

К ЦИФРОВИЗАЦИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА В ТЕХНИЧЕСКОМ ВУЗЕ

А. А. Баламутова, Н. С. Попов, С. Г. Толстых

*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический
университет», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: вычислительный эксперимент; исследовательские компетенции; моделирование; цифровое общество; цифровая экономика; цифровая экология.

Аннотация: Масштабное использование информационно-коммуникационных технологий в разных отраслях экономики страны предопределило ряд новых направлений по подготовке научных кадров, способных осуществлять исследования в цифровой сфере – с использованием динамических моделей объектов, систем с искусственным интеллектом, методов принятия решений в условиях неопределенности и т.д. В вузах подготовка кадров для цифровой экономики осуществляется на основе Федеральных государственных образовательных стандартов. Новизна новых требований к выпускникам вузов состоит в том, чтобы они обладали исследовательскими компетенциями, позволяющими применять знания, умения и навыки, основанные на цифровых технологиях. В работе формирование исследовательских компетенций является результатом использования деятельностного подхода к получению цифровой информации.

Введение

Общество, основанное на знаниях, – исторически закономерный этап в развитии цивилизации, на котором решающее значение имеют результаты мыслительной (информационной) деятельности человека. Это новая

Баламутова Анна Андреевна – аспирант кафедры «Природопользование и защита окружающей среды»; Попов Николай Сергеевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Природопользование и защита окружающей среды», e-mail: eco@mail.tstu.ru; Толстых Светлана Германовна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений», ТамбГТУ, Тамбов, Россия.

реальность наилучшим образом соотносится с ноосферологией академика В. И. Вернадского, проведшего анализ тенденций хозяйственной деятельности человека в биосфере и сделавшего вывод о грядущих качественных изменениях в отношениях общества с природой. В основу ответственного управления биосферными процессами он положил сознательную и созидательную силу общества, его постоянно растущие интеллектуальный и информационно-смысловой потенциалы.

В настоящее время информационные и информационно-коммуникационные технологии (ИКТ) являются драйверами развития экономики, науки, культуры и образования, универсальными средствами трансформации постиндустриального общества в информационное, использующее виртуальную реальность, робототехнику, цифровое управление производством, искусственный интеллект, машинное обучение, обработку больших потоков данных и многое др.

Вопросам информатизации российского общества в последнее время уделяется особое внимание. В утвержденной в России «Стратегии развития информационного общества РФ на 2017 – 2030 гг.» информационное общество рассматривается как «общество, в котором информация и уровень ее применения и доступности кардинальным образом влияют на экономические и социокультурные условия жизни граждан» [1]. В Указе Президента РФ от 7 мая 2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» утверждены национальные проекты (программы) по ряду направлений, включая образование, экологию, науку, цифровую экономику и др. В частности, в сфере образования ставятся задачи модернизации профессионального образования посредством внедрения адаптивных, практико-ориентированных и гибких образовательных программ. В распоряжении Правительства РФ от 28.07.2017 г. № 1632-р «Об утверждении программы «Цифровая экономика Российской Федерации» подчеркивается значимость формирования *исследовательских компетенций* в сфере цифровой экономики, использования отечественного программного обеспечения и оборудования. К основным целям направления, касающегося кадровой политики и образования, относится и создание ключевых условий для подготовки кадров цифровой экономики.

Вследствие этого Федеральные государственные образовательные стандарты (ФГОС) высшего образования практически по всем направлениям подготовки кадров в РФ содержат дисциплины прямо или косвенно использующие информационные технологии. В их числе: языки программирования и моделирования, электронные обучающие ресурсы, универсальные пакеты программ, электронные учебные пособия, средства мультимедиа, сайты, порталы, сервисы Web 2.0, smart-технологии, подкасты, вебинары, онлайн-курсы и многое др.

Общие требования к электронным образовательным ресурсам, используемым в процессе обучения с применением ИКТ, содержатся в национальном стандарте РФ: ГОСТ Р 53620–2009 Информационно-коммуникационные технологии в образовании. Электронные образовательные ресурсы.

Ключевыми компетенциями в сфере цифровой экономики являются:

- 1) способность обучающихся использовать цифровые средства для достижения поставленных целей;
- 2) умение генерировать новые нестандартные идеи для решения задач цифровой экономики;
- 3) способность выбора нужной информации, ее анализа и синтеза, систематизации, хранения и практического использования;
- 4) знание основ цифровой безопасности и конфиденциальности данных;
- 5) умение разрабатывать цифровые модели процессов, относящихся к профессиональной предметной деятельности.

Распоряжение Правительства РФ от 08.12.2021 № 3496-р утверждает стратегическое направление в области цифровой трансформации отрасли экологии и природопользования. В ходе реализации данного направления должны внедряться такие технологии, как искусственный интеллект, аналитическая обработка данных, цифровой двойник, большие данные и ряд др. Для достижения «цифровой зрелости» отрасли, в числе прочего, необходимо одновременное развитие кадров «цифровой экологии» в высших учебных заведениях.

В Тамбовском государственном техническом университете (ТГТУ) на кафедре «Природопользование и защита окружающей среды» обучают бакалавров по двум направлениям: 03.05.06 – «Экология и природопользование» и 20.03.01 – «Техносферная безопасность» и двум аналогичным направлениям подготовки магистрантов: 05.04.06 и 20.04.01. Для второй категории обучающихся особую важность представляют *исследовательские компетенции* в сфере цифровизации экологии, свидетельствующие о готовности выпускника вуза работать с цифровыми технологиями в проектной и изыскательской деятельности, обработки геоинформационных данных, создания эколого-ориентированных экспертных систем, организации автоматизированного рабочего места эколога, применения нейросетевых программ диагностики проблемных ситуаций, возникающих в природо-промышленных системах [2].

Для каждого из названных видов практической деятельности магистров в период их подготовки требуются цифровые дидактические материалы, позволяющие обучающимся достичь глубокого научного понимания профессиональных качеств магистра-эколога и способствующих развитию его деятельности в направлении адаптации к новым вызовам общества и поиска путей перехода неустойчивой современной экономики на траекторию устойчивого долгосрочного развития. С учетом этого смысл *исследовательских компетенций* состоит в том, чтобы магистрант был способен:

- 1) налаживать и обобщать информацию о структуре и функциях объектов исследования;
- 2) обосновывать принадлежность исследуемого объекта к известным типовым категориям;
- 3) формулировать цели, задачи и масштабы проведения научного исследования;
- 4) знать особенности системного подхода к исследованию объекта;

- 5) выдвигать и проверять научные гипотезы в ходе проведения вычислительного эксперимента;
- 6) планировать проведение многофакторных междисциплинарных исследований на основе теории планирования эксперимента;
- 7) владеть технологией проведения вычислительных экспериментов на математической модели с применением метода проб и ошибок (Монте-Карло), теории игр, экспертных оценок и др.;
- 8) сопоставлять результаты вычислительного эксперимента с ранее известными фактами и вносить необходимые коррективы в реализуемую методику исследования;
- 9) верифицировать достоверность новых научных знаний;
- 10) использовать электронные и программные средства получения, обработки и демонстрации результатов исследования.

Цель исследования – разработка цифровых дидактических материалов подготовки магистров-экологов в сфере планирования и проведения научных исследований на основе средств имитационного моделирования.

Объект цифрового исследования

В качестве учебного объекта для проведения научного исследования выбрана очистная система канализации (**ОСК**) г. Тамбова, являющаяся базой практики бакалавров и магистров-экологов ТГТУ. Особый интерес к работе ОСК вызван и тем обстоятельством, что по постановлению городской администрации на период до 2030 г. проводится реконструкция очистных сооружений для обеспечения глубокой очистки сточных вод.

Важнейшие процессы биологической очистки в ОСК реализуются в подсистеме аэротенк-отстойник (**А-О**), сложность восприятия которых связана с их зависимостью от концентрации примесей и расхода входного потока, температуры окружающей среды, состава иловой массы, активности различных групп микроорганизмов, рН водной среды и т.п.

Для понимания особенностей технологической очистки целесообразно использовать математическую модель процессов, происходящих в аэротенке, и на ее основе проводить вычислительные эксперименты по выявлению причин и характера зависимостей процессов от внешних и внутренних факторов. Такие наглядные эксперименты могут существенно помочь в формировании исследовательских компетенций у магистрантов-экологов. Для этих целей в работе использована динамическая модель ASM1, рекомендованная Международной ассоциацией водников (*англ.* International Water Association (**IWA**)) для проектирования очистных сооружений [3].

Данная модель относится к категории детерминированных, построенных на основе материальных балансов органических и неорганических соединений. Биологические реакции в ней используют известную кинетику Моно. Она содержит 13 компонент (различные типы субстратов и биомасс), 8 фундаментальных процессов (скоростей роста разных групп микроорганизмов и поглощения субстратов) и 20 кинетических констант.

Определенное удобство работы с ASM1 дала ее запись в матричном виде (матрицы Петерсона), что позволяет лучше понимать структуру модели и осуществлять ее расширение на новые типы процессов. В настоящей работе акцент делается на три дифференциальных уравнения, описывающих процесс очистки легко биоразлагаемого S_s и медленно биоразлагаемого X_s субстратов гетеротрофными микроорганизмами X_{BH} .

Система трех уравнений, взятых из модели ASM1 выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{dS_s}{dt} = & -\frac{\hat{\mu}_H}{Y_H} \left(\frac{S_s}{K_s + S_s} \right) \left(\left(\frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right) + \eta_g \left(\frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \right) X_{BH} + \\ & + k_h \left(\frac{X_{BH}}{K_x X_{BH} + X_s} \right) \left(\left(\frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right) + \eta_h \left(\frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \right) X_s + \\ & + \frac{1}{\tau} (S_{s,in} - X_s); \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dX_s}{dt} = & (1 - f_p) b_H X_{BH} + (1 - f_p) b_A X_{BA} - k_h \left(\frac{X_{BH}}{K_x X_{BH} + X_s} \right) \times \\ & \times \left(\left(\frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right) + \eta_h \left(\frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \right) X_s + \frac{1}{\tau} (X_{s,in} - X_s); \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{dX_{BH}}{dt} = & \hat{\mu}_H \left(\frac{S_s}{K_s + S_s} \right) \left(\left(\frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right) + \eta_g \left(\frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \right) X_{BH} - \\ & - b_H X_{BH} + \frac{1}{\tau} (X_{BH,in} - X_{BH}), \end{aligned} \quad (3)$$

где b_A , b_H – коэффициенты отмирания соответственно автотрофов и гетеротрофов, сут⁻¹; f_p – часть биомассы, приводящая к образованию твердых частиц; k_h – константа скорости гидролиза, сут⁻¹; K_{OH} , K_x , K_{NO} – коэффициенты полунасыщения соответственно по кислороду гетеротрофов, для дисперсного биоразлагаемого субстрата, для процесса нитрификации, мг/л; S_{NO} – концентрация нитритного и нитратного азота, мг/л; S_O – растворенный кислород, мг/л; $S_{s,in}$ – легко биоразлагаемый субстрат на входе, мг/л; t – время, сут; X_{BA} , X_{BH} – активные автотрофная и гетеротрофная биомассы соответственно, мг/л; $X_{BH,in}$ – активная гетеротрофная биомасса во входном потоке, мг/л; X_s – медленно биоразлагаемый субстрат, мг/л; $X_{s,in}$ – медленно биоразлагаемый субстрат во

входном потоке, мг/л; Y_H – скорость прироста гетеротрофной биомассы; $\hat{\mu}_H$ – максимальная удельная скорость роста гетеротрофов, сут⁻¹; τ – среднее время пребывания жидкости в аэротенке, сут; η_g , η_h – поправочные коэффициенты соответственно для $\hat{\mu}_H$ и гидролиза при анаэробических условиях.

Заметим, что $\tau = V/Q$, где V – объем аэротенка, м³; Q – входной поток сточной воды, м³/сут. Для аэротенков 1, 2 и 3 очереди Тамбовских ОСК величина τ составляет 7,363, 9,21 и 11,975 ч соответственно.

В отличие от полной модели ASM1 уравнения (1) – (3) являются ее частью, позволяющей поэтапно отрабатывать схему вычислительного эксперимента.

План проведения вычислительного эксперимента

Организация учебного эксперимента с использованием математической модели оправдана по причине того, что модель в компактном виде содержит всю необходимую информацию об объекте исследования. В данном случае речь идет о процессе биоокисления углеродосодержащих веществ гетеротрофными микроорганизмами. Смысл вычислительного эксперимента на модели (1) – (3) сводится к получению семейства решений численным методом, по которому можно определить чувствительность процессов биоокисления и возможному изменению начальных условий $X_s(0)$, $S_s(0)$ и $X_{BH}(0)$, стехиометрических коэффициентов Y_H , f_p и кинетических параметров $\hat{\mu}_H$, b_H , η_h , K_x , k_h , K_{OH} , K_{NO} , а также расхода сточной воды Q . Такая вариативность в эксперименте подчеркивает тот факт, что аэротенк относится к категории открытых систем, вследствие чего возможны колебания расхода Q , состава примесей и активности групп микроорганизмов. При этом могут меняться и параметры модели. Примеры «стандартных» наборов коэффициентов, используемых в модели процесса с активным илом при температуре 20 °С приведены в работе [3].

Программа организации вычислений на основе (1) – (3) в целях репрезентативности строилась по схеме двухуровневого полного факторного эксперимента (ПФЭ) [4]. В качестве входных варьируемых переменных выбраны: среднее время пребывания частиц жидкости $HRT \in [0,3; 0,5]$ и начальные концентрации $S_s(0) \in [100; 500]$, $X_s(0) \in [100; 400]$ и $X_{BH}(0) \in [1; 11]$. В данном вычислительном эксперименте использовались следующие значения переменных: $b_A = 0,18$; $b_H = 0,62$; $f_p = 0,08$; $k_h = 3$; $K_{OH} = 0,5$; $K_x = 0,03$; $S_{NO} = 100$; $K_{NO} = 0,5$; $S_O = 2$; $S_{s,in} = 300$; $X_{BA} = 620$; $X_{BH,in} = 5$; $X_{s,in} = 200$; $Y_H = 0,4$; $\hat{\mu}_H = 0,6$; $\tau = 0,5$; $\eta_g = 0,8$; $\eta_h = 0,4$. Переменными отклика являлись расчетные значения концентрации $S_s(t)$, $X_s(t)$ и $X_{BH}(t)$ на выходе из аэротенка. Часть полученных решений приведена на рис. 1, а – е.

Таким способом получен оригинальный цифровой материал, на основе которого в учебном процессе формируются *исследовательские компетенции*. Для этих целей преподавателями поставлены следующие дидактические задачи:

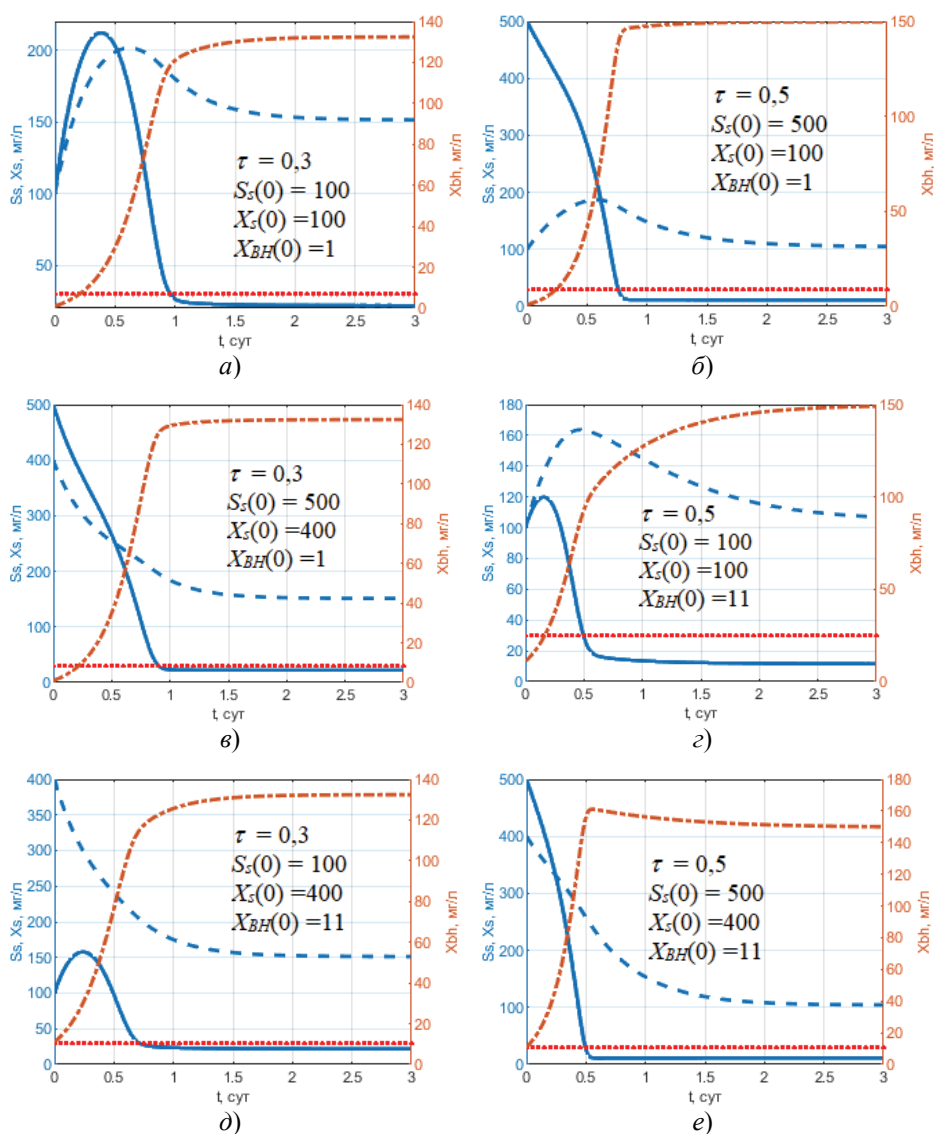


Рис. 1. Результаты вычислительного эксперимента:

— $S_s(t)$; - - $X_s(t)$; - - - $X_{bh}(t)$; * * * нормативное значение 30 мг/л

- 1) получение знаний о структуре модели, процессах гетеротрофного окисления, кинетике Моно, лимитирующих факторах и ограничениях использования модели;
- 2) приобретение навыков численного интегрирования системы дифференциальных уравнений методом Рунге–Кутты четвертого порядка с автоматическим выбором шага;
- 3) определение динамических и статических режимов работы аэротенка по результатам решения системы уравнений (1) – (3);
- 4) составление плана проведения вычислений с использованием теории организации многофакторного эксперимента;

5) анализ графических результатов в целях оценки влияния начальных значений концентрации примесей, внешних условий и параметров модели на результаты расчетов;

6) анализ качества очистки стоков при различных условиях ведения процесса биокисления;

7) дальнейшее расширение вычислительного эксперимента за счет включения в модель уравнений нитри- и динитрофикации, модели отстойника и рецикла ила из отстойника в аэротенк.

Формирование компетенций на основе вычислительного эксперимента

Формирование исследовательских компетенций у магистрантов-экологов достигается в результате их работы с цифровой моделью под контролем преподавателя. Смысловое содержание данного процесса отвечает названным выше дидактическим задачам, а сам процесс направляется тест-программой, включающей три блока вопросов из категории: «знать», «уметь» и «владеть».

В блоке «знать» магистранту необходимо самостоятельно ответить на ряд вопросов:

- по истории создания моделей серии ASM, их практическому применению с учетом содержащихся в них допущений;
- по составу и размерности переменных состояния модели;
- о нормативных требованиях, предъявляемых к очистке стоков от примесей;
- по выбору значений параметров модели и стехиометрических коэффициентов, а также по особенностям использования кинетики Моно;
- о системном планировании многофакторных вычислительных экспериментов.

Вопросы из блока «уметь» нацеливают магистранта на интерактивный режим работы с моделью, позволяя:

- формулировать промежуточные цели и задачи проводимого исследования;
- объяснять необходимость использования численных методов интегрирования уравнений модели и предлагать способы преодоления сложностей в решениях, при наличии в них «быстрых» и «медленных» компонент;
- определять на графиках динамические и статические режимы работы аэротенка и обосновывать причины непредсказуемого поведения процессов биокисления во времени;
- объяснять возможные причины неэффективной очистки сточных вод с использованием графического материала.

В блоке «владеть» вопросы тест-программы мотивируют магистранта на проведение серии вычислительных экспериментов по разработанному плану с поэтапным применением наборов параметров и стехиометрических коэффициентов. Вариативность условий проведения экспериментов позволяет закрепить навыки магистранта до определенного автоматизма в использовании пакета программ MATLAB, организации вывода графических результатов в разных масштабах, оформлении отчета о проведенных исследованиях, подготовки презентации и т.д.

Часть готовых ответов магистранта проверяется автоматически на компьютере, а часть является предметом дискуссии со студентами и преподавателем в ходе презентации результатов исследовательской работы.

Заключение

Цифровизация учебного процесса в вузах является закономерным этапом развития образовательной системы Российской Федерации. Информационно-коммуникационные технологии позволяют существенно расширить круг познавательных задач и способствуют более рациональному формированию новых профессиональных компетенций. Что касается приобретения исследовательских компетенций у магистров-экологов, в работе продемонстрирован деятельностный подход к генерации научных знаний в результате проведения вычислительных экспериментов с математической моделью азротенка. Его эффективность подтверждается очевидным интересом обучающихся к научно-исследовательской работе на компьютере. Представленный подход применим также к магистрантам других специальностей.

Список литературы

1. О стратегии Развития информационного общества в Российской Федерации на 2017 – 2030 годы : Указ Президента РФ от 9 мая 2017 г. № 203. – Текст: электронный. – URL : <http://www.kremlin.ru/acts/bank/41919v> (дата обращения: 26.04.2024).
2. Баламутова, А. А. Диагностика состояний функционирования объектов региональной экономики в проблеме устойчивого развития / А. А. Баламутова, Н. С. Попов, А. В. Андреев // Вестник Тамб. гос. техн. ун-т. – 2023. – Т. 29, № 1. – С. 75 – 90. DOI: 10.17277/vestnik.2023.01.pp.075-090
3. Очистка сточных вод : пер. с англ. / М. Хенце, П. Армоэс, Й. Ля-Кур-Янсен, Э. Арван. – М.: Мир, 2006. – 480 с.
4. Рузинов, А. П. Статистические методы оптимизации химических процессов / А. П. Рузинов. – М. : Химия, 1972. – 200 с.

References

1. available at: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/41919v> (accessed 26 April 2024).
2. Balamutova A.A., Popov N.S., Andreyev A.V. [Diagnostics of the states of functioning of regional economic objects in the problem of sustainable development], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2023, vol. 29, no. 1, pp. 75-90. DOI: 10.17277/vestnik.2023.01.pp.075-090 (In Russ., abstract in Eng.)
3. Khentse M., Armoes P., Lya-Kur-Yansen Y., Arvan E. *Ochistka stochnykh vod* [Wastewater treatment], Moscow: Mir, 2006, 480 p. (In Russ.)
4. Ruzinov A.P. *Statisticheskiye metody optimizatsii khimicheskikh protsessov* [Statistical methods for optimizing chemical processes], Moscow: Khimiya, 1972, 200 p. (In Russ.)

Digitization of the Education Process at a Technical University

A. A. Balamutova, N. S. Popov, S. G. Tolstykh

Tambov State Technical University, Tambov, Russia

Keywords: computational experiment; research competencies; modeling; digital society; digital economy; digital ecology.

Abstract: The large-scale use of information and communication technologies in various sectors of the country's economy has predetermined a number of new directions for training scientific personnel capable of carrying out research in the digital sphere – application of dynamic models of objects, systems with artificial intelligence, decision-making methods under conditions of uncertainty and etc. In universities, training for the digital economy is carried out on the basis of the Federal Educational Standards (FSES). The novelty of the new requirements for university graduates is that they have research competencies that allow them to apply knowledge, skills and abilities based on digital technologies. In the paper, the formation of research competencies is the result of using an activity-based approach to obtaining digital information.

© А. А. Баламутова, Н. С. Попов, С. Г. Толстых, 2024