

ленного экологического мониторинга, сформулируем типовой состав системы промышленного экологического мониторинга стационарных источников выбросов загрязняющих веществ, обладающий при этом вариативностью применяемых средств измерения:

- 1) газоаналитический блок с функцией измерения объемной доли влаги и системой пробоподготовки для экстрактивных газоанализаторов;
- 2) расходомер;
- 3) датчики давления и температуры;
- 4) пылемер (если в выбросах присутствуют взвешенные частицы).

#### Список литературы

1. EPA Handbook: Optical and Remote Sensing for Measurement and Monitoring of Emissions Flux of Gases and Particulate Matter; United States Environmental Protection Agency. USA, 2018. 344 p.
2. Air Pollution Prevention Manual on Emission Monitoring; Federal Environment Agency. Germany, 2008. 477 p.
3. Frenzel F., Grothey H., Habersetzer C. et al. Industrial Flow Measurement Basics and Practice. ABB Automation Products GmbH. Germany, 2011. 290 p.
4. Castellani B., Morini E., Filippini M. et al. Comparative Analysis of Monitoring Devices for Particulate Content in Exhaust Gases. Sustainability. 2014. V. 6, pp. 4287-4307.
5. Current Knowledge of Particulate Matter (Pm) Continuous Emission Monitoring; United States Environmental Protection Agency. US Office of Air Quality. USA, 2000. 86 p.
6. Росляков П. В., Кондратьева О.Е. Внедрение систем непрерывного контроля и учета выбросов в атмосферу на предприятиях со значительным негативным воздействием на окружающую среду // Экология и промышленность России. 2016. №8. С.12-19.
7. ECMPS Reporting Instructions Quality Assurance and Certification; United States Environmental Protection Agency. 2018. 190 p.
8. Xiang B., Zhang M., Yang H. et al. Prediction of Acid Dew Point in Flue Gas of Boilers Burning Fossil Fuels // Energy Fuels. 2016. V. 30, № 4. p. 3365-3373.
9. Keep P. V., Sakko R. Flue gas heat recovery through the acid dew point // PTQ Q2 Journal. 2019. pp. 93-97.
10. Лившиц С. А., Лебедев В. А., Лебедев Р. В. Методика расчета температуры точки росы уходящих газов, при смешанном сжигании газа и мазута в топках котлов // Проблемы энергетики. 2008. № 3-4, с. 51-57.

*Петров Алексей Михайлович — ведущий инженер,  
Николаев Юрий Евгеньевич — руководитель отдела автоматизированных систем  
мониторинга и диагностики ООО «НТЦ «ЭНЕРГОАВТОМАТИЗАЦИЯ».  
Контактный телефон (347) 286-16-84. E-mail: a.petrov@ntcea.ru y.nikolaev@ntcea.ru*

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕРРИТОРИЯМИ РЕЧНЫХ ДОЛИН

**А.А. Воронин, К.Е. Дубинко (ФГАОУ ВО «Волгоградский государственный университет»)  
И.И. Исаева (ООО "АдСнайпер")**

*Предложен подход к синтезу системы эколого-экономического управления территориями речных долин, сочетающий гидротехнические проекты и организационные механизмы стабилизации их экосистем. Представлены результаты имитационного междисциплинарного моделирования проекта устойчивого обводнения экологически значимых территорий северной части Волго-Ахтубинской поймы.*

*Ключевые слова: эколого-экономическое управление, речные долины, слабоустойчивые системы, Волго-Ахтубинская пойма, гидродинамическое и геоинформационное моделирование, оптимизация потоков в сетях.*

#### Введение

Традиционно проблема эколого-экономического управления (ЭЭУ) социоприродохозяйственными системами (СПХС) подразумевает их устойчивость, то есть наличие экономически допустимого множества безубыточных действий хозяйствующих субъектов. Однако в слабоустойчивых системах это множество может не существовать. Типичным представителем слабоустойчивых систем являются речные долины. Для них актуальны опасности чрезвычайных затоплений и одновременно опасности хронического обезвоживания в результате длительного антропогенного воздействия. Многокритериальность оптимизационной задачи и неопределенность климатических параметров переводят проблему проектирования системы ЭЭУ в область принятия решений.

На общем фоне деградации пойменных территорий особенной остротой отличается проблема деградации северной части Волго-Ахтубинской поймы (ВАП), состояние которой определяется величиной расхода  $Q$ , длительностью  $t$  первой фазы паводкового гидрографа Волжской ГЭС (ВГЭС) и динамикой ее русловой структуры. Анализ когнитивной модели функционирования ВАП показал [1, 2], что главными факторами ее прогрессирующего природно-техногенного обезвоживания и, соответственно, деградации ее пойменной экосистемы являются снижение объема весенних паводков и прогрессирующее понижение уровня вод р. Волги вследствие функционирования ВГЭС. Управление этой территорией затруднено ее большим размером (площадь —  $> 800 \text{ км}^2$ , число малых русел —  $> 200$  ед.) и функциональной неоднородностью структуры (рис. 1),

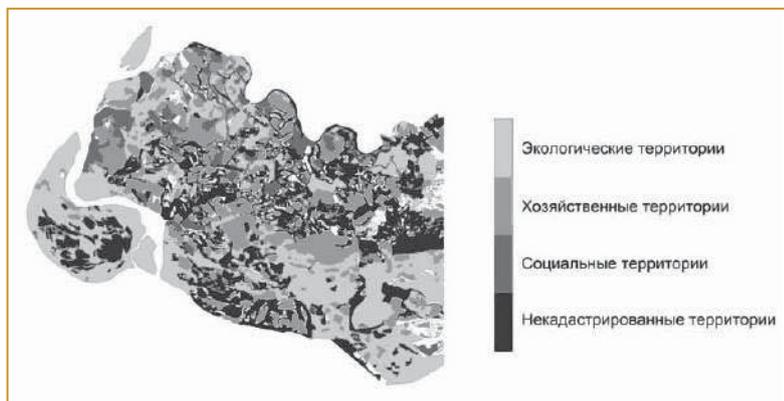


Рис. 1. Социоприродохозяйственная структура территории северной части ВАП

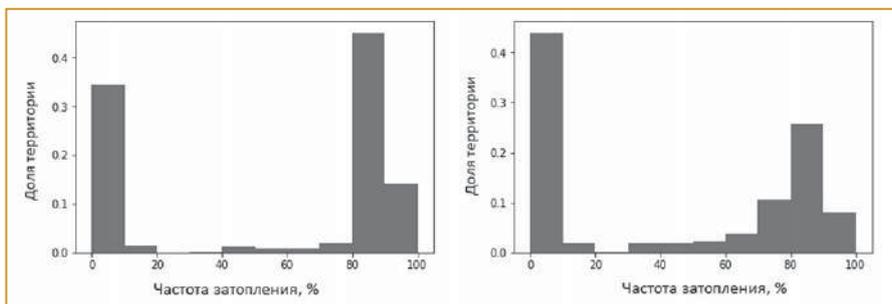


Рис. 2. Частотное распределение величины относительной площади затопления территории северной части ВАП первых (слева) и последних (справа) 20 лет функционирования ВГЭС

близостью крупных городов, условиями экономической эффективности ВГЭС.

Проблемы ЭЭУ территориями речных долин являются предметом многочисленных исследований. Для решения этих проблем разрабатываются различные системы поддержки принятия решений [3–5]. В отношении используемых методов и технологий эти СППР объединяет междисциплинарное моделирование, ГИС-технологии, сценарный подход, многокритериальность задач оптимизации.

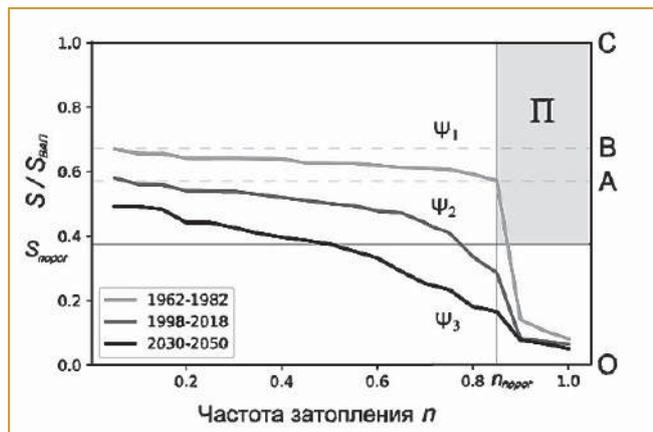


Рис. 3. Интегральные функции распределения относительной площади затопления северной части ВАП первых и последних 20 лет функционирования ВГЭС, а также прогноз на будущий 20-летний период

Главной целью ЭЭУ слабоустойчивой территориальной системой является стабилизация ее экосистемы в условиях негативной природно-антропогенной динамики и социально-экономического развития. Для реализации указанной цели требуется введение искусственных механизмов воспроизводства системообразующих факторов существования экосистемы. Масштаб последних накладывает ограничения на реализацию сформулированных задач.

**Основные элементы системы ЭЭУ северной частью Волго-Ахтубинской поймы**

**Программно-алгоритмический комплекс**

Для реализации ЭЭУ северной частью ВАП разработан аппаратно-программно-алгоритмический комплекс, характеристики которого подробно описаны в [6, 7]. Приведем лишь их краткое описание.

Главной частью комплекса является программно-алгоритмический модуль «ЭКОГИС». Его основой является цифровая модель рельефа (ЦМР) ВАП — сеточная функция с размером ячейки 25 метров, построенная на основе спутниковых данных ASTER и SRTM. Актуализация ЦМР производится ежегодно с использованием космических снимков (спутник ДЗЗ Landsat 8) и GPS-измерений границ паводковых затоплений. Используемая численная модель динамики поверхностных вод учитывает все основные факторы затопления территории. Строятся цифровые карты затоплений (высот стояния вод и скоростей водных потоков). Адекватность моделирования подтверждается результатами сравнения с данными наблюдений уровня воды на четырех гидропостах в северной части ВАП и площади водной поверхности в период 2012–2018 гг. с использованием данных спутника Landsat-7. Модуль «ЭКОГИС» используется для получения данных о неуправляемом распределении паводковых вод и имитаций результатов виртуальных конфигураций гидротехнических проектов.

Для расчета эффектов паводкового затопления созданы цифровые кадастровые карты и карты социоприродохозяйственных индексов. Социоприродохозяйственная структура территории северной части ВАП представлена на рис. 1.

Для моделирования проектов изменения гидрологической структуры ВАП реализована иерархически-сетевая модель русловой структуры, а также редактор русел.

**Модель динамики главных факторов воспроизводства экосистемы ВАП**

Для моделирования многолетней динамики паводкового гидрологического режима ВАП на основе данных наблюдений и результатов имитационного

гидродинамического и геоинформационного моделирования построена зависимость изменения уровня паводковых вод  $\Delta H(Q, T)$  ( $Q$  — величина паводкового расхода ВГЭС,  $T$  — годы паводков) в основании Волго-Ахтубинского канала, определяющего паводковую динамику ВАП. С использованием этой зависимости и результатов численного гидродинамического моделирования произведена реконструкция карт паводкового затопления первых и последних 20 лет функционирования ВГЭС. Результаты представлены на рис. 2 соответствующими функциями распределения площади территории паводкового затопления  $S(n)$ , где  $n$  — частота затопления территории площадью  $S$ . На рис. 3 отмечены ретроспективная ( $\Psi_1$ ), современная ( $\Psi_2$ ) и прогнозная ( $\Psi_3$ ) кривые интегральных функций распределения  $S(n)$  соответствующих 20-летних периодов. В прогнозе использовались гидрографы последнего 20-летия и квадратичная экстраполяция динамической кривой  $\Delta H(Q, T)$ . Длины отрезков ОА, АВ, ВС равны соответствующим значениям устойчиво затапливаемой, неустойчиво затапливаемой и незатапливаемой частей территории для 1962–1982 гг. На рис. 4 представлены результаты порогового агрегирования соответствующих карт паводковых затоплений.

Рис. 4 демонстрирует значительный рост территории с нестабильным характером паводкового затопления. Эта территория, утратившая пойменную экосистему, непригодна и для социально-экономического освоения. Вместе с этим произошло двукратное сокращение площади стабильно затапливаемой территории — биотопа пойменной экосистемы.

#### **Модель устойчивости экосистемы ВАП и постановка главной задачи ЭЭУ**

Упрощенная модель устойчивости пойменной экосистемы может быть представлена значениями параметров  $S$ ,  $n$  и соответствующими им агрегированными картами паводковых затоплений территории, определяющими устойчивое воспроизводство ее экосистемы.

Таким образом, основной задачей ЭЭУ является достижение и поддержание пороговых значений  $S$ ,  $n$  в условиях негативной русловой динамики (прохождение кривой  $\Psi_3$  через область П). Для этой цели предлагается увеличить поступление паводковых вод

на территорию поймы путем установки управляемых дамб в магистральных руслах р. Волги и/или р. Ахтубы, а также создание в многочисленных малых руслах дамб с изменяемым поперечным сечением.

#### **Структура системы ЭЭУ ВАП**

В предлагаемую систему ЭЭУ ВАП входит (а) комплекс гидротехнических проектов в магистральных руслах: обводного канала из Волгоградского водохранилища в р. Ахтуба, паводковой дамбы в русле р. Волга, серии паводковых дамб в русле р. Ахтуба. Как показали вычислительные эксперименты, без реализации хотя бы одного из этих проектов в ближайшие десятилетия стабилизация паводкового затопления пойменного биотопа даже на современном уровне невозможна. Целью проектов группы (б) — установка паводковых дамб в малых руслах, углубления малых русел ВАП — является распределение паводковых вод на пойменной территории в экологических и социально-экономических целях.

Большая часть этих проектов и механизмов исследована ранее (например, [8–10]). Здесь представим некоторые результаты совместной оптимизации проектов установки паводковой дамбы в р. Ахтуба и дамб в малых руслах северной части ВАП.

#### **Задача и алгоритмы управления структурой малых русел**

Задачей управления структурой малых русел в рамках проекта устойчивого обводнения экологически значимой территории является определение необходимого числа, мест установки и закона управления паводковыми дамбами (зависимости площади их поперечного сечения от величины расхода  $Q$  паводкового гидрографа ВГЭС). Для роста общего обводнения при малых паводках использовалась виртуальная паводковая дамба на р. Ахтубе.

Решение оптимизационной задачи происходило в два этапа. Первый — определение оптимальных потоков в малых руслах, второй — поиск закона управления сечением дамб, обеспечивающего эти потоки. Решение этой задачи встречает ряд проблем. Первой из них является непостоянство паводковой структуры малых русел и ее потоков. Вычислительные эксперименты показали, что русловая структура ВАП в значительной мере обусловлена величинами водных потоков: при их относительно малых величинах она хорошо описывается бинарным графом, при возрастании потоков она переходит в динамическую сетевую структуру, сложность которой сначала возрастает, а затем убывает с течением времени затопления поймы. Величины и даже направления потоков в руслах

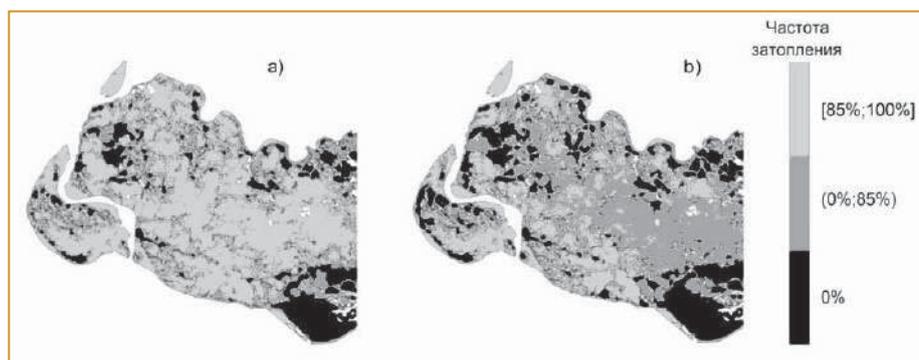


Рис. 4. Агрегированные карты частот паводкового затопления северной части ВАП первых и последних 20 лет функционирования Волжской ГЭС

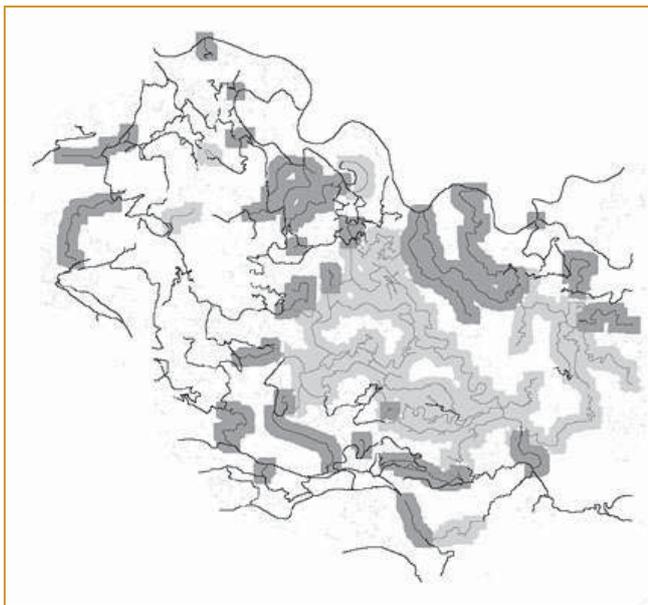


Рис. 5. Оптимальное расположение 29 паводковых дамб в малых руслах ВАП для увеличения затопления целевой территории проекта для  $Q=21000\text{ м}^3/\text{с}$ ,  $t=10$  сут.

зависят от обоих параметров гидрографа  $Q$  и  $t$ . Второй проблемой является высокая комбинаторная сложность оптимизационной задачи вследствие большого числа русел ( $> 200$  ед.) в сочетании с высокой вариативностью паводкового гидрографа и высокой вычислительной сложностью расчета эффекта для каждого варианта расположения дамб. Третьей проблемой является нелинейность функций потерь потока в русловой сети и целевой функции — площади затопленной территории.

Программный комплекс «ЭКОГИС» позволяет построить адекватную математическую модель управляемой системы с учетом многочисленных сложных

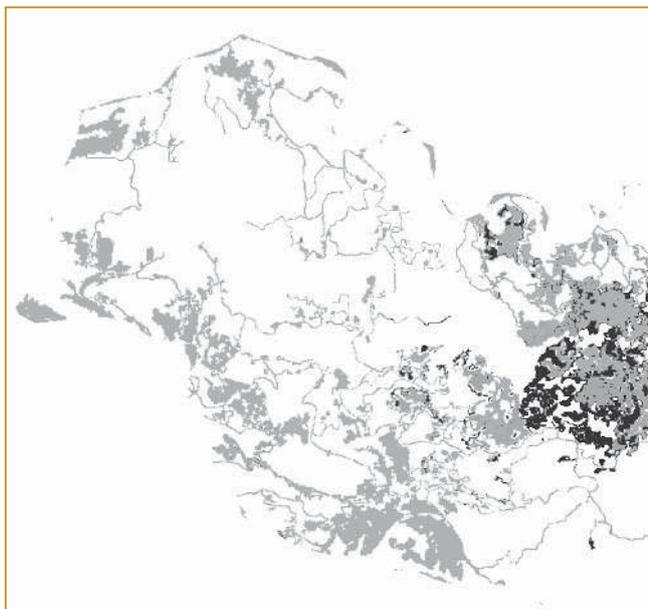


Рис. 6. Проектное приращение затопленной целевой территории для  $Q=21000\text{ м}^3/\text{с}$ ,  $t=10$  сут.

эффектов динамики паводковых вод на пересеченном рельефе. В связи с этим не удастся воспользоваться известными эффективными алгоритмами оптимизации. По этой причине требуется разработка специальных эвристик для поиска субоптимальных решений нелинейных задач оптимизации. В такой ситуации лучшим подходом является компромисс между сложностью, адекватностью и эффективностью, критерием оптимальности которого является максимальность гарантированного (по погрешности моделирования) результата управления при равных погрешностях каждой из входящих в комплекс моделей.

Для решения поставленной задачи предложен метод, сочетающий точные и эвристические алгоритмы решения семейства задач оптимизации, построенных для различных вариантов модели управляемой системы. Идея метода — замена нестационарной модели управляемой системы последовательностью согласованных между собой стационарных моделей и решение для них соответствующих оптимизационных задач.

Период затопления поймы (10...15 сут.) разбивался на этапы, равные 1...2 сут. Для каждого этапа построен адекватный вариант модели каждого элемента управляемой системы: русловой структуры, потерь потока на структуре, целевой функции. На основании результатов предварительных вычислительных экспериментов из этих элементов составлялась актуальная задача управления потоками и использовался адекватный алгоритм ее решения. На первых этапах для иерархической структуры использовался многошаговый метод динамического программирования, затем для сетевых структур — классические методы оптимизации потоков на сетях. Целевые транспортные русла, наполнение которых максимизировалось до заданных пределов, с каждым этапом отодвигались вглубь пойменной территории. На последних этапах для нелинейной целевой функции площади затопленной территории и относительно простой иерархической структуры русловой сети использовались эвристики.

Законы управления сечением русел, определяющим найденные оптимальные потоки, определялись в серии вычислительных экспериментов методом последовательных приближений. Последним этапом метода было построение кривой «затраты-эффект» путем упорядочения русел по относительной величине изменения потока и итерационного удаления наименее эффективных виртуальных дамб с расчетом эффекта от действия оставшихся прямым гидродинамическим моделированием. Это позволило сократить число виртуальных дамб в субоптимальных решениях оптимизационной задачи в 3...5 раз (с 100...150 ед. до 20...40 ед.) при потерях эффективности в пределах 15%. Ограничения паводковой безопасности социохозяйственных территорий при моделировании очень больших паводков обеспечивались использованием отрицательных весовых коэффициентов соответствующих территориальных слагаемых целевой функции.

Для снижения вычислительной сложности использовалось адаптивное гидрологическое зонирование территории, то есть разделение ее на независимо затопляемые зоны с контролем погрешности — относительных объемов межзонного водного обмена. Это позволило параллельно рассчитывать варианты расположения дамб в удаленных друг от друга зонах.

Один из результатов оптимизации проекта для  $Q=21000 \text{ м}^3/\text{с}$  и  $t=10 \text{ сут.}$  приведен на рис. 5, 6. На рис. 5 темным тоном выделены русла с дамбами, ограничивающими их потоки, светлым — русла с возросшими вследствие этого потоками. На рис. 6 показано соответствующее приращение затопленной территории. Темным тоном выделено проектное приращение затопленной целевой территории проекта, составившей 131%, светлым — затопленная часть целевой территории до реализации проекта. Приращение общей площади затопленной территории составило 31%.

#### Заключение

Анализ результатов вычислительных экспериментов показал, что достижение устойчивого затопления территории на уровне пороговых параметров 1962–1982 гг. (зона П на рис. 3) при помощи представленного проекта невозможно. Для достижения этой цели необходимо удвоение паводкового расхода р. Ахтубы, составляющего в настоящее время при малых паводках  $< 1000 \text{ м}^3/\text{с}$ . Такие величины могут достигаться строительством дамбы в русле р. Волги или большого обводного канала из Волгоградского водохранилища в р. Ахтубу вокруг ВГЭС. В случае реализации этих проектов дамбы в малых руслах необходимы для обеспечения безопасности социохозяйственных территорий поймы. Исследование таких проектов является темой будущих работ.

Авторы благодарят РФФИ и Администрацию Волгоградской области за финансовую поддержку (проект № 18-41-342001).

*Воронин Александр Александрович — д-р физ.-мат. наук, проф., заведующий кафедрой,  
Дубинко Константин Евгеньевич — аспирант ФГАОУ ВО «Волгоградский государственный университет»,  
Исаева Инесса Игоревна — аналитик компании AdSnayper.  
E-mail: voronin.prof@gmail.com*

#### Список литературы

1. Землянов И.В., Горелиц О.В., Павловский А.Е. и др. Анализ экологических последствий эксплуатации Волгоградского водохранилища для сохранения биоразнообразия основных водно-болотных территорий Нижней Волги. Отчет о НИР ФГУ «ГОИН». М.: 2010. 675 с.
2. Воронин А.А., Васильченко А.А., Якушкина О.С. Когнитивный анализ и сценарно-имитационное моделирование развития эколого-экономической ситуации в северной части Волго-Ахтубинской поймы // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1: Математика. Физика. 2015. № 6. С. 17–30.
3. Fernandes, L.F.S., Marques, M.J., Oliveira, P.C., Moura, J.P.: Decision support systems in water resources in the demarcated region of Douro — case study in Pinhao river basin, Portugal. Water Environ. J. 33, 350–357 (2019)
4. Weng, S.Q., Huang, G.H., Li, Y.P.: An integrated scenario-based multi-criteria decision support system for water resources management and planning — a case study in the Haihe river basin. Expert Syst. Appl. 37, 8242–8254 (2010)
5. Lamy, F., Bolte, J., Santelmann, M., Smith, C.: Development and evaluation of multiple-objective decision-making methods for watershed management planning. J. Am. Water Resour. Assoc. 38, 517–529 (2002)
6. Dyakonova, T., Khoperskov, A., Khrapov, S.: Numerical model of shallow water: the use of NVIDIA CUDA graphics processors. Commun. Comput. Inf. Sci. 687, 132–145 (2016)
7. Khoperskov, A., Khrapov, S.: A numerical simulation of the shallow water flow on a complex topography. In: Numerical Simulations in Engineering and Science. pp. 237–254. SrinivasaRao, InTechOpen (2018)
8. Воронин А.А., Васильченко А.А., Храпов С.С., Агафонникова Е.О. Анализ эффективности природовосстановительных проектов в эколого-экономической системе «Волжская ГЭС-Волго-Ахтубинская пойма» // Управление большими системами: сборник трудов. 2014. № 52. С. 133–147.
9. Voronin A., Vasilchenko A., Khoperskov A.A. Project optimization for small watercourses restoration in the northern part of the Volga-Akhtuba floodplain by the geoinformation and hydrodynamic modeling // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 973, No. 012064. P.1–10.
10. Voronin A., Kharitonov M.: Model for optimizing the hierarchical structure of artificial canals in floodplain areas. In: International Russian Automation Conference (RusAutoCon), pp. 1–5. IEEE (2018).

#### Rockwell Automation стандартизирует процесс производства цемента

Отсутствие стандартизации в операциях по изготовлению цемента ограничивает производительность и затрудняет финансирование и техническое обслуживание. Для повышения производительности, согласованности действий операторов и эффективности операций обслуживания Rockwell Automation предлагает улучшенные технологические функции для цементных заводов. Новые функции включают заранее спроектированные и испытанные технологические инструкции и экраны заготовки, разработанные совместно с ведущими цементными компаниями. Эти функции позволят стандартизировать конфигурацию и оптимизировать операции на всех участках цементного производства.

Функции для изготовления цемента были добавлены в PCS PlantPAx от Rockwell Automation, что позволило интегрировать и

использовать их на всех этапах производства. Современная PCS использует обычную платформу автоматизации для упрощенной интеграции во все важнейшие участки производства цемента, включая управление технологическим процессом, электропитанием, информационными потоками и безопасностью.

Среди усовершенствованных и новых функций такие процессы, как управление двигателями и приводами, управление работой клапанов и элементы управления последовательностями. В систему также включены дополнительные функции, такие как усовершенствованные инструкции для библиотек, поддержка Windows Server 2016 и агент резервного копирования Asset Centre 9.0. Такое расширение возможностей вместе с дополнительной функциональностью способно улучшить управление производством в любой отрасли.

<http://www.rockwellautomation.com>