

ОКРЕСТНОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

© А. М. Шмырин¹⁾, И. А. Седых¹⁾, А. М. Сметанникова¹⁾, Е. Ю. Никифорова²⁾

¹⁾ Липецкий Государственный Технический Университет
398600, Российская Федерация, г. Липецк ул. Московская, 30
E-mail: kaf-vm@stu.lipetsk.ru

²⁾ ОГУП «Липецкоблводоканал»
398059, Российская Федерация, г. Липецк, ул. Коммунальная, 12, пом. 1
E-mail: ogt@rkvv.ru

В работе даны определения производственных и хозяйственных сточных вод, перечислены их основные виды и состав. Описана основная задача очистных сооружений, представлена система очистки сточных вод, приведены ее компоненты. Цель написания данной работы заключается в прогнозировании состава смешанных сточных вод, поступающих от населения и промышленных предприятий в централизованную систему водоотведения, после очистки на основе динамических линейных и квадратичных окрестностных моделей. Работа актуальна, так как перед сливом сточных вод в водоем необходимо убедиться, что содержащиеся в их составе примеси и загрязняющие вещества не превышают допустимой нормы. В работе процесс очистки сточных вод представлен в виде динамической окрестностной модели, состоящей из пяти узлов. Рассмотрены линейные и квадратичные динамические окрестностные модели. Приведены уравнения пересчета состояний и выходов для промежуточных и выходных узлов окрестностных моделей. Выполнена идентификация линейных и квадратичных динамических окрестностных моделей очистки сточных вод, вычислены средние абсолютные ошибки идентификации. Произведено сравнение результатов линейной и квадратичной динамических окрестностных моделей и сделан вывод.

Ключевые слова: динамические окрестностные модели; сточные воды; очистные сооружения; линейная и квадратичная окрестностные модели

Введение

Очистные сооружения предназначены для очистки сточных вод от минеральных и биологических загрязнений. В процессе промышленного и хозяйственного использования вода загрязняется настолько, что ее качество не соответствует качеству природного источника, откуда она первоначально была взята. Такую воду, в состав которой входят различные примеси, называют сточной.

Использование и сброс в водоем сточных вод невозможен без их очистки. Для этого применяют очистные сооружения, направленные на уменьшение количества загрязнений сточных вод.

В [1] для моделирования процесса очистки сточных вод были применены билинейные окрестностные модели, основные принципы которых изложены в [1–3]. Окрестностные модели в общем случае являются обобщением дискретных моделей [4–6]. В статье предлагается использование динамических линейных [7–8] и квадратичных окрестностных моделей.

1. Сточные воды. Основные понятия

Смешанные сточные воды представляют собой совокупность любых вод и атмосферных осадков, образованных в быту и промышленных предприятиях, свойства и состав которых оказались не востребуемыми или ухудшились в результате деятельности человека, вследствие чего их необходимо очищать [9–11].

В состав загрязнений производственных и хозяйственных сточных вод входят минеральные, органические примеси и их смеси, биологические примеси. Минеральные в своем составе содержат компоненты песка, глины и других пород ископаемых. Основные составляющие органических примесей – вещества растительного и животного мира (бумажная продукция, растительные масла, остатки плодов и др.); нефтепродукты, пестициды, тяжелые металлы, фенолы и др. В состав биологических примесей входят микроорганизмы (вирусы, бактерии), растения (водоросли), дрожжи, плесневые грибки и др.

Основной задачей очистных сооружений является очистка сточных вод до предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ, установленных для водных объектов рыбохозяйственного значения и которые не будут оказывать негативного воздействия на водный объект в дальнейшем.

2. Система очистки сточных вод

Для очистки промышленных и хозяйственных сточных вод используют очистные сооружения, которые представляют собой комплекс оборудования, состоящего из узлов и механизмов, емкостей, контрольно-измерительных приборов, системы управления, кабельного и трубопроводного материала, установленных в технологическую цепочку для последовательного выполнения операций по очистке сточных вод от загрязнений, работающего в автоматическом режиме.

Состав очистных сооружений: решетки с прозором между стержнями 10 мм для отделения крупного мусора; аэрируемые песколовки для удаления песка; первичные отстойники для отстаивания и удаления плавающих веществ (жиры, нефтепродукты); резервуар-усреднитель – усреднение стоков по количественному расходу и показаниям РН; биореакторы типа SBR – биологическая очистка с процессами нитри-денитрификации; промежуточный резервуар – накопление условно чистой воды перед очисткой на фильтрах доочистки и установке УФО; резервуар чистой воды перед сбросом в водный объект.

По существующему самотечному коллектору сточные воды подаются в здание решеток, затем по открытому каналу сточные воды подаются на аэрируемые песколовки. Осевший в нижней части песок откачивается погружными насосами на установки по отжиму в здание песковых бункеров, а сточные воды далее поступают на первичные отстойники.

После первичных отстойников сточные воды по системе самотечных открытых каналов и коллектору поступают в резервуар-усреднитель и далее через перекачивающую насосную станцию сточные воды подаются на биологические реакторы типа SBR. Очистка сточных вод в биореакторах осуществляется с помощью активного ила, жизнеспособность которого поддерживается кислородом воздуха. Подача воздуха в данные резервуары осуществляется воздуходувками равномерно через аэрационную систему, смонтированную в донной части биореактора. В биологических реакторах происходит основной процесс удаления загрязнений из сточных вод. Избыточный аэробный ил насосами откачивается в илоуплотнитель.

Условно чистые воды подаются на резервуар-накопитель. Из накопителя вода подается на финальную очистку на песчаные фильтры и ультрафиолетовое обеззараживание. Очищенные стоки самотеком поступают в резервуар чистой воды и после него в реку.

3. Постановка задачи параметрической идентификации динамической окрестностной системы

Смоделируем процесс очистки сточных вод с помощью динамических окрестностных систем. Выделим пять крупных узлов процесса a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 , представленных на рис. 1.

На рис. 1 показана зависимость состояний и выходов динамической окрестностной модели в каждом узле в следующий момент времени от состояний и входов в текущий момент времени, где $v_{ij} = x_{i-1,j}$.

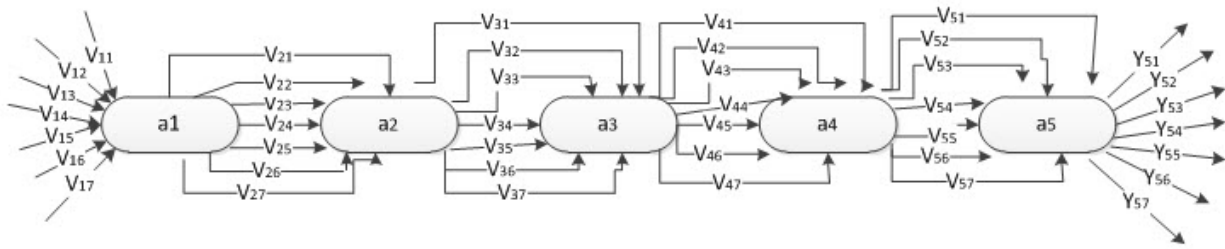


Рис. 2: Граф динамической окрестностной модели процесса очистки сточных вод

Узлы окрестностной модели $A = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\}$, где a_1 – узел входных данных, a_2 – узел первичных отстойников, a_3 – узел усреднителя, a_4 – узел биореактора № 1, a_5 – узел биореактора № 2.

Состояния каждого i -го промежуточного узла вычисляются по следующим формулам:

$$\begin{cases} x_{i1}(t+1) = \varphi_{i1}(v_{i1}(t), v_{i2}(t), v_{i3}(t), \dots, v_{i7}(t)); \\ x_{i2}(t+1) = \varphi_{i2}(v_{i1}(t), v_{i2}(t), v_{i3}(t), \dots, v_{i7}(t)); \\ x_{i3}(t+1) = \varphi_{i3}(v_{i1}(t), v_{i2}(t), v_{i3}(t), \dots, v_{i7}(t)); \\ x_{i4}(t+1) = \varphi_{i4}(v_{i1}(t), v_{i2}(t), v_{i3}(t), \dots, v_{i7}(t)); \\ x_{i5}(t+1) = \varphi_{i5}(v_{i1}(t), v_{i2}(t), v_{i3}(t), \dots, v_{i7}(t)); \\ x_{i6}(t+1) = \varphi_{i6}(v_{i1}(t), v_{i2}(t), v_{i3}(t), \dots, v_{i7}(t)); \\ x_{i7}(t+1) = \varphi_{i7}(v_{i1}(t), v_{i2}(t), v_{i3}(t), \dots, v_{i7}(t)), \end{cases}$$

где φ_{ij} – функции пересчета состояний; $i = 1, \dots, 4$; $j = 1, \dots, 7$; $v_{ij}(t)$ – входы в момент времени $t+1$, $x_{ij}(t+1)$ – состояния в момент времени $t+1$.

Выходы пятого выходного узла вычисляются по формулам:

$$\begin{cases} y_{51}(t+1) = \varphi_{51}(v_{51}(t), v_{52}(t), v_{53}(t), \dots, v_{57}(t)); \\ y_{52}(t+1) = \varphi_{52}(v_{51}(t), v_{52}(t), v_{53}(t), \dots, v_{57}(t)); \\ y_{53}(t+1) = \varphi_{53}(v_{51}(t), v_{52}(t), v_{53}(t), \dots, v_{57}(t)); \\ y_{54}(t+1) = \varphi_{54}(v_{51}(t), v_{52}(t), v_{53}(t), \dots, v_{57}(t)); \\ y_{55}(t+1) = \varphi_{55}(v_{51}(t), v_{52}(t), v_{53}(t), \dots, v_{57}(t)); \\ y_{56}(t+1) = \varphi_{56}(v_{51}(t), v_{52}(t), v_{53}(t), \dots, v_{57}(t)); \\ y_{57}(t+1) = \varphi_{57}(v_{51}(t), v_{52}(t), v_{53}(t), \dots, v_{57}(t)), \end{cases}$$

где φ_{5j} – функция пересчета выходов; $j = 1, \dots, 7$.

Сначала рассмотрим линейную динамическую окрестностную модель:

$$\begin{cases} x_{i1}(t+1) = a_{i10} + a_{i11}v_{i1}(t) + \dots + a_{i17}v_{i7}(t); \\ x_{i2}(t+1) = a_{i20} + a_{i21}v_{i1}(t) + \dots + a_{i27}v_{i7}(t); \\ x_{i3}(t+1) = a_{i30} + a_{i31}v_{i1}(t) + \dots + a_{i37}v_{i7}(t); \\ x_{i4}(t+1) = a_{i40} + a_{i41}v_{i1}(t) + \dots + a_{i47}v_{i7}(t); \\ x_{i5}(t+1) = a_{i50} + a_{i51}v_{i1}(t) + \dots + a_{i57}v_{i7}(t); \\ x_{i6}(t+1) = a_{i60} + a_{i61}v_{i1}(t) + \dots + a_{i67}v_{i7}(t); \\ x_{i7}(t+1) = a_{i70} + a_{i71}v_{i1}(t) + \dots + a_{i77}v_{i7}(t). \end{cases}$$

Приведем некоторые результаты идентификации линейной динамической окрестностной модели. Так, для узла a_1 получены следующие функции:

$$\begin{cases} x_{11}(t+1) = 174,74 + 0,45v_{11}(t) + 0,02v_{12}(t) + 1,92v_{13}(t) + \dots + 0,46v_{16}(t) + 9,51v_{17}(t); \\ x_{12}(t+1) = 414,71 + 0,1v_{11}(t) + 0,2v_{12}(t) + 2,74v_{13}(t) + \dots - 6,32v_{16}(t) + 11,02v_{17}(t); \\ x_{13}(t+1) = 1,2 + 0,002v_{11}(t) - 0,002v_{12}(t) + 0,23v_{13}(t) + \dots - 0,01v_{16}(t) - 0,05v_{17}(t); \\ x_{14}(t+1) = 6,07 - 0,005v_{11}(t) + 0,001v_{12}(t) + 0,22v_{13}(t) + \dots + 0,06v_{16}(t) - 0,32v_{17}(t); \\ x_{15}(t+1) = 1,64 + 0,005v_{11}(t) + 0,003v_{12}(t) + 1,02v_{13}(t) + \dots + 0,12v_{16}(t) - 1,58v_{17}(t); \\ x_{16}(t+1) = 3,34 + 0,004v_{11}(t) + 0,004v_{12}(t) + 0,15v_{13}(t) + \dots + 0,40v_{16}(t) - 0,41v_{17}(t); \\ x_{17}(t+1) = 5,15 - 0,006v_{11}(t) + 0,002v_{12}(t) + 0,07v_{13}(t) + \dots - 0,11v_{16}(t) + 0,39v_{17}(t). \end{cases}$$

На рис. 2 представлены значения исходных и модельных данных системы $x_{12}(t+1)$ и $\hat{x}_{12}(t+1)$, соответственно, где $X12$ – это $x_{12}(t+1)$, $X'12$ – $\hat{x}_{12}(t+1)$.

На рис. 3 показаны значения исходных и модельных данных для $x_{16}(t+1)$ первого узла линейной динамической модели, где $X'16$ – это $\hat{x}_{16}(t+1)$, $X16$ – $x_{16}(t+1)$.

Средняя относительная ошибка идентификации вычисляется по формуле:

$$A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^N \left| \frac{\varepsilon_{ij}}{x_{ij}(t+1)} \right| \cdot 100\%,$$

где N – объем выборки; $\varepsilon_{ij} = x_{ij}(t+1) - \hat{x}_{ij}(t+1)$; $i = 1, \dots, 7$; $j = 1, \dots, N$; $x_{ij}(t+1)$ – исходные данные системы; $\hat{x}_{ij}(t+1)$ – модельные данные.

По результатам моделирования была получена средняя относительная ошибка идентификации $A = 21\%$, что свидетельствует о неадекватности модели, поэтому рассмотрим квадратичную динамическую окрестностную модель. Состояния каждого i -го промежуточного узла квадратичной динамической модели вычисляются по следующей формуле:

$$x_{ip}(t+1) = a_{ip0} + \sum_{j=1}^7 a_{ipj} \cdot v_{ij}(t) + \sum_{k=1}^7 \sum_{j=k}^7 a_{ipkj} \cdot v_{ik}(t) \cdot v_{ij}(t),$$

где $i = 1, \dots, 4$; $j = 1, \dots, 7$; $p = 1, \dots, 7$.

Выходы пятого выходного узла квадратичной динамической модели вычисляются по формуле:

$$y_{5p}(t+1) = a_{5p0} + \sum_{j=1}^7 a_{5pj} \cdot v_{5j}(t) + \sum_{k=1}^7 \sum_{j=k}^7 a_{5pkj} \cdot v_{5k}(t) \cdot v_{5j}(t),$$

где $p = 1, \dots, 7$.

На рис. 4 показаны значения исходных и модельных данных для $x_{12}(t+1)$ первого узла квадратичной динамической модели, где $X12$ – это $x_{12}(t+1)$, $X'12$ – $\hat{x}_{12}(t+1)$.

На рис. 5 показаны значения исходных и модельных данных для $x_{16}(t+1)$ первого узла квадратичной динамической модели, где $X'16$ – это $\hat{x}_{16}(t+1)$, $X16$ – $x_{16}(t+1)$.

Средняя абсолютная ошибка моделирования квадратичной модели $A = 4,69\%$. Таким образом, средняя абсолютная ошибка линейной динамической модели значительно превышает среднюю абсолютную ошибку квадратичной модели.

Заключение

В работе рассмотрена система очистки промышленных и хозяйственных сточных вод. Смоделирован процесс очистки сточных вод с помощью линейных и квадратичных динамических окрестностных моделей, состоящих из пяти узлов.

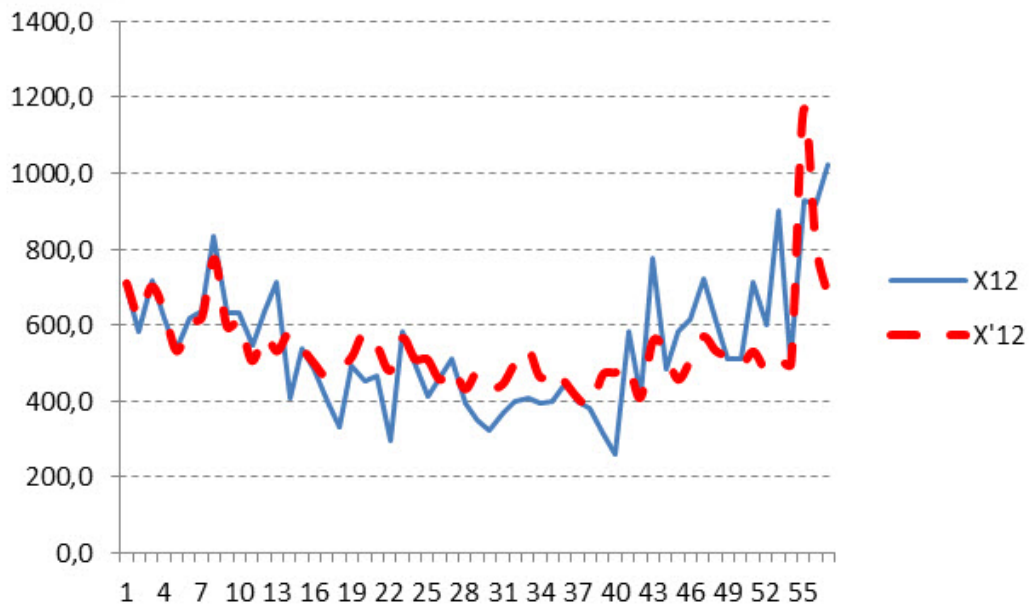


Рис. 3: Значения исходных и модельных данных линейной модели $x_{12}(t + 1)$

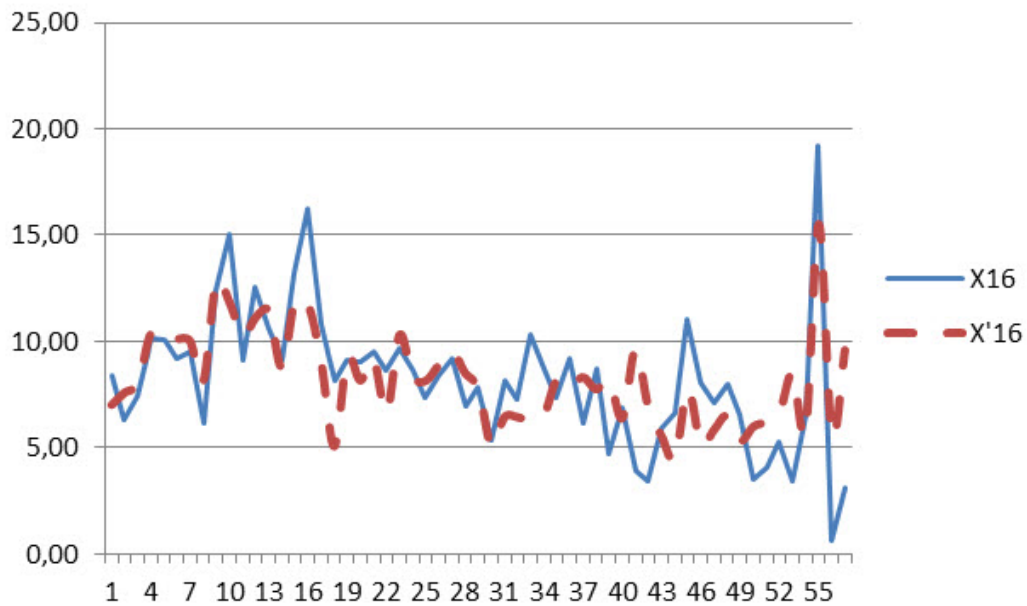


Рис. 4: Данные первого узла $x_{16}(t + 1)$ линейной динамической модели

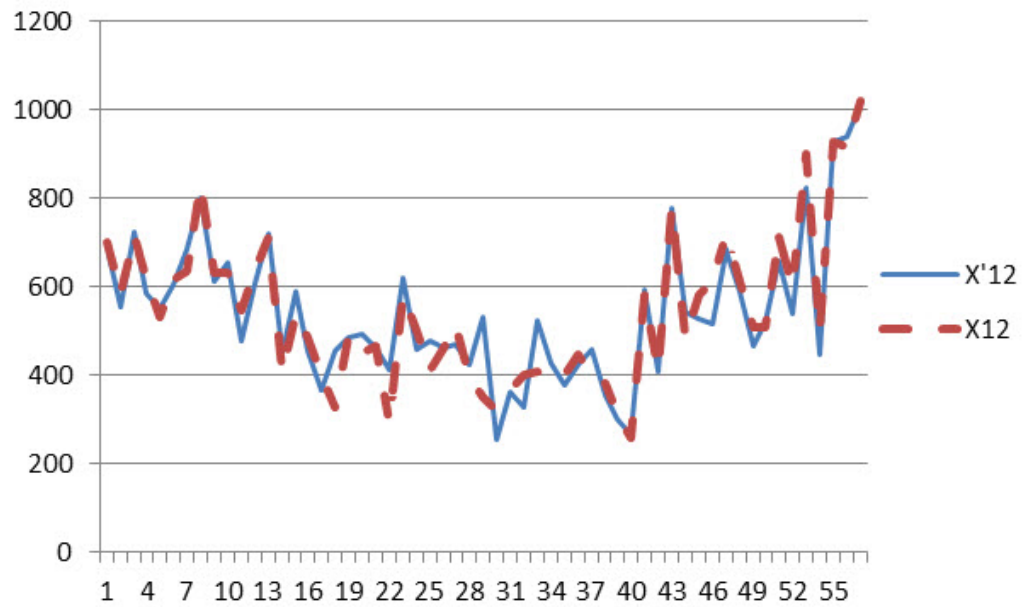


Рис. 5: Данные первого узла $x_{12}(t+1)$ квадратичной динамической модели

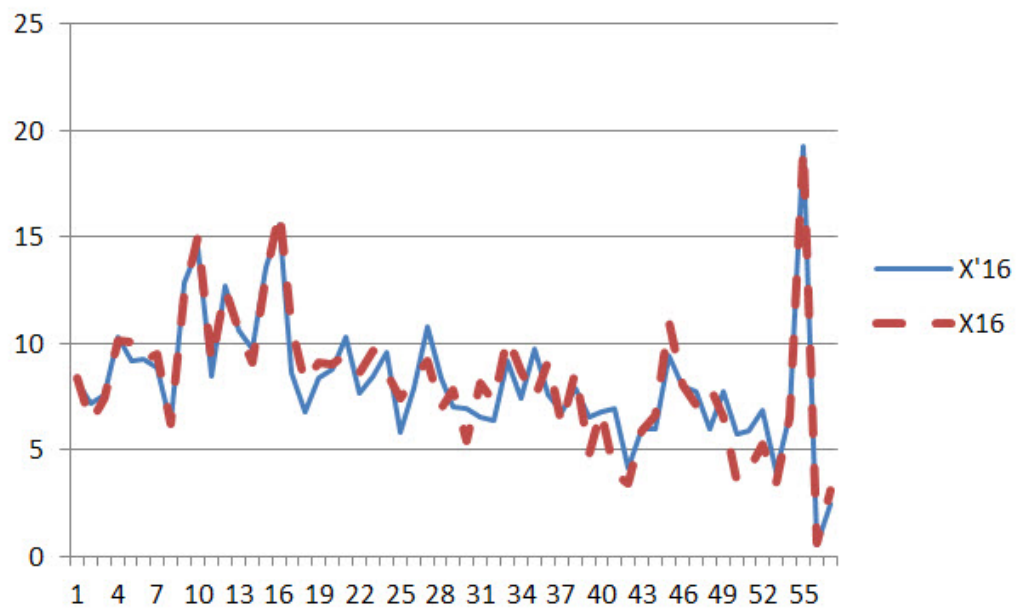


Рис. 6: Данные первого узла $x_{16}(t+1)$ квадратичной динамической модели

На основе значений средних абсолютных ошибок произведено сравнение результатов моделирования. Получено, что для прогнозирования состава сточных вод, сбрасываемых в водоем, можно рекомендовать квадратичную динамическую окрестностную модель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бломин С.Л., Шмырин А.М., Шмырина О.А.* Билинейные окрестностные системы. Липецк: ЛГТУ, 2006. 130 с.
2. *Шмырин А.М., Седых И.А.* Классификация билинейных окрестностных моделей // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2012. Т. 17. Вып. 5. С. 1366–1369.
3. *Шмырин А.М., Седых И.А., Щербаков А.П.* Общие билинейные дискретные модели // Вестник Воронежского государственного технического университета. Воронеж, 2014. Т. 10. Вып. 3-1. С. 44–49.
4. *Шмырин А.М., Седых И.А.* Дискретные модели в классе окрестностных систем // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2012. Т. 17. Вып. 3. С. 867–871.
5. *Shmyrin A., Sedykh I.* Алгоритмы идентификации и управления функционированием окрестностных систем, полученных на основе сетей Петри // Управление большими системами, 2009. Вып. 24. С. 18–33.
6. *Седых И.А.* Окрестностное моделирование мультиагентных систем // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2013. Т. 18. Вып. 5-2. С. 2667–2668.
7. *Седых И.А.* Параметрическая идентификация линейной динамической окрестностной модели // Сб. ст. Международной научно-практической конференции «Инновационная наука: прошлое, настоящее, будущее». Уфа: АЭТЕРНА, 2016. С. 12–19.
8. *Седых И.А., Сметанникова А.М.* Параметрическая идентификация окрестностной модели с помощью генетического алгоритма и псевдообращения // Интерактивная наука. 2017. Т. 4. Вып. 14. С. 113–116.
9. *Зайнуллин Р.Р., Галляутдинов А.А.* Проблемы очистки городских сточных вод // Инновационная наука. 2016. Вып. 6-2. С. 68–69.
10. *Каллимуллина Д.Д., Гафуров А.М.* Потребности в водоснабжении и водоотведении на тепловых электрических станциях // Инновационная наука. 2016. Вып. 3-3. С. 98–100.
11. *Морозенко М.И., Никулина С.Н., Черняев С.И.* Коагуляционная очистка сточных вод металлургического предприятия // Фундаментальные исследования. 2016. Вып. 12-2. С. 318–323.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-07-00854_a).

Поступила в редакцию 11 мая 2017 г

Шмырин Анатолий Михайлович, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Российская Федерация, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой высшей математики, e-mail: amsh@lipetsk.ru

Седых Ирина Александровна, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Российская Федерация, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики, e-mail: sedykh-irina@yandex.ru

Сметанникова Анастасия Михайловна, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Российская Федерация, студент, физико-технологический факультет, e-mail: n.smetannickowa@yandex.ru

Никифорова Екатерина Юрьевна, ОГУП «Липецкоблводоканал» г. Липецк, Российская Федерация, главный технолог, e-mail: niki291279@yandex.ru

NEIGHBORHOOD MODELING OF WASTEWATER TREATMENT PROCESSES

© A. M. Shmyrin¹⁾, I. A. Sedykh¹⁾, A. M. Smetannikova¹⁾, E. Yu. Nikiforova²⁾¹⁾ Lipetsk State Technical University

30 Moskovskaya St., Lipetsk, Russian Federation, 398600

E-mail: kaf-vm@stu.lipetsk.ru

²⁾ Regional State Unitary Enterprise "Lipetskoblvodokanal"

12 Kommunalnaya St., Lipetsk, Russian Federation, 398059

E-mail: ogt@rkvv.ru

The article presents the definition of industrial and domestic sewage, their principal and staff are listed. The main task of the wastewater treatment facilities are described, the sewage treatment plant, its components are given. The purpose of the writing of this work lies in the prediction of the composition of mixed waste water, which is coming from households and industrial enterprises in a centralized system of water removal, after cleaning on the basis of dynamic linear and quadratic neighborhood models. The work is relevant because before draining waste waters into the pond, you must ensure that the information contained in their composition of impurities and contaminants do not exceed acceptable norms. In the article is presented the wastewater treatment process in the form neighborhood dynamic model, consisting of five nodes. The dynamic linear and quadratic neighborhood models are reviewed. The equations of recalculation of conditions and outputs for the intermediate and output nodes neighborhood models are given. The identification of dynamic linear and quadratic neighborhood models of wastewater treatment are performed, calculated average absolute errors for identification. The comparison of the results of dynamic linear and quadratic neighborhood models and the conclusion are produced.

Key words: dynamic neighborhood models; sewage; sewage treatment plant; linear and quadratic neighborhood models

REFERENCES

1. Blyumin S.L., Shmyrin A.M., Shmyrina O.A. Bilinear neighborhood system. Lipetsk, LGTU, 2006.
2. Shmyrin A.M., Sedykh I.A. Classification of bilinear neighborhood system // Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences. Tambov, 2012. V. 17. Iss. 5. P. 1366–1369.
3. Shmyrin A.M., Sedykh I.A., Shcherbakov A.P. General bilinear discrete models // Vestnik Voronezh state technical university. Voronezh, 2014. V. 10. №. 3-1. P. 44–49.
4. Shmyrin A.M., Sedykh I.A. Discrete models in the class of neighborhood systems // Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences. Tambov, 2012. V. 17. Iss. 3. P. 867–871.
5. Shmyrin A., Sedykh I.A. Identification and control algorithms of functioning for neighborhood systems based on petri nets // Upravlenie Bol'shimi Sistemami, 2009. № 24. S. 18–33.
6. Sedykh I.A. Neighborhood modeling multi-agent systems // Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences. Tambov, 2013. V. 18. Iss. 5-2. P. 2667–2668.
7. Sedykh I.A. Parametric identification of linear dynamic neighborhood models // Collection of articles of International scientific-practical conference "Innovation science: the past, present, future". Ufa, 2016.
8. Sedykh I.A., Smetannikova A.M. Parametric identification of dynamic neighborhood model using the genetic algorithm and the pseudoinverse // Interactive science. 2017. V. 4. № 14. P. 113–116.
9. Zainullin R.R., Galyautdinov A.A. Problems of urban wastewater // Innovation science. 2016. № 6-2. P. 68–69.
10. Kalimullina D.D., Gafurov A.M. The needs in water supply and sanitation in thermal power stations // Innovation science. 2016. № 3-3. P. 98–100.

11. *Morozenko M.I., Nikulina S.N., Chernyaev S.I.* Coagulation wastewater treatment metallurgical enterprises // Fundamental research. 2016. № 12-2. P. 318–323.

ACKNOWLEDGEMENTS: The present research is supported by the Russian Fund for Basic Research (project № 16-07-00854_a).

Received 11 May 2017

Shmyrin Anatoliy Mihaylovich, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, the Russian Federation, Doctor of technical sciences, Professor, Head of Mathematics Department, e-mail: amsh@lipetsk.ru

Sedykh Irina Aleksandrovna, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, the Russian Federation, PhD of of Physics and Mathematics, e-mail: sedykh-irina@yandex.ru

Smetannikova Anastasiya Mikhailovna, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, the Russian Federation, Student, Physics and Technology Faculty, e-mail: n.smetannickowa@yandex.ru

Nikiforova Ekaterina Yurevna, Regional State Unitary Enterprise "Lipetskoblvodokanal Lipetsk, the Russian Federation, chief process engineer, e-mail: niki291279@yandex.ru

Информация для цитирования:

Шмырин А.М., Седых И.А., Сметанникова А.М., Никифорова Е.Ю. Окрестностное моделирование процесса очистки сточных вод // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2017. Т. 22. Вып. 3. С. 596–604. DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-3-596-604

Shmyrin A.M., Sedykh I.A., Smetannikova A.M., Nikiforova E.Yu. Okrestnostnoe modelirovanie protsesssa ochestki stochnikh vod [Neighborhood modeling of wastewater treatment processes]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennyye i tekhnicheskie nauki - Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, 2017, vol. 22, no. 3, pp. 596–604. DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-3-596-604 (In Russian)