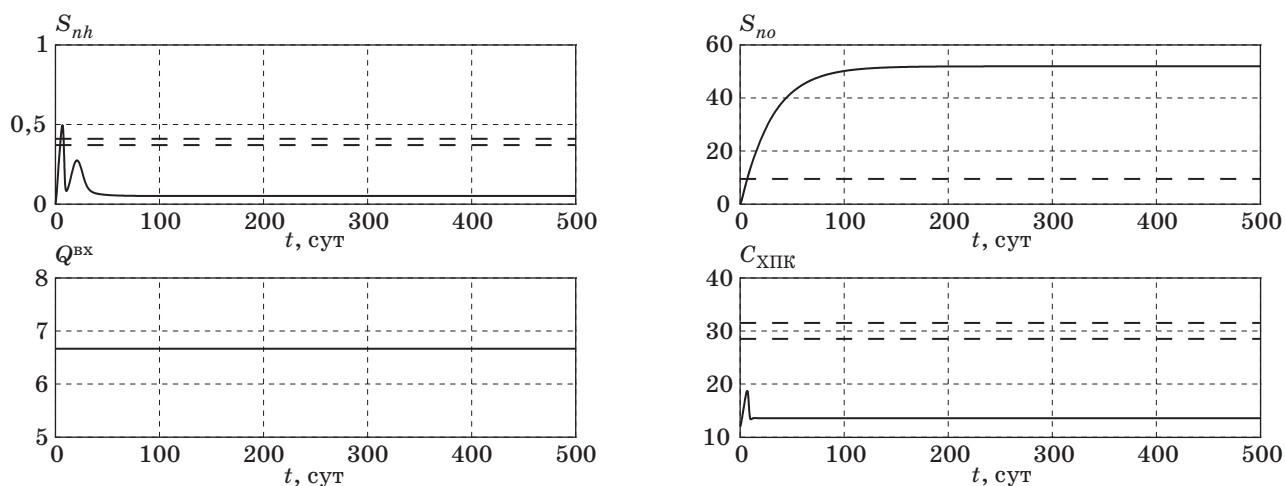
Реакцию системы управления с использованием логико-динамического регулятора демонстрируют графики на рис. 7. Значения расхода на входе стремятся к нулю при заданных входных концентрациях. Увеличить установившееся значение расхода в этом случае, а также снизить максимальное положительное отклонение концентрации аммония (см. рис. 5) возможно за счет введения дополнительных управляющих координат по расходам потока рецикла и возвратного потока, а также по концентрации растворенного кислорода.



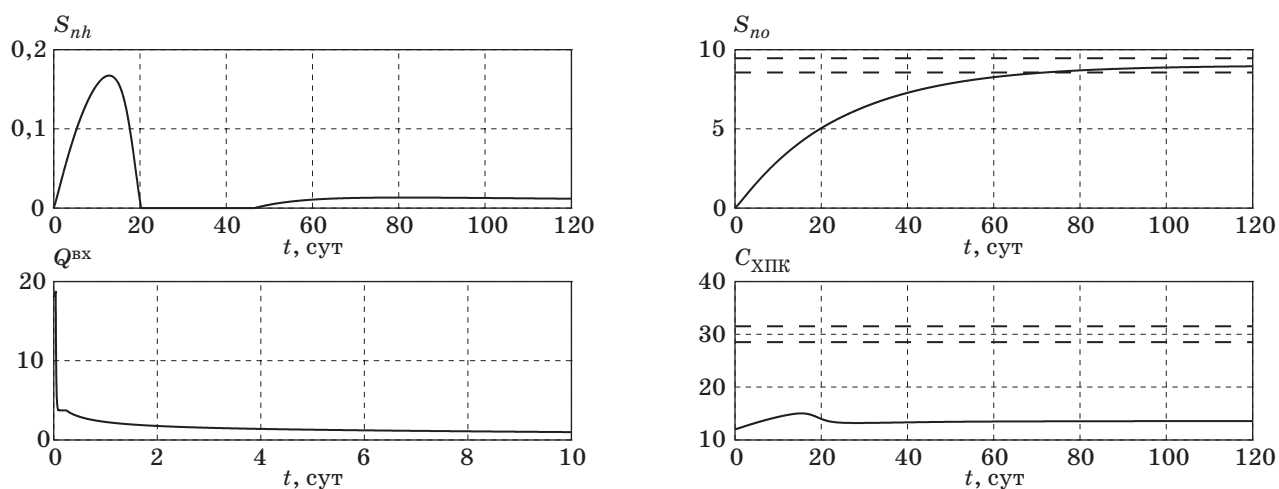
■ Рис. 4. Процессы концентраций загрязнителей и расхода в системе без регулирования



■ Рис. 5. Процессы концентраций загрязнителей и расхода в системе управления



■ Рис. 6. Процессы концентраций загрязнителей и расхода в системе без регулирования при максимальных входных уровнях



■ Рис. 7. Процессы концентраций загрязнителей и расхода в системе управления при максимальных входных уровнях

Для увеличения расхода на входе и для улучшения качества регулируемых процессов следует также применить регулирование расхода рецикла и концентрации кислорода [8].

Существует ограничение по регулированию ХПК концентрацией растворимого вещества, значения которой определяются в результате химического анализа.

Заключение

Логико-динамическое регулирование обеспечивает необходимое качество воды незави-

симо от концентраций загрязнений исходных стоков в неизменном объеме биореактора без дополнительных подстроек параметров регулирования в процессе работы системы и без внесения конструктивных изменений установки очистки стоков. Рассмотренная методика синтеза позволяет унифицировать разработку систем очистки и сократить время и средства при проектировании биореактора. Возможно снижение производительности установки в случае высоких концентраций загрязнителей, однако потери качества очистки воды на выходе не происходит.

Литература

1. Henze M., Grady C. P. L., Gujer W., Marais G. v. R., Matsuo T. Activated Sludge Model No. 1: IAWPRC Scientific and Technical Report. — London: IAWPRC, 1987. N 1. — 37 p.
2. Жмур Н. С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. — М.: АКВАРОС, 2003. — 512 с.
3. Хенце М., Армоэс П., Ля-Кур-Янсен Й., Арван Э. Очистка сточных вод. — М.: Мир, 2009. — 480 с.
4. Гордеева Ю. Л., Гордеев Л. С. Математическая модель непрерывного процесса в биореакторе с рециклом субстрата и биомассы // Вестник АГТУ. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. 2013. № 2. С. 9–18.
5. Weijers S. R. Modelling, Identification and Control of Activated Sludge Plants for Nitrogen Removal. — Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2000. — 235 p.
6. Stahl T., Duffy G., Kestel S., Gray M. Dissolved Oxygen Control Based in Real-Time Oxygen Uptake Rate Estimation // Florida Water Resources Journal. 2013. N 4. P. 50–53.
7. СНиП 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения. — М.: ОАО «ЦПП», 2012. — 97 с.
8. Грудяева Е. К., Душин С. Е. Моделирование управляемых технологических процессов нитрификации и денитрификации в биологической очистке сточных вод// Проблемы автоматизации и управления в технических системах: сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф., Пенза, 19–21 мая 2015 г./ под ред. М. А. Щербакова. Пенза: Изд-во ПГУ, 2015. Т. 1. С. 351–355.

UDC 681.54

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.4.59

Synthesizing a Control System for Removing Nitrogen Compounds from Wastewater

Grudyaeva E. K.^a, Post-Graduate Student, lizayo@yandex.ru

^aSaint-Petersburg State Electrotechnical University «LETI», 5, Prof. Popov St., 197376, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: The existing systems of sewage treatment by activated sludge are used for a narrow range of pollution concentrations. Control can expand the range; however, when the water composition changes at the system entrance or when the environmental conditions vary, the control parameters have to be continuously readjusted. **Purpose:** The goal of this work is synthesizing a control system with dynamic logic to remove contaminants in a wide range of concentrations. **Results:** On the base of ASM1 mathematical model description, a scheme of interaction between biochemical reaction components is developed. A controllable mathematical model is presented for removing nitrogen compounds in a two-zone bioreactor with recycling of nitrates, a block of ultrafiltration membranes and a returnable sludge stream towards the first zone. Process quality indices are introduced for the biological wastewater treatment control system. On their basis, a technique of parametrical setup of the regulator with logically reconstructed structure is developed. For the regulators, the concepts of a leader and a false leader are introduced. According to the developed model, a computer model is constructed in MatLab/Simulink environment. The modeling results demonstrate the possibility of high-quality cleaning when the levels of entrance multicomponent pollutions change in a wide range in a predefined invariable volume of the bioreactor. **Practical relevance:** Using the logic-dynamic regulator with optimum settings of parameters helps to provide admissible output concentration of ammonium, nitrates and COD at all the operating modes of the control system.

Keywords — Nitrification, Denitrification, Activated Sludge, Two-Zone Bioreactor, Recirculation Stream, Mathematical Modeling, ASM1, Logic-Dynamic Regulator.

References

1. Henze M., Grady C. P. L., Gujer W., Marais G. v. R., Matsuo T. Activated Sludge Model No. 1. IAWPRC Scientific and Technical Report. London: IAWPRC, 1987, no. 1. 37 p.
2. Jmour N. S. *Tekhnologicheskie i biokhimicheskie protsessy ochistki stochnykh vod na sooruzheniakh s aerotankami* [Technological and Biochemical Processes of Waste Water Treatment on Treatment Plants with Aerotanks]. Moscow, AKUAROS Publ., 2003. 512 p. (In Russian).
3. Henze M., Harremoës P., La Cour Jansen J., Arvin E. *Wastewater Treatment. Biological and Chemical Processes*. Berlin, Springer-Verlag, 1997. 383 p.
4. Gordeeva Y. L., Gordeev L. S. Mathematical Model for Continuous Process in Bioreactor with Substrate and Biomass Recycling. *Vestnik AGTU, Ser. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika*, 2013, no. 2, pp. 9–18 (In Russian).
5. Weijers S. R. *Modelling, Identification and Control of Activated Sludge Plants for Nitrogen Removal*. Eindhoven, Technische Universiteit Eindhoven, 2000. 235 p.
6. Stahl T., Duffy G., Kestel S., Gray M. Dissolved Oxygen Control Based in Real-Time Oxygen Uptake Rate Estimation. *Florida Water Resources Journal*, 2013, no. 4, pp. 50–53.
7. Construction Norms and Regulations 2.04.03-85. Sewerage. External Networks and Constructions. Moscow, OAO "TsPP" Publ., 2012. 97 p. (In Russian).
8. Grudyaeva E. K., Dushin S. E. Modelling of Controlled Technological Processes of Nitrification and Denitrification in a Biological Wastewater Treatment. *Sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Problemy avtomatizatsii i upravleniia v tekhnicheskikh sistemakh"* [Proc. Int. Conf. "Problems of Automation and Control in Technical Systems"]. Penza, 2015, vol. 1, pp. 351–355 (In Russian).

Научный журнал
«ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ»
выходит каждые два месяца.

Стоимость годовой подписки (6 номеров) для подписчиков России — 4800 рублей, для подписчиков стран СНГ — 5400 рублей, включая НДС 18%, таможенные и почтовые расходы.

Подписку на печатную версию журнала можно оформить в любом отделении связи по каталогу:

«Роспечать»: № 48060 — годовой индекс, № 15385 — полугодовой индекс,

а также через посредство подписных агентств:

«Северо-Западное агентство „Прессинформ“»

Санкт-Петербург, тел.: (812) 335-97-51, 337-23-05,

эл. почта: press@crp.spb.ru, zajavka@crp.spb.ru,

сайт: <http://www.pinform.spb.ru>

«МК-Периодика» (РФ + 90 стран)

Москва, тел.: (495) 681-91-37, 681-87-47,

эл. почта: export@periodicals.ru, сайт: <http://www.periodicals.ru>

«Информнаука» (РФ + ближнее и дальнее зарубежье)

Москва, тел.: (495) 787-38-73, эл. почта: informnauka3@yandex.ru,

сайт: <http://www.informnauka.com>

«Деловая пресса»

Москва, тел.: (495) 962-11-11, эл. почта: podpiska@delpress.ru,

сайт: <http://delpress.ru/contacts.html>

«Коммерсант-Курьер»

Казань, тел.: (843) 291-09-99, 291-09-47, эл. почта: kazan@komcur.ru,

сайт: <http://www.komcur.ru/contracts/kazan/>

«Урал-Пресс» (филиалы в 40 городах РФ)

Сайт: <http://www.ural-press.ru>

«Идея» (Украина)

Сайт: <http://idea.com.ua>

«BTL» (Узбекистан)

Сайт: <http://btl.sk.uz/ru/cat17.html> и др.

На электронную версию нашего журнала (все выпуски, годовая подписка, один выпуск, одна статья)

вы можете подписаться на сайтах НЭБ: <http://elibrary.ru>;

РУКОНТ: <http://www.rucont.ru>; ИВИС: <http://www.ivis.ru/>

Полнотекстовые версии журнала за 2002–2014 гг.

в свободном доступе на сайте журнала (<http://www.i-us.ru>),

НЭБ (<http://www.elibrary.ru>)

и Киберленинки (<http://cyberleninka.ru/journal/n/informatsionno-upravlyayuschiesistemy>).

Печатную версию архивных выпусков журнала за 2003–2014 гг. вы можете заказать в редакции по льготной цене.