

Научная статья

УДК 504.4.062.2; 504.064.38; 004.942

DOI: 10.17586/2310-1164-2024-17-2-19-28

## Разработка имитационной модели очистных сооружений для убойного цеха птицефабрики

Т.С. Семенова\*, О.И. Сергиенко

Университет ИТМО, Россия, Санкт-Петербург

\*semenovats@itmo.ru

**Аннотация.** Проектировали многостадийную технологическую схему очистных сооружений для убойного цеха птицефабрики с целью определения наиболее эффективного варианта при изменяющейся нагрузке со сточными водами. Качество очистки оценивалось такими физико-химическими показателями, как содержание взвешенных веществ, концентрация растворенного кислорода, биологическое потребление кислорода, химическое потребление кислорода, значения общего азота и фосфора. Приводятся результаты имитационного моделирования поведения системы при переменной нагрузке со сточными водами с использованием программного продукта GPS-X с применением расчетной модели Mantis2. Для оценки чувствительности модели варьировали концентрации загрязнителей в диапазоне  $\pm 20\%$  от среднего значения в исходных стоках. Моделирование работы очистных сооружений птицефабрики проводилось при изменении концентрации загрязняющих веществ на входе в усреднительную емкость от минимального значения, равного предельно допустимым концентрациям, до максимального по составу сточных вод птицефабрики. Получено, что при варьировании исходных данных выбранная схема обеспечивает достаточно высокую эффективность очистки во всем диапазоне изменения концентраций загрязняющих веществ на входе, кроме общего азота, что вероятно связано с аккумуляцией органического азота в активном иле при нарушении метаболических процессов в аэротенке. Показано, что применение имитационного моделирования на стадии разработки комплекса очистных сооружений позволяет анализировать различные сценарии поведения системы с учетом динамических изменений объемов водопотребления при производстве продукции, а также при сезонных изменениях состава сточных вод на пищевых производствах.

**Ключевые слова:** пищевые системы; имитационное моделирование; комплекс очистных сооружений; сточные воды; убойный цех птицефабрики; GPS-X; эффективность

Original article

## Simulation model of treatment facilities for the slaughterhouse of a poultry farm

Tatiana S. Semenova\*, Olga I. Sergienko

ITMO University, St. Petersburg, Russia

\*semenovats@itmo.ru

**Abstract.** We designed a multi-stage technological scheme of treatment facilities for the slaughterhouse of a poultry farm in order to determine the most effective option for a changing wastewater load. The quality of purification was assessed by such physicochemical indicators as suspended solids content, dissolved oxygen concentration, biological oxygen demand, chemical oxygen demand, as well as total nitrogen and phosphorus values. The article presents the results of simulation modeling for the behavior of the system under variable load with wastewater using the GPS-X software product with the Mantis2 calculation model. To assess the sensitivity of the model, pollutant concentrations were varied within a range of  $\pm 20\%$  of the mean value in the original effluent. The results of modeling the operation of wastewater treatment facilities at a poultry farm were carried out when the concentration of pollutants at the entrance to the averaging tank changed from a minimum value equal to the maximum permissible concentrations to the maximum composition of wastewater from the poultry farm. It was found that, when varying the initial data, the selected scheme provides sufficiently high treatment efficiency over the entire range of changes in the concentrations of pollutants at the inlet, except for total nitrogen, which is probably due to the accumulation of organic nitrogen in activated sludge at disruption of the metabolic processes in the aeration tank. It is shown that the use of simulation modeling at the stage of development of a complex of treatment facilities allows to analyze various scenarios of system behavior, taking into account dynamic changes in the volume of water consumption during production, as well as seasonal changes in the composition of wastewater in food production.

**Keywords:** food systems; simulation modelling; wastewater treatment plant complex; wastewater; poultry farm slaughterhouse; GPS-X; efficiency

## Введение

Сегодня все больше внимания уделяется контролю эффективности очистки сточных вод предприятий для сохранения качества окружающей среды и водных ресурсов. Повышение производственных мощностей пищевых предприятий, в частности птицеводства, приводит к увеличению объемов сточных вод. Проблема их очистки достаточно подробно рассматривается в работах российских и зарубежных ученых, однако она по-прежнему остается актуальной поскольку на пищевых предприятиях на состав и объем стоков оказывает значительное воздействие сезонность, неравномерность, изменение производственной программы, что требует корректировки конфигурации очистных сооружений и расхода реагентов. Ошибки на стадии разработки и проектирования водоочистных установок обычно приводят к значительным затратам на их дальнейшую модернизацию, увеличению расхода реагентов и снижению эффективности очистки. Однако эта проблема может быть решена с помощью математического моделирования очистных сооружений на стадии их разработки.

Примеры конструкторских решений с применением математического моделирования рассматриваются в работе В.И. Баженова и др. для системы с биологической очисткой сточных вод [1], где основной задачей является выбор эффективной технологической схемы для очистки стоков до требуемых норм. Такой подход используется в случаях, когда процессы очистки не до конца изучены или для исследования и оптимизации новых стадий очистки. Из-за очевидных ограничений и неопределенностей в исходных данных необходима экспериментальная проверка выбранной технологической схемы при разных начальных условиях на физических моделях в целях подтверждения пригодности математической модели.

Наибольшее распространение для проектирования и изучения проблем очистных сооружений в настоящее время получили такие компьютерные модели, как BioWin (EnviroSim Associates Ltd, Канада), STOAT (Water Research Centre Ltd, Великобритания), Aspen HYSYS (Aspen Technology Inc., США), WEST (MIKE by DHI, Дания) и GPS-X (Hydromantis ESS Inc, Канада). В современных европейских и российских исследованиях чаще других применяются программные продукты Aspen HYSYS и GPS-X [2, 3]. В большинстве экспериментов с помощью программного продукта GPS-X изучаются математические модели отдельных процессов очистки сточных вод, в основном, биологическая очистка в аэротенке [4–6]. Имитационное моделирование всего комплекса очистных сооружений (КОС) как инструмент оценки и снижения негативного воздействия на окружающую среду (НВОС) применяется редко, поскольку считается, что основные риски связаны именно с биологической очисткой [7–9]. Таким образом системная оценка НВОС всего комплекса сооружений, а также и возможность прогнозирования опасных отклонений концентраций с помощью имитационной модели комплекса очистных сооружений, спроектированной в программном продукте GPS-X, на примере убойного цеха птицефабрики применены впервые.

*Таблица 1. Состав сточных вод убойного цеха птицефабрики*  
*Table 1. Composition of wastewater in the slaughterhouse of a poultry farm*

Загрязнитель	С, мг/дм <sup>3</sup>	ПДК, мг/дм <sup>3</sup>
взвешенные вещества, мг/дм <sup>3</sup>	180,0	0,25
жиры, мг/дм <sup>3</sup>	190	50
ХПК, мгО/дм <sup>3</sup>	1000	500
БПК, мгО/дм <sup>3</sup>	1280	300
аммонийный азот, мг/дм <sup>3</sup>	37	0,4
нитриты, мг/дм <sup>3</sup>	0,061	0,02
нитраты, мг/дм <sup>3</sup>	0,26	9
фосфаты, мг/дм <sup>3</sup>	7,13	0,2
СПАВ анионогенные, мг/л	0,827	0,2
нефтепродукты, мг/л	0,048	0,05
общая минерализация, мг/л	986,0	1000
рН	6,5	6–9

Сточные воды птицефабрик представляют собой сложную гетерогенную смесь неорганических и органических примесей различной концентрации. Концентрация органических веществ по химическому потреблению кислорода (ХПК) в стоках убойных цехов птицефабрик может достигать 5000 мг/дм<sup>3</sup>, и наряду с легко окисляемой органикой во многих стоках содержатся трудно окисляемые вещества [10]. В больших концентрациях в стоках содержатся хлориды, сульфаты, азот аммонийный, фосфаты, азот нитратов и нитритов. В таблице 1 приводится сравнение состава сточных вод убойного цеха птицефабрики с предельно допустимыми концентрациями (ПДК) рыбохозяйственного назначения.

Указанные параметры качества сточных вод анализируются в рамках программы производственного экологического контроля по утвержденным методикам не чаще, чем раз в месяц. Это затрудняет процесс контроля эффективности очистки и приводит к проскокам концентрации загрязнителей выше допустимых нормативов.

Сложный состав сточных вод птицефабрик требует комплексной системы очистки, когда для каждой группы загрязняющих веществ применяется определенный метод (механический, химический, физико-химический, биологический) или их комбинация (таблица 2) [2, 3].

Таблица 2. Методы очистки сточных вод в зависимости от типа веществ ([2] с доп. авторов)  
Table 2. Sewage treatment methods according to the type of substances

Группы вредных веществ	Методы очистки вод	Степень очистки, %
загрязнения, нерастворимые в воде (I группа)	методы, основанные на использовании сил гравитации (отстаивание)	50–75
коллоидные вещества (II группа)	электрофлотация, коагуляция	60–85
	флотация, коагуляция	
молекулярные вещества (III группа)	фильтрация	70–98
	сорбция на активированном угле	
	наночистка	
ионные растворы (IV группа)	биологический метод	до 99
	реагентный метод	70–95
	мембранные технологии обессоливания	

Однако при эксплуатации комплекса очистных сооружений требуется контроль качества очистки на каждой стадии. Как отмечается в ряде работ [11–13], из-за низкой эффективности механической (около 8–10%) и биологической (35–50%) очистки от N и P защита водоемов не обеспечивается в необходимом объеме. Применение же глубокой очистки сточных вод признано наиболее результативным (98–99%) и подходит для промышленного применения [13, 14]. Исходя из этого, проектирование технологической многостадийной схемы очистных сооружений должно базироваться на учете большого числа факторов. В связи с этим применение имитационного моделирования очистных сооружений как сложных систем становится наиболее подходящим вариантом не только для выбора отдельных способов очистки и технологических решений на стадии проектирования, но и для управления процессом очистки на стадии эксплуатации.

Цель исследования – разработка имитационной модели очистных сооружений для убойного цеха птицефабрики с учетом эффективности работы отдельных сооружений и КОС в целом.

### Особенности применения имитационного моделирования на этапе проектирования очистных сооружений

Моделирование как процесс включает три составляющих: субъект (исследователь); объект исследования; модель, выражающая отношения субъекта и объекта (рисунок 1) [14, 15].

При имитационном моделировании (этап I) информация о компонентах систем и их взаимосвязях выражается с помощью математических объектов (формул, уравнений, матриц) или в виде графиков, таблиц, баз данных. После конструирования модели и проведения модельных экспериментов полученные данные служат для оценки правильности выбора комплекса очистных сооружений. При подтверждении достоверности модели (этап II) с помощью имитационного моделирования, используя данные экологического мониторинга, можно просчитать вероятные сценарии развития ситуации и предложить оптимальные стратегии управления процессом [15, 16].

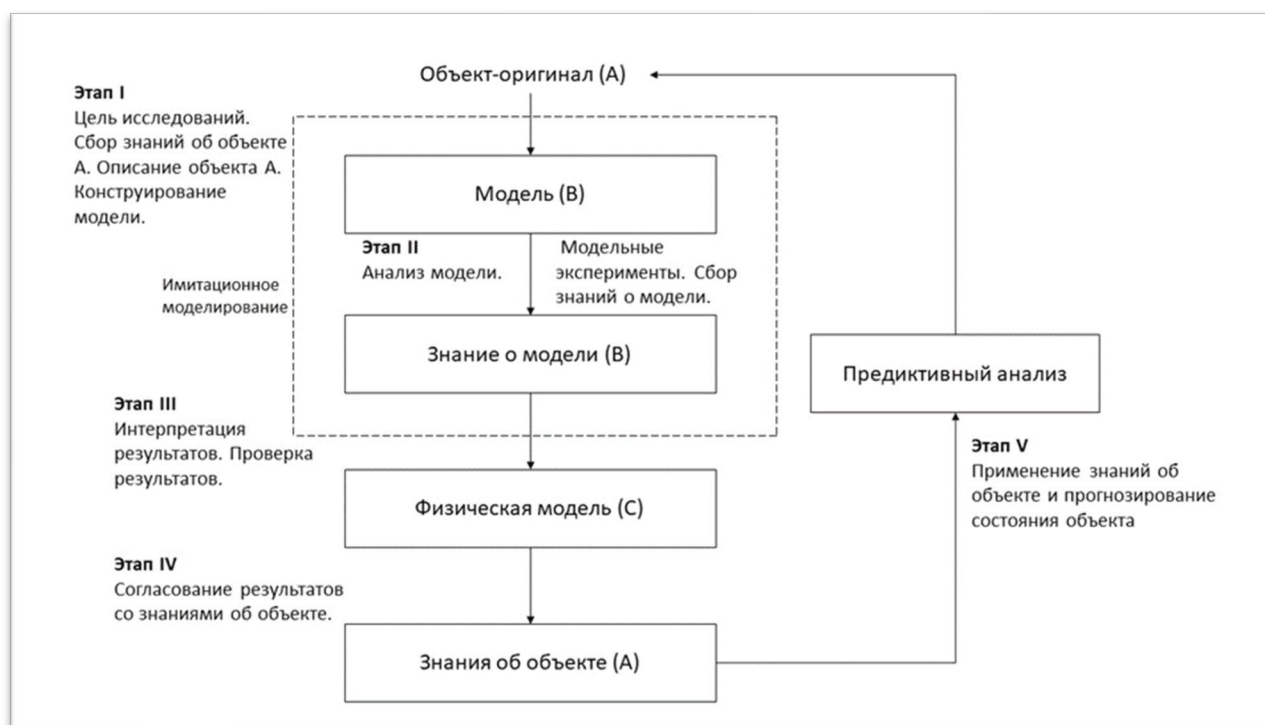


Рисунок 1 – Процесс моделирования с имитационной, физической и предиктивной моделями ([11] с доп. авторов)  
Figure 1. General structure of the modelling process

Компьютерное моделирование необходимо дополнять результатами экспериментальных исследований на опытных или опытно-промышленных образцах (этап III). С учетом сложности и затратности изготовления опытных или опытно-промышленных образцов для исследований на реальных стоках целесообразно проводить экспериментальную проверку достоверности и пригодности компьютерных моделей на физических моделях и модельных растворах при условии соблюдения соответствия фазо-дисперсного состава и кинетики процессов с реальными стоками.

Применение имитационной модели (этап IV) также позволяет прогнозировать поведение сложной системы и определять варианты эффективной эксплуатации очистных сооружений не только по контролируемым параметрам очистки, но и с учетом требуемого расхода энергии, реагентов, водных ресурсов и экологического воздействия технологии, что будет способствовать снижению эксплуатационных затрат и повышению ресурсной эффективности очистных сооружений в целом.

В дальнейшем, с развитием методов предиктивной аналитики, основанной на алгоритме временных рядов и построении, управлении и расчете моделей при помощи техник аппроксимации больших наборов данных, возможно прогнозирование поведения системы без проведения дополнительных полномасштабных экспериментов или численных расчетов (этап V). Предиктивный анализ использует обработку текущих и исторических показаний для предсказания будущих значений параметров системы [16]. В качестве исторических данных могут использоваться результаты имитационного моделирования, формируя типичные зависимости поведения системы в разных ситуациях, включая опасные отклонения от требуемых показателей качества очистки.

### Объекты и методы исследования

В работе рассматривается построение имитационной модели очистных сооружений для убойного цеха птицефабрики на основе программного продукта GPS-X 8.0 (Hydromantis, Канада), применяемого для моделирования работы очистных сооружений разного типа с целью выбора наиболее эффективных сооружений на стадии разработки. В дальнейшем полученная модель может использоваться для прогнозирования качества очистки на стадии эксплуатации.

Программный продукт GPS-X позволяет имитировать процессы очистки сточных вод как в целом всего КОС, так и отдельных его процессов (усреднение, отстаивание, флотация, биологическая очистка,

процессы удаления органических веществ, обеззараживание и уплотнение осадка) с помощью различных встроенных библиотек (Activated Sludge Model – ASM1, ASM2, ASM3 и т. д.) [3, 4].

В работе Ramírez A.F. et al. [17] программа GPS-X используется для моделирования очистки сточных вод на основе входных и выходных потоков с целью исследования процесса накопления полигидроксикислоты (ПНА) в реакторе активного ила. Рассматриваются различные сценарии накопления ПНА с помощью модели активного ила ASM3. В качестве наиболее эффективного выбирается тот сценарий, при котором лучше всего вырабатывается ПНА – при обилии углеродного субстрата в аэробных условиях.

Применение GPS-X в качестве инструмента для моделирования работы реактора периодического действия производства компании Biogest/El-Agamy (Германия) рассматривается для определения продолжительности заполнения аэротенка, скорости реакции денитрификации и оседания активного ила на основе модели ASM1 [18]. Для анализа биологических процессов рассматривается шесть сценариев и выявляются опасные отклонения по величине биологического потребления кислорода (БПК), концентраций нитратов, нитритов, фосфорсодержащих веществ.

Преимущество компьютерного моделирования при использовании программы GPS-X и ее комплексной расчетной модели Mantis2 на этапе эксплуатации заключается в том, что результаты моделирования процессов и подтверждение эксплуатационных параметров очистных сооружений позволяют избегать опасных отклонений без остановки процесса очистки [19].

В работах [5, 6] с помощью GPS-X проектируются и моделируются муниципальные станции очистки сточных вод. Проектный расчет КОС выполняется для каждого блока очистки при изменении концентраций общего количества взвешенных веществ, БПК, ХПК, общего количества растворенных веществ и общего азота – анализируется и рассчитывается эффективность очистки для разной компоновки схем и оборудования.

Исходными данными для математической модели очистных сооружений убойного цеха птицефабрики являются значения фракционного и химического состава сточных вод, количество взвешенных веществ в объеме, химическое потребление кислорода, показатели общего азота (TN) и фосфора (TP). Основными этапами моделирования очистных сооружений в программе GPS-X являются:

- выбор библиотеки данных согласно исходной задаче;
- построение модели и блоков очистки сточных вод;
- задание исходных параметров в начале процесса очистки;
- обработка полученной информации математической модели для возможной реализации системы;
- проигрывание различных сценариев работы очистных сооружений для прогнозирования последствий;
- проверка достоверности результатов.

Имитационное моделирование схемы очистки сточных вод птицефабрики проводится в программном комплексе GPS-X с применением расчетной модели Mantis2 (рисунок 2).

Схема очистных сооружений состоит из усреднителя, первичного отстойника, аэротенка, вторичного отстойника, стадии обеззараживания воды, а также обезвоживания и уплотнения осадка [7, 8].

Сточные воды поступают через трубопровод 1 в песколовку 2, где происходит механическая очистка сточных вод от взвешенных веществ. Затем вода поступает в первичный отстойник 3 для продолжения механической очистки, затем сточные воды подвергаются биологической очистке в аэротенке 4. Рост биомассы активного ила сопровождается потреблением органических веществ, азота и фосфора. Таким образом протекает реакция нитрификации и денитрификации, а также дефосфорации. После вторичного отстойника 5 сточные воды обрабатываются в блоке ультрафиолетового обеззараживания 6, а затем поступают на сброс 7. Одновременно с очисткой стоков происходит обработка активного ила в илоуплотнителе 8, и уплотненный осадок подается на обезвоживание 9. Твердая фаза осадка отправляется на утилизацию, а жидкая – подается в первичный отстойник 3 для повторной очистки.

Для целей проектирования очистных сооружений необходима информация об эффективности работы каждой стадии очистки КОС при варьировании исходных данных по составу и расходу стоков. Варьирование проводилось при изменении исходных концентраций (таблица 1) взвешенных веществ, ХПК, показателей общего азота и фосфора в диапазоне  $\pm 20\%$ .

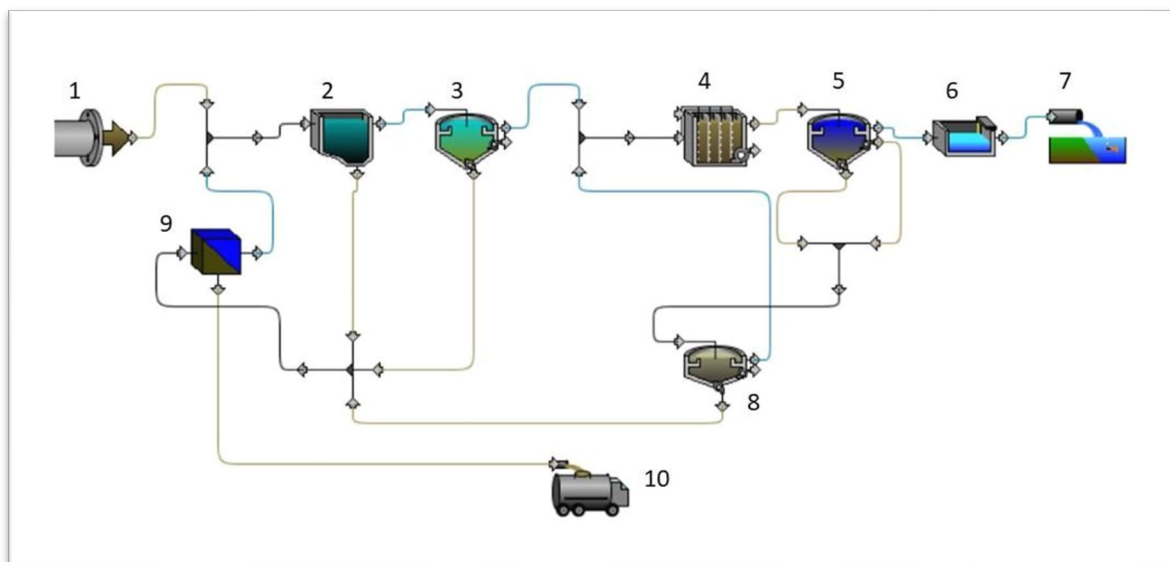


Рисунок 2 – Схема очистки сточных вод птицефабрики. Вид в программе GPS-X:

1 – входной поток; 2 – песколовка; 3 – первичный отстойник; 4 – аэротенк; 5 – вторичный отстойник; 6 – блок обеззараживания; 7 – выходной поток; 8 – уплотнитель; 9 – блок обезвоживания осадка; 10 – утилизация осадка

Figure 2. Poultry farm wastewater treatment scheme. GPS-X view:

1 – inlet flow; 2 – sand trap; 3 – primary settling tank; 4 – aerotank; 5 – secondary settling tank; 6 – disinfection stage; 7 – outlet flow; 8 – thickener; 9 – sludge dewatering block; 10 – sludge utilization

## Результаты и их обсуждение

На основе данных таблицы 1 были получены результаты моделирования работы очистных сооружений убойного цеха птицефабрики в программном комплексе GPS-X 8.0 для выбора КОС и оценки эффективности работы отдельных компонентов технологической схемы.

Зная исходные концентрации и массы загрязняющих веществ, а также расход стоков, поступающих от пищевых предприятий, можно анализировать различные сценарии изменения количества загрязняющих веществ в воде после очистки с учетом динамичных изменений объемов энерго- и водопотребления птицеводческой продукции, а также при сезонных изменениях состава сточных вод.

Результаты моделирования работы очистных сооружений птицефабрики проводились при изменении концентрации загрязняющих веществ на входе в усреднительную емкость от минимального значения, равного ПДК, до максимального по составу сточных вод птицефабрики (таблица 1).

В таблице 3 (рисунок а) приведены результаты имитационного моделирования при изменении массы органических веществ в стоках птицефабрики. Максимальные концентрации ХПК сосредоточены на входе в песколовки, перед аэротенком и вторичным отстойником, перед илоуплотнителем и после обезвоживания. Однако на выходе из аэротенка и после вторичного отстойника концентрация ХПК в сточной воде значительно снижается, достигая на выходе из очистных сооружений значения в три раза меньшего, чем установлено для ПДК водоемов рыбохозяйственного назначения.

В таблице 3 (рисунки б и в) показано изменение массы биогенных элементов: общего фосфора и азота, так как эти вещества могут негативно влиять на качество воды в водоемах из-за ускорения процессов эвтрофикации.

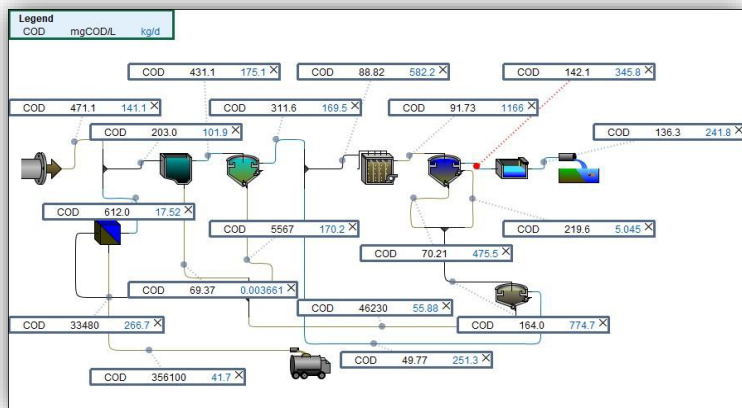
Наибольшая концентрация фосфора наблюдается в сточной воде на входе в усреднитель, после первичного отстойника и перед илоуплотнителем. Фосфор оседает в активном иле в виде полифосфата для поддержания метаболического процесса потребляющих фосфор организмов, когда превышает лимит поглощения вещества [20–22]. В этой связи в процессе очистки наблюдается повышение концентрации по общему фосфору, однако на выходе из очистных сооружений в воде количество ионов фосфора уменьшается почти до значения, близкого к ПДК вод рыбохозяйственного назначения.

Таблица 3. Результаты моделирования работы очистных сооружений птицефабрики  
 Table 3. The results of modelling the operation of the poultry farm wastewater treatment plant

Результаты моделирования очистных сооружений

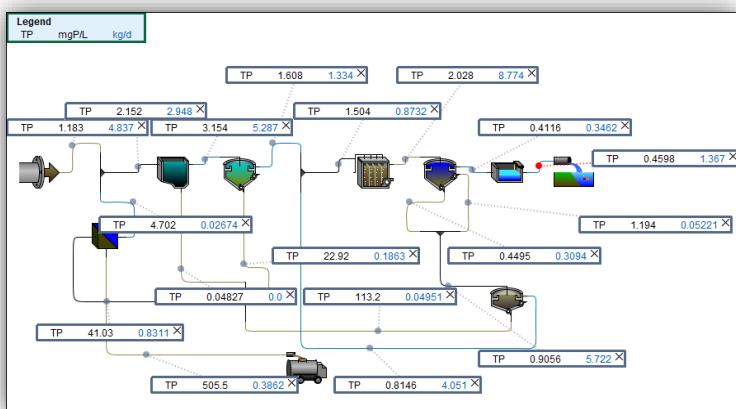
Характеристики процесса очистки сточных вод

а



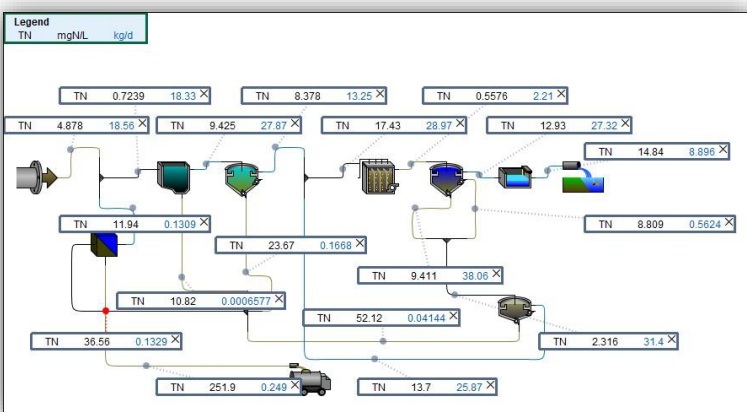
Результаты моделирования процесса очистки по показателю ХПК: концентрация на входе – 1000 мг/дм<sup>3</sup> концентрация на выходе – 136,3 мг/дм<sup>3</sup> эффективность очистки – 86,37%

б



Результаты моделирования процесса очистки по показателю общий фосфор: концентрация на входе – 7,13 мг/дм<sup>3</sup> концентрация на выходе – 0,46 мг/дм<sup>3</sup> эффективность очистки – 93,55%

в



Результаты моделирования процесса очистки по показателю общий азот: концентрация на входе – 37,32 мг/дм<sup>3</sup> концентрация на выходе – 14,84 мг/дм<sup>3</sup> эффективность очистки – 60,24%

По общему азоту наблюдается постепенное увеличение концентрации по мере очистки (перед усреднителем и первичным отстойником) и перед илоуплотнителем. Это объясняется тем, что органический азот, как и фосфор, накапливается в активном иле при нарушении метаболических процессов в аэротенке [20, 21]. На выходе из очистных сооружений концентрация общего азота существенно превышает показатель ПДК для вод рыбохозяйственного назначения.

Таблица 4. Эффективность очистки сточных вод при варьировании концентраций в исходных стоках  
Table 4. Efficiency of wastewater treatment at varying concentrations in the source effluent

Показатели	Значения на минус 20%		Эффективность очистки, %	Средние значения		Эффективность очистки, %	Значения на плюс 20%		Эффективность очистки, %
	Вход	Выход		Вход	Выход		Вход	Выход	
ХПК, мг/дм <sup>3</sup>	800,0	101,32	87,34	1000	136,3	86,37	1200	162,1	86,5
общий фосфор, мг/дм <sup>3</sup>	5,7	0,34	94,04	7,13	0,46	93,55	8,56	0,538	93,71
общий азот, мг/дм <sup>3</sup>	29,87	11,8	60,51	37,32	14,84	60,24	44,78	17,82	60,21

Для оценки чувствительности модели варьировали концентрации загрязнителей в диапазоне  $\pm 20\%$  от среднего значения в исходных стоках (таблица 1). Результаты моделирования и общая эффективность очистки КОС убойного цеха приведены в таблице 4. Как видно, выбранная схема обеспечивает достаточно высокую эффективность очистки во всем диапазоне изменения концентраций загрязняющих веществ на входе, кроме общего азота. Следовательно, необходим пересмотр подобранного комплекса оборудования и повторное проведение имитационного эксперимента.

### Заключение

Как показывают результаты исследования, имитационное моделирование работы очистных сооружений позволяет не только определить общую эффективность очистки комплекса, но и проверить достигаемый эффект очистки на отдельных сооружениях при варьировании исходных данных. На рассмотренном примере сточных вод убойного цеха птицефабрики показано, что требуемая эффективность очистки не достигается по общему азоту за счет возврата активного ила из вторичного отстойника в аэротенк, что потребует изменения конструктивных параметров аэротенка или пересмотра КОС с повторной проверкой результатов.

Имитационное моделирование способствует выбору наиболее эффективных режимов работы оборудования, позволяя избежать проектных ошибок и повысить энерго- и ресурсоэффективность КОС, тем самым обеспечивая разработку схемы с минимальной стоимостью жизненного цикла. Практическая значимость результатов исследования заключается также в возможности подбирать не только комплексные схемы очистки, но и отдельные аппараты предварительной, физико-химической, биологической очистки и обеззараживания, обеспечивающие эффективную работу локальных сооружений. Однако конструктивные особенности аппаратов должны проверяться в экспериментах на физических моделях.

Применение имитационного моделирования позволяет исключить трудоемкие расчеты при проектировании очистных сооружений и особенно в условиях неполного объема данных, ограниченного времени и при необходимости быстро сравнивать возможные сценарии изменения параметров стоков на входе в очистные сооружения.

При проектировании для модернизации существующих сооружений с целью корректировки и интенсификации процессов очистки применение имитационного моделирования дает возможность прогнозировать и вносить технологические изменения без воздействия на основные мощности установок.

В качестве дальнейших направлений исследования рассматривается сочетание двух подходов к моделированию – имитационного, основанного на математических моделях, и предиктивного анализа на базе физических и имитационных моделей.

### Литература

1. Баженов В.И., Эпов А.Н., Носкова И.А. Математическое моделирование объекта очистки сточных вод // Экологический вестник России. 2011. № 5. С. 46–55.
2. Межевова А.С., Новиков А.Е. Состав, структура и морфология осадка сточных вод // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. 2021. № 1. С. 389–398. DOI: 10.32786/2071-9485-2021-01-37
3. Панкова Г.А., Рублевская О.Н., Леонов Л.В. Оценка качественного состава хозяйственно-бытового стока на примере Санкт-Петербурга // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2015. № 12. С. 46–53.



4. Drewnowski J., Zaborowska E., De Vega C.H. Computer simulation in predicting biochemical processes and energy balance at WWTPs. *E3S Web Conf.* 2018, V. 30, article 03007. DOI: 10.1051/e3sconf/20183003007
5. Hvala N., Vrečko D., Bordon C. Plant-wide modeling for assessment and optimization of upgraded full-scale wastewater treatment plant performance. *Water Practice & Technology.* 2018, V. 13, no. 3, pp. 566–582. DOI: 10.2166/wpt.2018.070
6. Sakib F.S. Designing and modeling of a municipal wastewater treatment plant with GPS-X. *Research Square.* 2022, pp. 1–15. DOI: 10.21203/rs.3.rs-1209601/v1
7. Бабина О.И. Обзор имитационных моделей в планировании на предприятии // Фундаментальные исследования. 2015. № 12-6. С. 1173–1178.
8. Al Smadi S., Rahmat-Ullah Z., Hosny M., Bhattacharjee S., Shanableh A. Simulation of wastewater treatment performance of sequencing batch reactor under seasonal variations using GPS-X: A case study in Sharjah. *Advances in Science and Engineering Technology International Conferences.* IEEE, 2022. DOI: 10.1109/ASET53988.2022.9734873
9. Дубовик О.С., Иванович В.В. Программное моделирование очистных сооружений с помощью GPS-X // Передовые технологии в системах водоотведения населенных мест: сб. тр. Минск: Изд-во Белорус. гос. технол. ун-та, 2020. С. 77–80.
10. Суржко О.А., Оковитая К.О. Совершенствование технологии очистки сточных вод птицефабрик // Инновационная наука. 2016. № 12-2. С. 113–116.
11. Miron M., Frangu L., Ifrim G., Caraman S. Modeling of a wastewater treatment process using neural networks. *20th International Conference on System Theory, Control and Computing.* IEEE, 2016, pp. 210–215. DOI: 10.1109/ICSTCC.2016.7790667
12. Novikov A.E., Filimonov M.I., Dugin E., Golovanchikov A.B. Modeling a biological wastewater treatment system. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science.* 2020, V. 577, article 012010. DOI: 10.1088/1755-1315/577/1/012010
13. Баженов В.И., Эпов А.Н., Носкова И.А. Использование комплексов имитационного моделирования для технологий очистки сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника. 2014. № 2. С. 62–71.
14. Баженов В.И., Устюжанин А.В. Очистные сооружения канализации: метод математического моделирования // Экология производства. 2018. № 4. С. 74–80.
15. Эпов А.Н., Каннуникова М.А. Применение математического моделирования при расчете городских сооружений в условиях перехода на технологическое нормирование (НДТ) // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2016. № 6. С. 40–56.
16. Al-Adhaileh M., Alsaade F.W. Modelling and prediction of water quality by using artificial intelligence. *Sustainability.* 2021, V. 13, no. 8, article 4259. DOI: doi.org/10.3390/su13084259
17. Ramírez A.F., Valencia J.G.G., Rojas A.M., Avalos J.C.O. Analysis of the operating conditions of a wastewater treatment plant to determine the influence on the production of bioplastics. *E-proceedings of the 38th IAHR World Congress (September 1–6, 2019).* Panama. 2019, pp. 6244–6248. DOI: 10.3850/38WC092019-1691
18. Nasr M., Moustafa M.A.E., Seif H.A.E., Kobrosy G.E. Modelling and simulation of German BIOGEST/EL-AGAMY wastewater treatment plants – Egypt using GPS-X simulator. *Alexandria Engineering Journal.* 2011, V. 50, no. 4, pp. 351–357. DOI: 10.1016/j.aej.2011.05.003
19. Elachola F.F. Analysis and simulation of waste water treatment plant by using GPS-X software. *IJRASET.* 2022, V. 10, Is. 6, pp. 3493–3495. DOI: 10.22214/ijraset.2022.44688
20. Рыбка К.Ю., Щеголькова Н.М., Механизмы очистки сточных вод от биогенных элементов (азота и фосфора) в фито-очистных системах // Экосистемы: экология и динамика. 2018. Т. 2. № 4. С. 144–171. DOI: 10.24411/2542-2006-2018-10025
21. Соловьева Е.А. Технология очистки сточных вод и обработки осадков при глубоком удалении азота и фосфора из сточных вод // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2016. Т. 13. № 1. С. 93–99.
22. Амбросова Г.Т., Матюшенко Е.Н., Функ А.А., Синеева Н.В. Источники повышения концентрации фосфора в сточной жидкости, поступающей на очистные сооружения канализации, и способы их устранения // Строительство и техногенная безопасность. 2016. № 5. С. 24–31.

## References

1. Bazhenov V.I., Epov A.N., Noskova I.A. Mathematical modeling of sewage treatment object. *Environmental Vestnik of Russia.* 2014, no. 5, pp. 46–5. (In Russian)
2. Mezheva A.S., Novikov A.E., Composition, structure and morphology of sewage sludge. *Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex.* 2021. no 1. pp. 389–398. DOI: 10.32786/2071-9485-2021-01-37. (In Russian)
3. Pankova G.A., Rublevskaya O.N., Leonov L.V. Evaluation of the qualitative composition of domestic wastewater on example of St. Petersburg. *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie.* 2015. no 12. pp. 46–53. (In Russian)
4. Drewnowski J., Zaborowska E., De Vega C.H. Computer simulation in predicting biochemical processes and energy balance at WWTPs. *E3S Web Conf.* 2018, V. 30, article 03007. DOI: 10.1051/e3sconf/20183003007
5. Hvala N., Vrečko D., Bordon C. Plant-wide modeling for assessment and optimization of upgraded full-scale wastewater treatment plant performance. *Water Practice & Technology.* 2018, V. 13, no. 3, pp. 566–582. DOI: 10.2166/wpt.2018.070
6. Sakib F.S. Designing and modeling of a municipal wastewater treatment plant with GPS-X. *Research Square.* 2022, pp. 1–15. DOI: 10.21203/rs.3.rs-1209601/v1

7. Babina O.I. The review to creation of simulation models in planning at an enterprise. *Fundamentalnye issledovaniya*. 2015, no. 12-6, pp. 1173–1178. (In Russian)
8. Al Smadi S., Rahmat-Ullah Z., Hosny M., Bhattacharjee S., Shanableh A. Simulation of wastewater treatment performance of sequencing batch reactor under seasonal variations using GPS-X: A case study in Sharjah, UAE. *Advances in Science and Engineering Technology International Conferences*. IEEE, 2022. DOI: 10.1109/ASET53988.2022.9734873
9. Dubovik O.S., Ivanovich V.V. Software modelling of wastewater treatment plants using GPS-X. *Peredoviye tehnologii v sistemah vodootvedeniya naseleennyh mest*. Collection of works. Minsk, Belarusian State Technological University Publ., 2020. pp. 77–80. (In Russian)
10. Surzhko O.A., Okovitaya K.O. Improvement of wastewater treatment technology in poultry farms. *Innovacionnaya Nayka*. 2016. no 12–2. pp. 113–116. (In Russian)
11. Miron M., Frangu L., Ifrim G., Caraman S. Modeling of a wastewater treatment process using neural networks. *20th International Conference on System Theory, Control and Computing*. IEEE, 2016, pp. 210–215. DOI: 10.1109/ICSTCC.2016.7790667
12. Novikov A.E., Filimonov M.I., Dugin E., Golovanchikov A.B. Modeling a biological wastewater treatment system. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2020, V. 577, article 012010. DOI: 10.1088/1755-1315/577/1/012010
13. Bazhenov V.I., Epov A.N., Noskova I.A. The use of simulation modeling packages for wastewater treatment technologies. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2014. no. 2. pp. 62–71. (In Russian)
14. Bazhenov V.I., Ustyuzhanin A.V. Sewage treatment plants: method of mathematical modelling. *Journal of Industrial Ecology*. 2018. no 4. pp. 74–80. (In Russian)
15. Epov A.N., Kannunikova M.A. The use of mathematical modeling in the calculation of urban structures in the transition to technological regulation (BAT). *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie*. 2016, no 6, pp. 40–56. (In Russian)
16. Al-Adhaileh M., Alsaade F.W. Modelling and prediction of water quality by using artificial intelligence. *Sustainability*. 2021, V. 13, no. 8, article 4259. DOI: 10.3390/su13084259
17. Ramírez A.F., Valencia J.G.G., Rojas A.M., Avalos J.C.O. Analysis of the operating conditions of a wastewater treatment plant to determine the influence on the production of bioplastics. *E-proceedings of the 38th IAHR World Congress (September 1–6, 2019)*. Panama. 2019, pp. 6244–6248. DOI: 10.3850/38WC092019-1691
18. Nasr M., Moustafa M.A.E., Seif H.A.E., Kobrosy G.E. Modelling and simulation of German BIOGEST/EL-AGAMY wastewater treatment plants – Egypt using GPS-X simulator. *Alexandria Engineering Journal*. 2011, V. 50, no. 4, pp. 351–357. DOI: 10.1016/j.aej.2011.05.003
19. Elachola F.F. Analysis and simulation of waste water treatment plant by using GPS-X software. *IJRASET*. 2022, V. 10, Is. 6, pp. 3493–3495. DOI: 10.22214/ijraset.2022.44688
20. Rybka K.Yu., Shchegolkova N.M. Mechanisms of nutrients (nitrogen and phosphorus) removal from wastewater in constructed wetlands. *Ecosystems: Ecology and Dynamics*. 2018, V. 2, no. 4, pp. 144–171. DOI: 10.24411/2542-2006-2018-10025 (In Russian)
21. Solovieva E.A. Technology for wastewater treatment and precipitation treatment with deep nitrogen and phosphorus removal from wastewater. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2016, V. 13, no. 1, pp. 93–99. (In Russian)
22. Ambrosova G.T., Matyushenko E.N., Funk A.A., Sineeva N.V. Sources of phosphorus concentration increase in wastewater incoming to wastewater treatment plants and methods of its removal. *Construction and Industrial Safety*. 2016. № 5. pp. 24–31. (In Russian)

#### Информация об авторах

Татьяна Станиславовна Семенова – аспирант факультета экотехнологий

Ольга Ивановна Сергиенко – канд. техн. наук, доцент, доцент факультета экотехнологий

#### Information about the authors

Tatiana S. Semenova, Postgraduate Student, Faculty of Ecotechnology

Olga I. Sergienko, Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Faculty of Ecotechnology

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 15.02.2024

Одобрена после рецензирования 17.04.2024

Принята к публикации 25.04.2024

The article was submitted 15.02.2024

Approved after reviewing 17.04.2024

Accepted for publication 25.04.2024