



УДК 628.543:621-50

doi:10.23968/2305-3488.2017.20.2.18-27

**Ермолин Ю. А., Алексеев М. И.**

## **ПРОМЫШЛЕННАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД КАК УПРАВЛЯЕМЫЙ ПРОЦЕСС**

UDC 628.543:621-50

doi:10.23968/2305-3488.2017.20.2.18-27

**Ermolin Yu. A., Alekseev M. I.**

## **INDUSTRIAL WASTEWATER TREATMENT AS A CONTROLLED PROCESS**

### **Аннотация**

Обработка сточной воды в комплексе очистных сооружений города рассматривается как управляемый процесс. Проанализирован единичный объем воды, характеризующийся сочетанием компонент загрязнения, который, проходя по технологической цепи очистных сооружений, подвергается управляющим воздействиям (дозировка коагулянтов, активного ила, степень аэрации). Процесс очистки рассмотрен как перемещение изображающей точки в пространстве параметров загрязнения в область, ограниченную их предельно допустимыми значениями. Показано, что достижение требуемой цели возможно с использованием различных стратегий управления. Введено понятие качества управления процессом. Сформулирована задача оптимального управления процессом очистки сточных вод по выбранному критерию.

**Ключевые слова:** сточная вода, компонента загрязнения, комплекс очистных сооружений, управляющее воздействие, степень очистки, критерий управления.

### **Abstract**

The treatment of waste water in the complex of treatment facilities of the city as a controlled process is considered. The unit volume of water, characterized by a combination of pollution components, which, passing through the technological chain of treatment facilities, is subjected to control actions (dosage of coagulants, activated sludge, degree of aeration) is analyzed. The authors consider cleaning process as the displacement of the representative point in the space of the contamination parameters into an area limited by their maximum permissible values. It is shown that the achievement of the desired goal is possible with the use of various control strategies. The concept of the quality of process control is introduced. The problem of optimal control of wastewater treatment by the chosen criterion is formulated.

**Keywords:** sewage, component of pollution, complex of treatment facilities, control action, degree of purification, control criterion.

**Авторы****Ермолин Юрий Алексеевич**

д.т.н., профессор  
Московский государственный университет путей сообщения  
127994, Россия, Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9  
Тел.: (495) 684–21–68  
Эл. адрес: ermolin.y@yandex.ru

**Алексеев Михаил Иванович**

д.т.н., проф., академик РААСН, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет  
190005, Россия, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4  
Тел.: (812) 316–72–97  
Эл. адрес: m.i.alexeev@mail.ru.

**Authors****Ermolin Yuriy Alekseevich**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow State University of Railway Transport  
127994, Russia, Moscow, ul. Obratsova, 9, bldg. 9  
Tel.: (495) 684–21–68  
E-mail: ermolin.y@yandex.ru

**Alekseev Mihail Ivanovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of RAASN, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,  
190005, Russia, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya Str., 4  
Tel.: (812) 316–72–97  
E-mail: m.i.alexeev@mail.ru.

Очистка больших объемов сточных вод обычно производится комплексом очистных сооружений (КОС), осуществляющим обработку воды в соответствии с выбранной технологической схемой. Объектом управления в этом случае является непосредственно технологический процесс, а целью – оперативное поддержание параметров этого процесса в пределах, обеспечивающих требуемую степень очистки.

Наиболее часто при больших расходах сточной воды (до 3 млн м<sup>3</sup>/сут) используется схема, при которой вначале производится очистка воды от взвешенных веществ (механическая очистка), а затем – биологическая очистка в аэротенках [1, 2]. В соответствии с такой технологией вода, подлежащая очистке, последовательно проходит через цепь сооружений «решетки – песколовки – первичные отстойники – аэротенки – вторичные отстойники».

В настоящей статье КОС рассматривается как единый управляемый объект, формулируются некоторые возникающие при этом проблемы в математической постановке. Такой подход дает возможность, не углубляясь в детали применяемых технологий очистки, сконцентрировать внимание именно на управленческих задачах. Предваряя дальнейшее рассмотрение, оговорим методологическую модель исследования. Будем считать, что объектом очистки служит некий элементарный единичный объем сточной воды. Поступая на вход очистного комплекса, этот объем последовательно перемещается по цепи сооружений, каждое из которых воздействует на него в соответствии с используемой в этом сооружении технологией, и в конечном итоге достигает выхода очистного комплекса. Такое представление об очистке воды в реальных условиях является несколько упрощенным, однако



позволяет проанализировать возможности управления этим процессом на принципиальном уровне.

Рассмотрим гипотетический случай, предположив, что элементарный объем поступающей на очистку сточной воды содержит всего две компоненты (параметра) загрязнения.

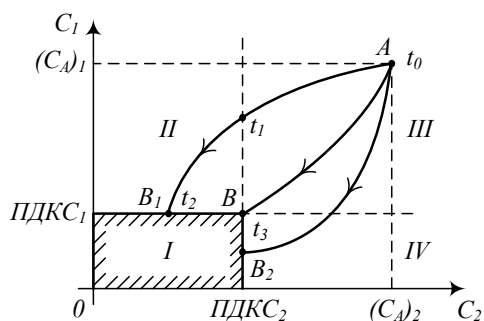


Рис. 1

На плоскости параметров загрязнений (рис. 1) такой сточной воде будет соответствовать точка  $A$ , имеющая координаты  $(C_A)_1$  и  $(C_A)_2$ , численно равным значениям концентраций  $C_1$  и  $C_2$ . Отметим на осях предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязнений  $ПДКС_1$  и  $ПДКС_2$ , которые не должны быть превышены в очищенной сточной воде, сбрасываемой в естественный водоприемник. Эти значения регламентируются нормативными документами и, следовательно, известны заранее.

Проведенные через точки  $ПДКС_1$  и  $ПДКС_2$  прямые линии, параллельные координатным осям, пересекают плоскость параметров загрязнений сточной воды на четыре области: I, II, III и IV. Каждая из этих областей характеризуется своими особенностями. Так, если концентрации загрязнений таковы, что изображающая точка попадает в область I, помеченную на рис. 1 внутренней штриховкой, то вода содержит примеси, не превышающие предельно допустимые, и в очистке не нуждается. Попадание изображающей точки в область II или IV говорит о том, что в сточной воде присутствует лишь одна компонента загрязнения, требующая удаления; загрязнение по другой компоненте при этом удовлетворяет принятым нормам. Наиболее общему случаю соответствует область III, когда обе компоненты загрязнения превышают ПДК, и такая сточная вода должна быть подвергнута очистке как по параметру  $C_1$ , так и по параметру  $C_2$ . Именно такой случай отображен точкой  $A$  на рис.1.

В процессе очистки, когда рассматриваемый объем сточной воды последовательно проходит стадии обработки, каждый параметр загрязнения изменяется со временем, как правило, уменьшаясь. При этом изображающая точка текущих концентраций перемещается в плоскости параметров загрязнения, описывая некоторую кривую (траекторию). Каждой точке траектории соответствует время, прошедшее

с начала очистки, т. е. эта кривая «оцифрована» по времени. Процесс очистки можно считать завершившимся в тот момент, когда траектория достигает границы области I, например точки  $B_1$  (см. рис. 1), и более не выходит за ее пределы. Располагая траекторией движения изображающей точки, можно представить себе характер изменения концентрации каждого загрязнителя с течением времени. Например, для случая, изображенного на рис. 1 кривой  $AB_1$ , зависимости  $C_1(t)$  и  $C_2(t)$  качественно будут выглядеть так, как показано на рис. 2 сплошными линиями.

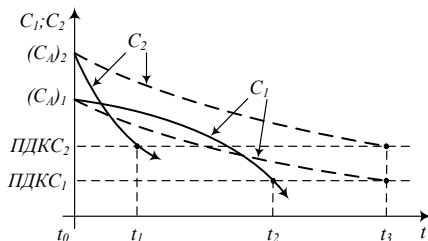


Рис. 2

Из этого рисунка видно, что концентрации загрязнителей с течением времени изменяются по-разному. Вначале, начиная с  $t_0$  — времени поступления сточной воды в КОС,  $C_1$  уменьшается незначительно, а  $C_2$  — быстро, достигая при  $t=t_1$  предельно допустимого значения  $ПДКС_2$ . Последующая часть процесса характеризуется более интенсивным уменьшением в очищаемой воде концентрации  $C_1$  и заканчивается при  $t=t_2$ , когда содержание этой компоненты загрязнения доводится до требуемой нормы  $ПДКС_1$ . Отметим, что если под  $C_1$  имеется в виду некий органический (биологический) загрязнитель, а под  $C_2$  — взвешенные минеральные вещества, то именно такая последовательность стадий процесса характерна для наиболее широко применяемой на практике технологической схемы комплексов очистных сооружений крупных городов, о чем уже было сказано выше.

Траектория движения изображающей точки на плоскости  $C_1O C_2$  в других условиях может выглядеть иначе. Представим себе, что неочищенная сточная вода сброшена в естественный водоприемник (подобная ситуация наблюдается, например, при очистке воды в биологических прудах). Если при этом концентрация загрязнений не превышает возможностей приемника, определяемых его самоочищающей способностью, в нем начинаются процессы, связанные с жизнедеятельностью микроорганизмов водоема, минерализующих органические загрязнения с последующим их осаждением под действием гравитационных сил, и в конечном итоге вода в приемнике приобретает требуемые кондиции, т. е. очистка заканчивается. Как правило, в этом случае концентрация каждого загрязнителя уменьшается со временем более плавно, но процесс очистки затягивается (на рис. 1 такой технологии соответствует, например, траектория  $AB$ , а на рис. 2 — кривые, изображенные штриховыми линиями). Следует, однако, отметить, что подобная самоочистка стоков в естественных водоемах не может быть использована при обработке больших объемов сточной воды.



Наконец, гипотетически можно представить себе технологию очистки, когда из сточной воды вначале более интенсивно удаляется органика, а потом взвешенные вещества; тогда траектория изображающей точки качественно будет иметь вид кривой  $AB_2$  (см. рис. 1).

Распространяя аналогичные рассуждения на случай, когда очистке подлежит сточная вода, содержащая  $n$  компонент загрязнения, приходим к заключению, что областью допустимых значений концентраций будет  $n$ -мерный параллелепипед, каждое ребро которого равно ПДК по соответствующему параметру, а представление о процессе очистки, как движении изображающей точки в  $n$ -мерном пространстве параметров загрязнений по некоторой кривой в область допустимых значений, остается в силе.

Выясним, от чего зависит вид траектории движения изображающей точки и можно ли на нее влиять, изменяя тем самым характер протекания процесса очистки в желаемом направлении, т. е. этим процессом управлять.

Выше отмечалось, что отчасти вид траектории обуславливается применяемой технологией очистки. Следовательно, выбор структуры технологической схемы при проектировании КОС уже во многом определяет кривую, по которой будет скользить изображающая точка. К настоящему времени методики проектирования очистных сооружений хорошо отработаны и позволяют создавать очистные комплексы, обеспечивающие необходимую степень очистки сточных вод при удовлетворении требуемых технико-экономических показателей: заданного расхода, возможно меньшей стоимости реализации КОС и его эксплуатации и т. п. [1]. Эти вопросы выходят за рамки настоящей статьи, поэтому будем далее полагать, что речь идет об уже действующих сооружениях. Отметим лишь, что проектирование сооружений и устройств проводится под некоторые исходные данные (расход сточной воды, концентрация загрязнителей на входе и т. п.), в качестве которых могут выступать, например, средние или максимально ожидаемые значения соответствующих параметров. Таким образом, проектирование (и последующая реализация) сооружения осуществляется именно под постоянные параметры поступающей сточной воды.

Если в единичном объеме сточной воды, поступающей на вход КОС, содержится строго постоянная, не изменяющаяся с течением времени масса каждого загрязнителя, то координаты точки  $A$  на рис. 1 будут неизменными, и при выбранной технологической схеме вода, пройдя за строго определенное время все очистные сооружения, приобретет на выходе строго определенные кондиции. Такой идеальной ситуации в пространстве параметров загрязнений соответствует единственная траектория, переводящая каждую компоненту загрязнения в область допустимых значений, и необходимости в ее оперативных изменениях нет. Или иначе – в этом случае нет надобности управлять процессом, т. е. каким-либо образом вмешиваться в его ход, поскольку он и так удовлетворяет поставленным при проектировании требованиям.

В реальности концентрация любой компоненты загрязнения в единичном объеме поступающей на очистку воды – случайная функция времени. Значит, исходное

положение точки *A* в пространстве параметров загрязнений (см. рис.1) все время случайным образом изменяется. Она «блуждает» под воздействием так называемых возмущений в окрестности некоторой точки, координаты которой были приняты в качестве исходных данных при проектировании сооружения (например, средние значения концентраций). Но задача, стоящая перед КОС, остается прежней: за время прохождения единицей объема сточной воды всей технологической цепи очистки необходимо перевести изображающую точку из ее начального положения в область допустимых значений.

Ясно, что возмущенному начальному положению точки *A* соответствует другая траектория, отражающая процесс очистки в новых условиях и отличающаяся от идеальной. Причем это отличие может оказаться весьма существенным, например таким, что за время нахождения сточной воды в обработке, определяемой конструктивными параметрами действующих сооружений КОС, некоторые компоненты загрязнений не могут быть снижены до требуемых значений, т. е. изображающая точка не попадает в область допустимых концентраций. В этом случае в ход технологического процесса необходимо внести коррективы, т. е., формально говоря, трансформировать траекторию таким образом, чтобы изображающая точка за заданное время обработки воды все же оказалась в пределах этой области. Коррекция траектории достигается с помощью оперативного управления, которое физически осуществляется введением воздействий, изменяющих ход технологического процесса очистки. В качестве таких воздействий могут выступать, например, изменения в дозировке коагулянтов при механической обработке воды в первичных отстойниках, различное количество возвратного активного ила, подаваемое в голову аэротенка, или интенсивность его аэрирования – при биологической очистке и т. п. мероприятия. Формально говоря, теперь управление процессом очистки сточных вод можно представить как целенаправленное видоизменение траектории движения изображающей точки в пространстве параметров загрязнений с целью привести конечную точку в область допустимых значений, если по каким-либо причинам (в силу воздействия возмущений) процесс очистки отклонился от идеального, изначально запроектированного. Следует, однако, оговориться: не любое возмущение может быть компенсировано в процессе очистки воды данным (действующим) КОС. Известны случаи, когда из-за поступления на вход аэротенка высокотоксичных загрязнителей резко падает жизнедеятельность активного ила (вплоть до его гибели), определяющего степень биологической очистки, и сточная вода на выходе КОС не может быть доведена до требуемых кондиций никакими технически доступными управляющими воздействиями. Это говорит о том, что в окрестности точки *A* (см. рис. 1) существует область допустимых возмущений, выход за пределы которой, строго говоря, приводит к выходу из строя всего комплекса очистных сооружений, поскольку он теряет способность выполнять свои функции.

Из предшествующего рассмотрения вытекает, что при заданном исходном (начальном) положении точки *A* перевести ее в область допустимых значений, применяя различные управления, можно по разному. При этом каждой последова-



тельности управляющих воздействий (стратегии управления) соответствует своя траектория в пространстве параметров загрязнений. Даже интуитивно понятно, что среди этого множества кривых существует более и менее предпочтительные. Вопрос о предпочтительности и даже его постановка приобретают объективный смысл только тогда, когда введен критерий – формальное правило, позволяющее эти траектории сравнивать между собой. Удобнее всего это сделать, поставив в соответствие каждой траектории показатель качества управления процессом очистки, под которым обычно понимают число, характерное для каждой возможной траектории и вычисляемое по правилам, определенным выбранным критерием.

Любая стратегия управления – это совокупность воздействий, которым подвергается сточная вода по мере ее продвижения во времени через технологическую цепь очистных сооружений. Эти воздействия имеют различную физическую природу (коагулянт, активный ил, воздух для аэрирования и т. п.) и интенсивность. В общем случае в зависимости от оперативной ситуации управляющие воздействия прикладываются в разные моменты времени и в разных «дозах». В реальных условиях их интенсивность может изменяться лишь в определенных пределах, не превышающих технических возможностей и технологических ограничений конкретных сооружений. Так, например, в процессе аэрирования аэротенков количество кислорода, подаваемого в них, не может быть больше производительности воздуходувок. Кроме того, в качестве естественного ограничения выступает время нахождения обрабатываемой сточной воды в пределах конкретного сооружения или комплекса, определяемое его проектной пропускной способностью.

Каждое управляющее воздействие – это изменение в расходовании материалов, реагентов, электроэнергии и т. п. средств управления, влияющих на процесс очистки сточной воды. Назовем потребление этих ресурсов обобщенным термином «затраты» ( $R$ ) и, несколько упрощая, предположим, что любой ресурс может быть представлен в стоимостном выражении. Тогда каждой стратегии управления – траектории процесса в пространстве параметров загрязнений – соответствуют свои затраты, являющиеся функцией времени  $R(t)$ . Вид этих функций определяется характером изменения управляющих воздействий за время нахождения сточной воды в процессе ее обработки, и, следовательно, функции затрат, соответствующие различным траекториям, в общем случае также различны.

Запишем интеграл

$$I = \int_0^{t_{\text{оч}}} R(t) dt \quad (1)$$

где  $t_{\text{оч}}$  – время нахождения сточной воды в очистном сооружении (или комплексе). Поскольку пределы интегрирования в (1) – числа, то  $I$  – функционал, значение которого определяется видом функции  $R(t)$ . Физически функционал  $I$  численно равен общим (суммарным) затратам, необходимым для перевода изображающей точки в пространстве параметров загрязнений из ее исходного состояния в область допустимых значений. Так как конкретной траектории соответствует конкретная

стратегия управления, то, вычисляя для каждой из них значение функционала, их можно сравнивать между собой. В этом случае  $I$  выступает в роли показателя качества управления процессом очистки, и предпочтительной из двух сравниваемых стратегий будет та, для которой значение  $I$  меньше. Но лучшей она будет именно с точки зрения выбранного критерия – суммарных затрат. Стратегии управления можно сравнивать и по какому-либо другому критерию, и тогда результат сравнения может оказаться иным.

Введение формального показателя качества управления открывает возможность постановки задачи синтеза оптимального управления [2]. Смысл ее состоит в следующем. Поскольку перевести изображающую точку из ее начального положения в конечное можно различными способами (применяя различные стратегии управления), то среди множества траекторий (в общем случае – бесконечного) существует такая, для которой принятый показатель качества имеет значение, наименьшее из всех возможных. Следовательно, возможна такая – обратная – постановка задачи: необходимо найти стратегию управления  $R(t)$ , которая при заданных технических и технологических ограничениях переводила бы изображающую точку из ее исходного положения в область допустимых значений параметров загрязнений, и при этом показатель качества принимал бы минимальное значение, т. е. выполнялось бы условие

$$I \Rightarrow \min \quad (2)$$

Стратегия, найденная из условия (2), является оптимальной стратегией, а управление, соответственно, оптимальным по выбранному критерию.

Применительно к рассматриваемому процессу очистки сточной воды и принятому показателю качества оптимальное управление сводится к определению интенсивностей (дозировок) и моментов приложения управляющих воздействий (реагентов, активного ила и др.), обеспечивающих заданную степень очистки за заданное время с минимально возможными общими затратами при удовлетворении всех технических и технологических ограничений.

Успешное решение сформулированной задачи связано с необходимостью иметь адекватное реальности формальное описание процесса очистки – его математическую модель. В литературе имеются публикации, посвященные разработке динамических моделей очистных сооружений [8–10]. Однако актуальность проблемы повышения эффективности процессов очистки сточных вод требует интенсификации научно-практических исследований в этом направлении.

#### Литература

1. Яковлев, С. В., Воронов, Ю. В. (2002). *Водоотведение и очистка сточных вод*. М.: АСВ, 704 с.
2. Яковлев, С. В. (1985). *Биологическая очистка сточных вод: процессы, аппараты и сооружения*. М.: Стройиздат, 208 с.
3. Худенко, Б. М., Шпирт, Е. А. (1973). *Аэраторы для очистки сточных вод*. М.: Стройиздат, 112 с.
4. Алексеев, М. И., Ермолин, Ю. А. (2009). *Теоретические основы управления процессами очистки сточных вод*. СПб.: СПбГАСУ, 174 с.
5. Ермолин, Ю. А. (2016). *Экология*. М.: МГУПС (МИИТ), 52 с.





6. Солодовников, В. В. (ред.) (1967). *Техническая кибернетика. Теория автоматического регулирования. Книга 1*. М.: Машиностроение, 768 с.
7. Попов, Е. П. (1988). *Теория нелинейных систем автоматического регулирования и управления*. М.: Наука, 255 с.
8. Гордин, И. В., Манусова, Н. Б., Смирнов, Д. Н. (1977). *Оптимизация химико-технологических систем очистки промышленных сточных вод*. Л.: Химия, 176 с.
9. Алексеев, М. И., Ермолин, Ю. А. (2004). «Биологическая очистка сточной воды как процесс в экологической системе „хищник–жертва“», *Известия вузов. Строительство*, № 3, С. 74–77.
10. Алексеев, М. И., Ермолин, Ю.А., Павлинова, И. И. (2005). «Динамика функционирования первичного канализационного отстойника», *Водоснабжение и санитарная техника*, № 1, С. 18–20.

## References

1. Yakovlev, S. V., Voronov, Yu. V. (2002). *Vodootvedenie i ochistka stochnyh vod* [Waterdisposal and wastewater treatment]. М.: ASV, 704 p. (In Russian).
2. Yakovlev, S. V. (1985). *Biologicheskaya ochistka stochnyh vod: processy, apparaty i sooruzheniya* [Biological wastewater treatment: processes, apparatus and structures.] М.: Strojizdat, 208 p. (In Russian)
3. Hudenko, B. M., Shpirt, E. A. (1973). *Aehratory dlya ochistki stochnyh vod* [Aerators for wastewater treatment]. М.: Strojizdat, 112 p. (In Russian).
4. Alekseev, M. I., Ermolin, YU. A. (2009). *Teoreticheskie osnovy upravleniya processami ochistki stochnyh vod* [Theoretical bases of management of processes of wastewater treatment]. SPb.: SPbGASU, 174 p. (In Russian).
5. Ermolin, Yu. A. (2016). *Ekologiya* [Ecology]. М.: MGUPS (MIIT), 52 p. (In Russian).
6. Solodovnikov, V. V. (red.) (1967). *Tekhnicheskaya kibernetika. Teoriya avtomaticheskogo regulirovaniya. Kniga 1*. [Technical cybernetics. Theory of automatic regulation. Book 1]. М.: Mashinostroenie, 768 p. (In Russian).
7. Popov, E. P. (1988). *Teoriya nelinejnyh sistem avtomaticheskogo regulirovaniya i upravleniya* [The theory of nonlinear systems of automatic regulation and control]. М.: Nauka, 255 p. (In Russian).
8. Gordin, I. V., Manusova, N. B., Smirnov, D. N. (1977). *Optimizaciya himiko-tehnologicheskikh sistem ochistki promyshlennyh stochnyh vod* [Optimization of chemical-technological systems for purification of industrial wastewater]. Л.: Himiya, 176 p. (In Russian).
9. Alekseev, M. I., Ermolin, Yu. A. (2004). «Biologicheskaya ochistka stochnoj vody kak process v ehkologicheskoy sisteme „hishchnik–zhertva“» [Biological wastewater treatment as a process in the ecological system «predator-prey»], *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*, № 3, pp. 74–77. (In Russian).
10. Alekseev, M. I., Ermolin, YU.A., Pavlinova, I. I. (2005). «Dinamika funkcionirovaniya pervichnogo kanalizacionnogo otstojnika [Dynamics of the functioning of the primary sewage sump], *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*, 2005, № 1, pp. 18–20. (In Russian).