

## ПРИНЦИП ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СБАЛАНСИРОВАННОСТИ В РАЗВИТИИ ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА КРУПНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Н.Г. Вурдова

НИТУ МИСИС, Москва, Россия, e-mail: nadya\_vurdova@mail.ru

**Аннотация:** Устойчивое развитие становится важнейшим элементом стратегического планирования для промышленных предприятий, учитывая растущее внимание общества и государства к экологическим вопросам. В ответ на эти вызовы компании адаптируют производственные процессы в соответствии с принципами экологической устойчивости. Одним из перспективных подходов к снижению воздействия на окружающую среду является внедрение замкнутых и малоотходных систем водного хозяйства. Такие системы минимизируют объемы сточных вод, а также выбросы и сбросы загрязняющих веществ. Очистка сточных вод традиционно связана с высокими капитальными и эксплуатационными затратами, использование водооборотных систем позволяет их оптимизировать. В замкнутых циклах требования к очистке воды ниже, чем при сбросе в природные объекты, что уменьшает расходы на водоочистные мероприятия. Эти технологии создают основу для устойчивого развития, обеспечивая баланс между производственными задачами и сохранением природных ресурсов. Настоящее исследование нацелено на развитие малоотходных водооборотных технологий и включает два направления: разработку инновационных методов очистки сточных вод и совершенствование инвестиционного обоснования при проектировании водоочистных сооружений. Анализ инвестиционных процессов выполнен на примере модернизации канализационных очистных сооружений крупного предприятия. Обоснована экологическая и экономическая эффективность мероприятий.

**Ключевые слова:** устойчивое развитие предприятия, инвестиционный проект, замкнутые водооборотные системы, технико-экономическое обоснование, эколого-экономическая сбалансированность, экологические риски, канализационные очистные сооружения.

**Для цитирования:** Вурдова Н. Г. Принцип эколого-экономической сбалансированности в развитии водного хозяйства крупного предприятия // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 2. – С. 28–42. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2025\_2\_0\_28.

### Principle of environmental and economic balance in water management at a large company

N.G. Vurdova

NUST MISIS, Moscow, Russia, e-mail: nadya\_vurdova@mail.ru

**Abstract:** Sustainable development is becoming the most critical element of strategic planning in industry in view of the expanding concern shown by state and society towards environmental issues. To meet the challenges, industrial companies are adapting production to principles of

ecological sustainability. One of the promising approaches to environmental mitigation is implementation of closed and low-waste water systems in water management. Such systems help minimize volumes of effluents and pollutant emission. Waste water treatment customary involves high capital and operating inputs, and water circulation allows the investment optimization. Standards for water purity are lower in closed cycles than in waste water disposal in natural water bodies, which decreases expenses connected with water treatment. These technologies create a basis for the sustainable development, and ensure balance of production and nature conservation. This research aims to develop low-waste water circulation technologies and includes two key areas: maturing of innovative methods in waste water treatment and improvement of feasibility study in design of waste water treatment facilities. The investment analysis is performed as a case-study of modernization of sewage treatment facilities at a large company. The environmental and economic efficiency of the activity is confirmed.

**Key words:** sustainable development of company, investment project, closed water circulation systems, feasibility study, environmental and economic balance, ecological risks, sewage treatment facilities.

**For citation:** Vurdova N. G. Principle of environmental and economic balance in water management at a large company. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(2):28-42. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2025\_2\_0\_28.

---

## Введение

Основные производственные мощности горнодобывающих и металлургических предприятий относятся к I категории объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду. Согласно требованиями ст. 31.1 Федерального закона № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» такие предприятия должны разработать программу повышения экологической эффективности и получить комплексное экологическое разрешение».

Технологические процессы основного производства неразрывно связаны с использованием воды. Она играет важную роль в охлаждении, промывных операциях, приготовлении различных реагентов, в производстве теплоносителей. Водоемкость большинства процессов достигает 100 м<sup>3</sup>/т металла (крупнотоннажное производство) [1]. Современное горнодобывающее, и особенно металлургическое предприятие, требует особого подхода ко всему водному хозяйству в связи с новыми более жесткими требованиями к качеству используемой воды.

Требования, согласно приказу № 622 «Об утверждении нормативов качества воды...», к степени очистки образующихся на предприятии сточных вод, которые подлежат сбросу в водоемы рыбохозяйственного назначения, всегда были строгими (самые жесткие, по сравнению с ЕС). В этой связи стоят задачи по разработке и внедрению экономически доступных и экологически приемлемых технологий очистки сточных вод, утилизации отходов, повторного использования очищенной воды с организацией замкнутых водооборотных систем.

Анализ эффективности использования воды в совокупности с решением указанных задач становится неотъемлемым элементом стратегического планирования и управления, направленного на обеспечение устойчивого развития производственных процессов и соблюдение стандартов комплексного использования и охраны водных ресурсов, повышение экологической безопасности предприятий.

Учитывая изложенное, была выдвинута гипотеза, которая обуславливает

актуальность темы исследования. Внедрению водооборотных систем на промышленных предприятиях препятствуют нарастающая сложность и изменчивость промышленных процессов. Разнообразие специфических потребностей в водоподготовке в сочетании с ограничениями по стандартизации оборудования и процессов затрудняют разработку и внедрение замкнутых оборотных систем, которые были бы одновременно эффективными и экономичными. Кроме того, ограниченный доступ к техническому опыту и недостаточные инвестиции в исследования и разработку технологий и оборудования еще больше усугубляют эти проблемы.

Таким образом, цель исследования состоит в совершенствовании систем очистки воды на основе новых материалов и технологий для максимального повторного использования и разработки механизмов оптимизации инвестиций при проектировании и строительстве водоочистных сооружений.

Для достижения цели был выполнен ряд научно-технических задач, включающих: изучение текущего уровня эффективности использования воды на предприятиях отрасли с учетом развития производственных процессов; разработку концепции развития водохозяйственной системы, ориентированной на комплексное использование и защиту водных ресурсов; определение критериев для выбора оптимальных технических решений; анализ различных подходов к оценке капитальных и эксплуатационных затрат, связанных с модернизацией, реконструкцией или строительством объектов водного хозяйства промышленного предприятия; а также разработку методики инвестиционного обоснования на основе показателей эколого-экономической сбалансированности [2].

Накопленный в отрасли за последние два десятилетия опыт проектирования и

строительства водоочистных сооружений выявил фактически неудовлетворительное качество очистки производственных сточных вод, как для максимального возврата воды в производство, так и для сброса в водоемы рыбохозяйственного назначения. Анализ существующих водоочистных технологий, представленный в предыдущих публикациях, например [3, 4], указывает на необходимость совершенствования, в первую очередь, для достижения глубины очистки воды, методов доочистки, а именно: сорбционного метода и деминерализации. Это соответствует положениям информационных технологических справочников НДТ: «Горнодобывающая промышленность. Общие процессы и методы» (ИТС 16-2023) и «Очистка сточных вод при производстве продукции (товаров), выполнение работ и оказание услуг на крупных предприятиях» (ИТС 8-2022).

Экологическая безопасность любого промышленного предприятия требует решения эколого-экономических задач, которые неразрывно связаны с вопросами оценки экологических рисков (экологических рисков промышленного предприятия) [4]. Важно уделять внимание качественным индикаторам, методам оценки и управления рисками; решениям, позволяющим оказать поддержку при реализации природоохранных проектов. Параллельно необходимо решить научную проблему — совершенствование существующих и разработка новых методов управления экологических рисков промышленного предприятия, связанных с внедрением современных ресурсосберегающих и природоохранных технологий [5].

В настоящей статье приводятся результаты исследований по совершенствованию механизмов обоснования инвестиций при проектировании и строительстве водоочистных сооружений крупных предприятий.

## Этапы внедрения замкнутых водооборотных систем

Для решения научно-технической задачи создания экономически обоснованных замкнутых оборотных систем необходимо, чтобы затраты на очистку сточных вод до приемлемого на производстве качества были ниже суммы стоимости получения технической воды из свежей и затрат на очистку сточных вод для сброса в водоем. В этом суть принципа эколого-экономической сбалансированности (ПЭЭС).

Обоснованный подход к развитию замкнутых оборотных систем базируется на решении ряда экологических, экономических, инженерно- и научно-технических проблем, характеризующихся:

- усложнением и быстрым изменением современных промышленных процессов;
- необходимостью значительных капитальных вложений для массовой замены существующих водоочистных технологий на малоотходные согласно новым требованиям перехода на НДТ;
- необходимостью снижения экологических рисков за счет своевременного принятия обоснованных решений по реконструкции, модернизации или новому строительству водоочистных сооружений;
- нехваткой технического опыта, объема научных исследований, конструкторских разработок, оборудования и инвестиций;
- преодолением очевидной зависимости от импорта;
- недостаточностью обмена знаниями и лучшими мировыми отраслевыми практиками.

Вопрос организации замкнутой системы водопользования на промышленных предприятиях напрямую связан с разработкой технологий основного производства. Необходимо формировать интегрированную систему водного хо-

зяйства, включающую процессы водоснабжения, водоотведения, очистки сточных вод и их подготовки для повторного технического использования, исключая при этом сброс сточных вод в природные водоемы [6].

В то же время современные технологии и оборудование для очистки позволяют получать воду любой требуемой степени чистоты из любых сточных вод. Однако внедрение замкнутых водных систем сдерживается преимущественно экономическими факторами [7, 8].

Важнейшим показателем рационального использования водных ресурсов является возврат очищенных сточных вод в производство. Производительность блоков оборотной воды (БОВ) может достигать нескольких десятков тысяч кубических метров в час на современных предприятиях (особенно в составе производственных кластеров), т.е. сотни миллионов кубических метров воды в год (крупнотоннажное производство). Очевидно, что эффективное управление водными ресурсами становится важным фактором устойчивости предприятия и должно быть направлено на соблюдение принципов комплексного использования и охраны водных ресурсов [9–11].

Рекомендуется проводить анализ эффективности водопользования на предприятии по меньшей мере по восьми ключевым параметрам. При этом следует сравнивать достигнутые технологические показатели каждой используемой на объекте технологии с установленными нормативными требованиями и технологическими показателями наилучших доступных технологий (НДТ) в области охраны окружающей среды. Для оценки водозффективности рассчитывались соответствующие коэффициенты (табл. 1). В среднем значения коэффициентов следующие:  $P_{об} \approx 60\%$ , на некоторых промышленных предприятиях  $P_{об}$  доходит до  $90–96\%$ ;  $K_{и} \approx 0,27$ ; на некоторых про-

Таблица 1

**Коэффициенты водозффективности**  
**Water efficiency coefficients**

Коэффициенты	Уравнение
Коэффициент, показывающий процент использования воды в обороте	$P_{об} = Q_{об} / (Q_{ист} + Q_{об} + Q_c) \cdot 100\%, (1)$
Коэффициент рациональности использования воды источника	$K_{и} = (Q_{ист} + Q_c - Q_{сбр}) / (Q_{ист} + Q_c) \leq 1, (2)$
Процент потерь воды	$P_{пот} = (Q_{ист} + Q_c - Q_{сбр}) / (Q_{посл} + Q_{ист} + Q_{об} + Q_c) \cdot 100\%, (3)$
$Q_{ист}, Q_{об}$ — количество воды, забираемой из источника и используемой в обороте; $Q_c$ — количество воды, поступающей с сырьем; $Q_{сбр}$ — количество сбрасываемой воды; $Q_{посл}$ — количество воды, используемой последовательно.	

мышленных предприятиях  $K_{и} = 0,75 - 0,87$ ; хорошим показателем по водопотерям считается  $P_{пот} = 2,5\%$ .

Любой проект реконструкции, модернизации или нового строительства начинается с обоснования инвестиций. Предложено ввести пять критериев оценки технологий и оборудования: научный, технический, экологический, социальный и экономический.

Ведущая роль отводится научному критерию. Проведение НИОКР и опытно-промышленных испытаний позволяет разработать корректное техническое задание на проект. Это в конечном итоге при начальных затратах в 2—3% позволит сэкономить до 30% при его реализации.

Технический критерий — на основе научно обоснованных данных производится корректный подбор оборудования и выполняются технологические расчеты. При этом важно учитывать, что для реализации на объектах I категории негативного воздействия на окружающую среду технологии должны относиться к областям применения НДТ и отвечать их критериям, либо быть внедрены как минимум на двух предприятиях.

Экологический критерий состоит в организации многократного использования воды в технологических процессах.

При этом учитывается необходимость утилизации образующихся отходов при водоподготовке и очистке стоков.

Социальный критерий отражает имидж предприятия, степень сотрудничества с администрацией города, района. Экономический — опирается на выполнение всех перечисленных пунктов, что позволяет адекватно оценить экономическую составляющую с возможностью поэтапной реализации всего проекта.

В работе [12] изучалась взаимосвязь только части аспектов (экологического и социального). Однако только учет всех указанных критериев способствует энерго- и ресурсосбережению, снижению экологических платежей и вероятности наступления экологически рискованной ситуации и одновременно позволяет воспользоваться механизмами, связанными с финансированием зеленых проектов и инициатив в сфере устойчивого развития [13, 14].

Такая постановка задач осуществляется впервые. Именно с этих позиций обосновывается необходимость дальнейшей разработки научного подхода к повышению экологической устойчивости промышленных предприятий на новой концептуальной основе — принципах эколого-экономической сбалансированности [15].

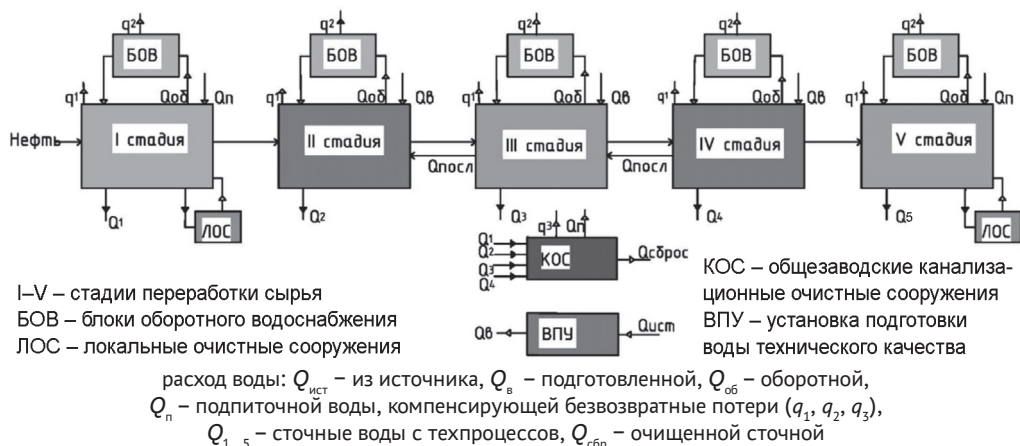


Рис. 1. Схема водного хозяйства предприятия  
 Fig. 1. Scheme of the enterprise's water management

### Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведена схема предприятия, реализующего несколько стадий переработки сырья, а его водный баланс представлен в табл. 2.

Рассчитанные значения коэффициентов показывают, что несмотря на наличие блоков обратного водоснабжения и доли воды в обороте  $P_{об} = 83\%$ , эффективность ее использования достаточно низкая  $K_{и} = 0,33$ . Это свидетельствует о большом объеме водоотведения на общезаводские КОС и далее – в реку ввиду отсутствия необходимой степени очист-

ки воды для производственных нужд. При этом количество свежей воды из реки остается достаточно большим. Поэтому на данном предприятии необходимо проводить мероприятия по увеличению водосбережения в соответствии с НДТ.

Анализ работы ряда канализационных очистных сооружений показал, что соблюдение нормативов на сбросы в водоемы первой категории водопользования практически никогда не достигается. Это связано как с недостаточной эффективностью основных блоков очистных сооружений, так и, в большей

Таблица 2

Водный баланс крупного предприятия, тыс. м<sup>3</sup>/сут  
 Water balance of a large enterprise, thousand m<sup>3</sup>/day

Параметры	Значение	$q_1$	$q_2$	$q_3$	$Q_{п}$	$Q_{об}$	$Q_{посл}$	$Q_{лос}$
$Q_1$	18,0	3,0	0,4	0,5	21,9	–	–	1,0
$Q_2$	10,0	1,0	0,2	0,1	–	11,3	–	–
$Q_3$	11,9	3,0	0,4	0,5	–	9,7	6,1	–
$Q_4$	0,7	0,5	0,1	0,1	–	1,1	0,3	–
$Q_5$	0	0,1	0,1	0,1	–	0,3	–	8,0
$Q_{сброс}$		34,2						
$Q_{ист}$		50,7						
$Q_{об}$		240						

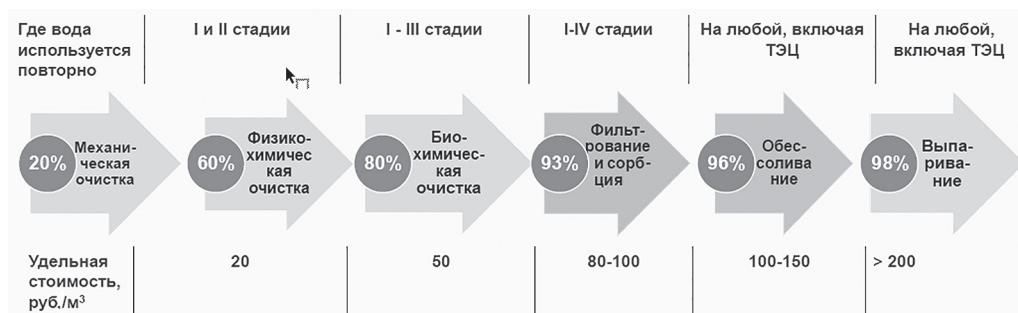


Рис. 2. Полный цикл очистки сточных вод для организации замкнутых оборотных систем  
 Fig. 2. Full cycle of wastewater treatment for organization of closed circulating systems

степени, с недостаточной работой систем доочистки (рис. 2). Первые два метода обеспечивают минимальный возврат воды, тогда как каждый последующий позволяет увеличить его долю [16 – 18]. Для современных водоэффективных систем уровень возврата, %, составляет соответственно: 20→60→80→93→96→98 (рис. 2). Максимизация возврата очищенных сточных вод возможна за счет применения дополнительных методов очистки, соответствующих НДТ, включая сорбцию и электродиализ.

Установлено, что немногие компании внедрили или планируют внедрение замкнутых оборотных систем (рис. 2), основанных на технологиях ZLD (технология с получением твердых солей и высокоочищенной воды), хотя они являются перспективным направлением модернизации.

Учитывая высокую стоимость жизненного цикла таких систем, для принятия инвестиционных решений необходимо разработать: несколько вариантов технико-экономического обоснования; маркетинговое исследование; выбор поставщиков. Также следует оценить последствия реализации или отказа от проекта с технической, экономической и экологической точек зрения. Для этого разработаны рекомендации по применению указанного подхода к оценке инвестпроектов.

Проведен анализ различных методов оценки инвестиционных проектов, направленных на внедрение мало- и бессточных (замкнутых) систем водного хозяйства на крупных промышленных предприятиях [19, 20]. Очистка сточных вод на таких объектах представляет собой процесс с высокими затратами. Однако степень очистки воды, возвращаемой в оборот, может быть ниже по сравнению с требованиями к сбросу в водоемы. Таким образом, проектирование и строительство водооборотных систем позволяет достичь не только экономического эффекта, но и значительного экологического результата, способствуя защите окружающей среды и обеспечивая общехозяйственные выгоды.

Жизненный цикл любого строительного проекта состоит из ряда последовательных этапов, каждый из которых играет важную роль в его успешной реализации. Начальной стадией является предынвестиционный этап, также известный как PreFEED или ТЭО (технико-экономическое обоснование), который имеет ключевое значение для потенциальных инвесторов, заказчиков и кредиторов. Именно на этом этапе принимается стратегическое решение о начале реализации проекта.

Некоторые российские компании-инвесторы предъявляют повышенные требования к объему и качеству докумен-

тации, разрабатываемой на этапе ТЭО, делая ее сопоставимой с проектной документацией, принятой в отечественной практике. Ключевыми особенностями такого подхода являются высокая точность оценки бюджета проекта на уровне 80 – 90%, что позволяет оперативно переходить к заказу основного оборудования, а также более глубокий анализ рисков, мероприятий по охране окружающей среды, предотвращению чрезвычайных ситуаций и соблюдению требований промышленной безопасности.

Современные подходы к риск-менеджменту, такие как «Идентификация опасностей» HAZID, метод анализа воздействий и рисков на окружающую и социальную среду ENVID, проект по охране труда, технике безопасности и окружающей среде PHSER, стандарт по опасности и работоспособности HAZOP, а также стандарты ISO 31000 и ISO 14000, находят все большее применение в проектной практике. В российском контексте оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС) является обязательной частью проектной документации для всех строительных объектов.

Однако на этапе ТЭО в отечественной практике зачастую не проводится полноценная оценка экологических рисков. Включение таких оценок позволяет идентифицировать потенциальные угрозы, определить вероятность их возникновения и разработать меры по минимизации последствий, но этот подход еще не получил широкого распространения.

Эколого-экономические риски промышленного предприятия (ЭЭРПП) представляют собой вероятность экономических потерь, вызванных ухудшением состояния окружающей среды из-за хозяйственной деятельности предприятия. Управление такими рисками базируется на принципах экологического менеджмента (СЭМ) — система экологического ме-

неджмента в соответствии с ISO 14000 и методологиях риск-менеджмента. Однако на практике многие предприятия применяют эти подходы лишь частично. Основные причины этого связаны с несколькими факторами, а именно:

- Недостаточной экологической осведомленностью (сотрудники часто плохо информированы об экологической политике, что снижает вовлеченность и осознание важности экологических аспектов).

- Игнорированием экологических рисков — экологические вопросы часто воспринимаются второстепенными по сравнению с экономическими, особенно в добывающих отраслях (нефть, газ, полезные ископаемые), что усугубляется удаленностью и закрытостью объектов.

- Отсутствием унифицированного механизма оценки эколого-экономических рисков промышленного предприятия (разнообразие методик затрудняет интеграцию экологических рисков в управление).

- Недостаточным учетом отказа от реализации проектов (инвестиционное обоснование экологически значимых проектов часто игнорирует риски, связанные с их несостоявшейся реализацией, что приводит к долгосрочным убыткам).

Для преодоления этих ограничений необходимо внедрение более эффективных систем экологического управления, повышение уровня экологической культуры на всех уровнях предприятия и разработка унифицированных методик оценки эколого-экономических рисков промышленного предприятия. Также важно учитывать последствия бездействия при принятии решений об инвестициях, что позволит более полно интегрировать экологические аспекты в стратегическое планирование.

Сложившаяся ситуация может быть решена за счет внедрения упрощенных процедур принятия решений на всех



уровнях менеджмента, что продемонстрировано в работе на примере реконструкции канализационных очистных сооружений крупного завода. Целью исследования была подготовка материалов для стадии ТЭО проекта реконструкции. Для этого были выполнены следующие задачи: анализ текущего состояния водохозяйственной системы предприятия; разработка оптимальных решений и схем блоков очистки воды (БОВ); проработка технических мероприятий для повышения эффективности водооборота, сокращения сбросов сточных вод и уменьшения забора сырой воды за счет подпитки системы очищенными сточными водами.

Проведено технико-экономическое сравнение вариантов решения с использованием трех методик. На основе методики AACE International Recommended Practice № 56R-08 (5-й класс оценки),

определены ключевые технико-технологические показатели проекта. Целевые результаты были скорректированы и разделены на три этапа с возможностью их последовательной реализации (табл. 3). Это позволило установить управление процессом балансирования между допустимым уровнем потерь и потенциальной выгодой от внедрения экологически рискованных решений [21].

Применительно к системе водного хозяйства промышленных предприятий можно руководствоваться другой методикой, согласно ГОСТ Р 58785-2019. Однако для управленческого планирования и анализа производственных возможностей предприятия чаще используется 3-я методика определения технико-экономических показателей деятельности, которая является основой для разработки производственно-финансового плана, а также установления нормативов на

Таблица 3

**Мероприятия по модернизации канализационных очистных сооружений**  
**The modernization of WWTP and the achieved results**

Этап	Мероприятия	Результаты	Инвестиции, млн руб.	Срок окупаемости, лет
I этап	Реконструкция существующих очистных сооружений (восстановление бетона, замена сетей, частичное обновление оборудования)	Улучшение качества очистки по ряду показателей (нефтепродукты, взвешенные вещества, сульфиды и др.). Возможность возврата части очищенных стоков в оборотное водоснабжение. Снижение штрафов от городского Водоканала за превышение допустимых норм	399,0	16
II этап	Строительство новых блоков биологической очистки	Возможность возврата очищенных стоков в оборотное водоснабжение и использование их как технической воды для предприятий. Прекращение сброса стоков на городские очистные сооружения. Избыток стоков направляется в реку	1995,0	11
III этап	Строительство новых блоков доочистки	Полный возврат очищенных стоков в оборотное водоснабжение. Прекращение забора речной воды для технических нужд. Обеспечение всех потребностей в технической воде предприятий-абонентов и ТЭЦ	2859,5	3

будущие периоды в рамках планирования на предприятии. Результаты расчетов позволили определить инвестиционные издержки и сроки окупаемости (табл. 3). Одновременно установлена величина экономического эффекта, для рассматриваемого предприятия, она составит до 0,5 млрд руб.

Далее была проведена эколого-экономическая оценка внедрения блоков доочистки на третьем этапе строительства. Модернизация канализационных очистных сооружений с организацией замкнутых водооборотных систем обеспечивает экологическую эффективность в размере 874 620,16 тыс. руб. в год за счет предотвращенного экологического ущерба, расчет которого выполнен согласно «Временной методике» Госкомэкологии. Экономия по плате за негативное воздействие на окружающую среду, рассчитанная по «Правилам...» (Постановление правительства № 8815), составит 849,11 тыс. руб. в год.

Подобные проекты демонстрируют важность комплексного подхода, который учитывает потребности экономики, экологические ограничения и долгосрочную устойчивость.

Оценка потенциальной экологической опасности крупных производственных аварий является одной из ключевых задач для обеспечения промышленной безопасности. Одним из перспективных подходов в этой области является моделирование сценариев развития аварий, что позволяет прогнозировать их последствия и разрабатывать меры по их предотвращению. Однако на сегодняшний день методы построения таких сценариев остаются недостаточно проработанными [22].

Рекомендуемые надзорными органами методики акцентируют внимание на авариях, связанных с основными производственными процессами предприятий, однако вспомогательные объекты, такие как сооружения водоподготовки и водо-

очистки (объекты общезаводского хозяйства ОЗХ), зачастую остаются без внимания. Принято считать, что само наличие таких сооружений снижает экологическую нагрузку. Однако в действительности это не всегда так, особенно при аварийных ситуациях, где они могут стать источником значительных экологических рисков. Отсутствие единой методики для определения показателей экологического риска и недостаточная разработка методов количественной оценки ограничивают возможности их практического применения.

Наиболее часто для оценки рисков применяются статистические подходы: феноменологический, детерминистский и вероятностный методы. Каждый из них имеет свои преимущества и ограничения. Феноменологический метод ориентирован на описание известных процессов, детерминистский позволяет учитывать причинно-следственные связи, а вероятностный фокусируется на учете неопределенностей и вероятностей реализации различных сценариев [23, 24]. Однако их использование для оценки рисков объектов водоподготовки и водоочистки требует адаптации с учетом специфики данных сооружений.

Собственный подход был предложен академиком С.Г. Харченко и его коллегами [25, 26], которые разработали методологию количественной оценки экологической безопасности с использованием концепции риска. Согласно их модели, риск определяется через три основных аспекта: вероятность возникновения неблагоприятной ситуации, величина ущерба от ее реализации и уровень неопределенности в оценке этих показателей. Такой подход позволяет получить более полное представление о характере рисков, связанных с функционированием промышленных объектов.

В настоящем исследовании экологические риски предприятия оценивались

по первым двум критериям. Анализ проводился в три последовательных этапа:

1. Идентификация и систематизация рисков, характерных для данного производства.

2. Качественная и количественная оценка рисков, включающая определение вероятности их возникновения и размеров возможного ущерба.

3. Выбор и применение методов управления рисками, направленных на минимизацию их последствий.

Для оценки вероятностей проявления негативных факторов в условиях ограниченности исходной информации применялся метод экспертных оценок. Такой подход позволяет учитывать опыт специалистов и адаптировать оценки под специфику исследуемого предприятия.

Для повышения эффективности оценки экологических рисков объектов ОЗХ целесообразно: разрабатывать унифицированные методики, учитывающие специфические риски водоочистных и водоподготовительных сооружений; активно применять современные информационные технологии, такие как системы

моделирования и анализа сценариев аварий с использованием больших данных; усилить взаимодействие между промышленными предприятиями, надзорными органами и научными учреждениями для совместной разработки более точных методов оценки; повышать экологическую осведомленность персонала, включая обучение основам управления рисками; расширять использование цифровых двойников очистных сооружений для прогнозирования последствий различных сценариев и оптимизации мер реагирования.

Указанные меры позволят снизить неопределенности в оценке рисков и укрепить систему экологической безопасности промышленных объектов, особенно в аварийных ситуациях.

Была проведена статистическая обработка данных предприятия за 2012 – 2022 гг. Графическое исполнение показано на рис. 3. В условиях неполноты информации оценка вероятностей проявления негативных факторов выполнена методом экспертных оценок. Анализ графического представления рисков



- 1 – авария насосного оборудования; 2 – низкая эффективность очистки сточных вод;
- 3 – непредвиденные изменения в составе сточных вод;
- 4 – нарушение технологического процесса очистки сточных вод;
- 5 – несоблюдение норм эксплуатации оборудования; 6 – прорыв трубопроводов;
- 7 – нарушение работы автоматической системы управления; % – вероятность события

Рис. 3. Пример оценки эколого-экономических рисков

Fig. 3. Example of environmental and economic risk assessment

ситуации (рис. 3) показывает, что самое быстрое устранение возможно для событий, находящихся в левом нижнем углу диаграммы. Размер кругов показывает объем инвестиций. Приведенная методика анализа является наиболее простой и удобной при регулярном мониторинге эколого-экономических рисков на предприятии.

В работе выполнены расчеты по прогнозированию экологического ущерба на основе статистических данных об авариях и инцидентах на предприятии за рассматриваемый период. Установлена величина оптимального запаса средств на ликвидацию последствий предполагаемого экологического ущерба от аварийных ситуаций по цеху очистных сооружений.

### **Выводы**

Для эффективного управления развитием водного хозяйства промышленного предприятия в условиях ограниченных финансовых ресурсов ключевую роль играет этап предынвестиционной подготовки, основанный на принципах эколого-экономической сбалансированности. Данный подход включает последовательное управление потерями, направленное на повышение эффективности работы оборудования, и оптимизацию затрат. Это позволяет не только минимизировать экологические риски, но и создать положительный экономический эффект для всей экосистемы, в рамках которой функционирует предприятие. Особое значение придается формированию интегрированной социально-эколого-экономической системы, способной обеспечить устойчивое и экологически безопасное хозяйствование. Такая система предполагает достижение баланса между производственной деятельностью предприятия и природными циклами, где рост материального производства соответствует ассимиляционным воз-

можностям окружающей среды. Это способствует созданию условий для долгосрочного устойчивого развития, минимизируя конфликт между экономическими интересами предприятия и экологическими ограничениями.

Получены следующие основные научные и практические результаты и выводы:

- Высокая водоемкость основного производства, наличие крупнотоннажных блоков оборотного водоснабжения требуют управления водохозяйственной системой предприятия, как важнейшего фактора его экологической устойчивости. Разработана концепция ее совершенствования, позволяющая организовать замкнутые водооборотные системы, опирающаяся на принцип эколого-экономической сбалансированности.

- Установлены пять критериев оценки технологий и оборудования, применяемых для очистки сточных вод в крупнотоннажных системах: научный, технический, экологический, социальный и экономический. Ведущая роль отводится научному критерию.

- На основании научного анализа современного состояния эффективности использования воды на предприятиях отрасли по восьми параметрам с определением достигаемых технологических показателей показано отсутствие на практике использования подходов к комплексному использованию и охране водных ресурсов. Установлено, что подпитка блоков оборотного водоснабжения осуществляется свежей водой из поверхностных водоисточников. Из анализа работы нескольких предприятий получены достаточно высокие коэффициенты оборота воды:  $P_{об} = 79 - 83\%$ , однако эффективность ее использования остается крайне низкой ( $K_{и} = 0,14 - 0,33$ ), что свидетельствует о большом объеме сброса сточных вод в виду недостаточной степени их очистки.

- Разработана методика выбора оптимальных решений на ранних стадиях подготовки к модернизации, реконструкции или строительству водоочистных сооружений, базирующаяся на системе оценок экологических рисков, капитальных и эксплуатационных затрат и позволяющая выбрать проект с приемлемой эффективностью, основанной на эколого-экономический сбалансированности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксенов В. И. Создание замкнутых систем водоснабжения металлургических предприятий // Сталь. — 2005. — № 9. — С. 83–89.
2. Каменик Л. Л. Эколого-экономическая сбалансированность — стратегия управления инновационным развитием общества XXI века // Вопросы инновационной экономики. — 2018. — Т. 8. — № 1. — С. 25–38. DOI: 10.18334/vinес.8.1.38866.
3. Vurdova N. G. Environmental and economic balance in the refurbishment of the sewage treatment plant / Proceedings of the 7th International Conference on Construction, Architecture and Technology Safety. ICCATS 2023. Springer, Cham, 2024. DOI: 10.1007/978-3-031-47810-9\_43.
4. Вурдова Н. Г., Юрьев Ю. Ю. Инвестиционный проект создания замкнутых водооборотных циклов на промышленном предприятии // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. — 2022. — Т. 12. — № 4. — С. 529–538. DOI: 10.21285/2227-2917-2022-4-529-538.
5. Malyukova L. S., Martyushev N. V., Tynchenko V. V., Kondratiev V. V., Bukhtoyarov V. V., Konyukhov V. Y., Bashmur K. A., Panfilova T. A., Brigida V. Circular mining wastes management for sustainable production of *Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze // Sustainability. 2023, vol. 15, no. 15, article 11671. DOI: 10.3390/su151511671.
6. Вурдова Н. Г., Фесенко Л. Н. Повышение эффективности систем оборота воды нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий (часть 1) // Водоснабжение и санитарная техника. — 2023. — № 6. — С. 12–22. DOI: 10.35776/VST.2023.06.02.
7. Колесников В. А., Меньшутина Н. В. Анализ, проектирование технологий и оборудования для очистки сточных вод. — М.: ДеЛи принт, 2018. — 266 с.
8. Рябчиков Б. П. Современные методы подготовки воды для промышленного и бытового использования. — М.: ДеЛи принт, 2004. — 304 с.
9. Paul R., Kenway S. Mukheibir P. How scale and technology influence the energy intensity of water recycling systems. An analytical review // Journal of Cleaner Production. 2019, vol. 215, pp. 1457–1480. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.12.148.
10. Lorenzo-Toja Y., Vázquez-Rowe I., Marín-Navarro D., Crujeiras R. M., Moreira M. T., Feijoo G. Dynamic environmental efficiency assessment for wastewater treatment plants // The International Journal of Life Cycle Assessment. 2017, vol. 23, no. 2, pp. 357–367. DOI: 10.1007/s11367-017-1316-9.
11. Данилов-Данильян В. И. Водные ресурсы России: состояние, использование, охрана, проблемы управления // Экономика. Налоги. Право. — 2019. — № 12(5). — С. 18–31. DOI: 10.26794/1999-849X.2019-12-5-18-31.
12. Munoz J. L., Guzman R. R., Botin J. A. Development of a methodology that integrates environmental and social attributes in the ore resource evaluation and mining planning // International Journal of Mining and Mineral Engineering. 2014, vol. 5, no. 1, pp. 38–58. DOI: 10.1504/IJMM.2014.058918.
13. Durán-Sánchez A., Álvarez-García J., González-Vázquez E., Del Río-Rama M. C. Wastewater management: Bibliometric analysis of scientific literature. Water. 2020, vol. 12, no. 11, article 2963. DOI: 10.3390/w12112963.
14. Липина С. А., Агапова Е. В., Липина А. В. Развитие зеленой экономики в России: возможности и перспективы. — М.: Ленанд, 2018. — 328 с.
15. Мочалова Л. А. Циркулярная экономика в контексте реализации концепции устойчивого развития // Journal of New Economy. — 2020. — Т. 21. — С. 5–27. DOI: 10.29141/2658-5081-2020-21-4-1.
16. Воронов Ю. В., Яковлев С. В. Водоотведение и очистка сточных вод. — М.: АСВ, 2006. — 704 с.
17. Salgot M., Folch M. Wastewater treatment and water reuse // Current Opinion in Environmental Science & Health. 2018, vol. 2, pp. 64–74. DOI: 10.1016/j.coesh.2018.03.005.

18. Балаев И. С., Кеменов Ю. В., Мурзин А. В., Спиридонов Н. Е., Балаева Л. И. Опыт внедрения технологии динамического осветления Диклар при очистке природных и сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника. — 2015. — № 6. — С. 13–23.
19. Cokins G. Activity based cost management: An executive guide. New York: John Wiley & Sons. 2001. 253 p.
20. Venkataraman R. R., Pinto J. K. Cost and value management in projects. 2023. 304 p. DOI: 10.1002/97811394207190.
21. Вурдова Н. Г., Лищук А. Н. Влияние эколого-экономических рисков на эффективность инвестиционно-строительного проекта реконструкции очистных сооружений НПЗ // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. — 2023. — № 3(312). — С. 23–31. DOI: 10.33285/2411-7013-2023-3(312)-23-31.
22. Алексеева Е. А. Управление экологическими рисками (Оценка воздействия на окружающую среду) // Экология производства. — 2021. — № 10. — С. 74–100.
23. Nakak S., Khan W. Z., Gilcar G. A., Haider N., Imran M., Alkateiri M. S. Industrial wastewater management using blockchain technology: Architecture, requirements and future directions // IEEE Internet of Things Magazine. 2020, vol. 3, pp. 38–43.
24. Хорошавин А. В., Холодов А. С. Подходы к оценке устойчивого развития организаций. Разработка и апробация эколого-экономических показателей устойчивого развития для нефтегазовых предприятий // Экономика природопользования. — 2018. — № 6. — С. 24–41.
25. Кучер Д. Е., Харченко С. Г. Как оценивать экологическую безопасность? // Экология и промышленность России. — 2021. — Т. 25. — № 9. — С. 56–61. DOI: 10.18412/1816-0395-2021-9-56-61.
26. Кучер Д. Е., Харченко С. Г. К оценке экологической безопасности // Большая Евразия: развитие, безопасность, сотрудничество. — 2022. — № 5-1. — С. 186–188. **ИВАБ**

## REFERENCES

- Aksenov V. I. Creation of closed water supply systems for metallurgical enterprises. *Stal'*. 2005, no. 9, pp. 83–89. [In Russ].
- Kamenik L. L. Ecological and economic balance – a strategy for managing innovative development of the society of the XXI century. *Russian journal of innovation economics*. 2018, vol. 8, no. 1, pp. 25–38. [In Russ]. DOI: 10.18334/vinec.8.1.38866.
- Vurdova N. G. Environmental and economic balance in the refurbishment of the sewage treatment plant. *Proceedings of the 7th International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety*. ICCATS 2023. Springer, Cham, 2024. DOI: 10.1007/978-3-031-47810-9\_43.
- Vurdova N. G., Yuriev Yu. Yu. Investment project for implementing a closed water circulation system at an industrial company. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost*. 2022, vol. 12, no. 4, pp. 529–538. [In Russ]. DOI: 10.21285/2227-2917-2022-4-529-538.
- Malyukova L. S., Martyushev N. V., Tynchenko V. V., Kondratiev V. V., Bukhtoyarov V. V., Konyukhov V. Y., Bashmur K. A., Panfilova T. A., Brigida V. Circular mining wastes management for sustainable production of *Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze. *Sustainability*. 2023, vol. 15, no. 15, article 11671. DOI: 10.3390/su151511671.
- Vurdova N. G., Fesenko L. N. Increasing the efficiency of water circulation systems of oil refining and petrochemical enterprises (part 1). *Water Supply and Sanitary Technique*. 2023, no. 6, pp. 12–22. [In Russ]. DOI: 10.35776/VST.2023.06.02.
- Kolesnikov V. A., Men'shutina N. V. *Analiz, proektirovanie tekhnologiy i oborudovaniya dlya ochistki stochnykh vod* [Analysis, design of technologies and equipment for wastewater treatment], Moscow, DeLi print, 2018, 266 p.
- Ryabchikov B. P. *Sovremennyye metody podgotovki vody dlya promyshlennogo i bytovogo ispol'zovaniya* [Modern methods of water treatment for industrial and domestic use], Moscow, DeLi print, 2004, 304 p.
- Paul R., Kenway S., Mukheibir P. How scale and technology influence the energy intensity of water recycling systems. An analytical review. *Journal of Cleaner Production*. 2019, vol. 215, pp. 1457–1480. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.12.148.
- Lorenzo-Toja Y., Vázquez-Rowe I., Marín-Navarro D., Crujeiras R. M., Moreira M. T., Feijoo G. Dynamic environmental efficiency assessment for wastewater treatment plants. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2017, vol. 23, no. 2, pp. 357–367. DOI: 10.1007/s11367-017-1316-9.

11. Danilov-Danilyan V. I. Water resources of Russia: state, use, protection, management problems. *Economics. Taxes. Pravo*. 2019, no. 12(5), pp. 18–31. [In Russ]. DOI: 10.26794/1999-849X 2019-12-5-18-31.

12. Munoz J. L., Guzman R. R., Botin J. A. Development of a methodology that integrates environmental and social attributes in the ore resource evaluation and mining planning. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*. 2014, vol. 5, no. 1, pp. 38–58. DOI: 10.1504/IJMME.2014.058918.

13. Durán-Sánchez A., Álvarez-García J., González-Vázquez E., Del Río-Rama M. C. Wastewater management: Bibliometric analysis of scientific literature. *Water*. 2020, vol. 12, no. 11, article 2963. DOI: 10.3390/w12112963.

14. Lipina S. A., Agapova E. V., Lipina A. V. *Razvitie zelenoy ekonomiki v Rossii: vozmozhnosti i perspektivy* [Development of green economy in Russia: Opportunities and prospects], Moscow, Lenand, 2018, 328 p.

15. Mochalova L. A. Circular economy in the context of the realization of the concept of sustainable development. *Journal of New Economy*. 2020, vol. 21, no. 41, pp. 5–27. [In Russ]. DOI: 10.29141/2658-5081-2020-21-4-1.

16. Voronov Yu. V., Yakovlev S. V. *Vodootvedenie i ochistka stochnykh vod* [Water drainage and waste water treatment], Moscow, ASV, 2006, 704 p.

17. Salgot M., Folch M. Wastewater treatment and water reuse. *Current Opinion in Environmental Science & Health*. 2018, vol. 2, pp. 64–74. DOI: 10.1016/j.coesh.2018.03.005.

18. Balaev I. S., Kemenov Yu. V., Murzin A. V., Spiridonov N. E., Balaeva L. I. Experience in implementing the technology of dynamic clarification Diclar in the treatment of natural and waste water. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2015, no. 6, pp. 13–23. [In Russ].

19. Cokins G. *Activity based cost management: An executive guide*. New York: John Wiley & Sons. 2001. 253 p.

20. Venkataraman R. R., Pinto J. K. *Cost and value management in projects*. 2023. 304 p. DOI: 10.1002/9781394207190.

21. Vurdova N. G., Lishchuk A. N. The impact of environmental-economic risks on the effectiveness of the investment construction project for the reconstruction of wastewater treatment facilities of oil refineries. *Environmental protection in oil and gas complex*. 2023, no. 3(312), pp. 23–31. [In Russ]. DOI: 10.33285/2411-7013-2023-3(312)-23-31.

22. Alekseeva E. A. Environmental risk management (environmental impact assessment). *Ekologiya proizvodstva*. 2021, no. 10, pp. 74–100. [In Russ].

23. Hakak S., Khan W. Z., Gilcar G. A., Haider N., Imran M., Alkateiri M. S. Industrial wastewater management using blockchain technology: Architecture, requirements and future directions. *IEEE Internet of Things Magazine*. 2020, vol. 3, pp. 38–43.

24. Khoroshavin A. V., Kholodov A. S. Approaches to the assessment of sustainable development of organizations. Development and approbation of environmental and economic indicators of sustainable development for oil and gas enterprises. *Nature management economics*. 2018, no. 6, pp. 24–41. [In Russ].

25. Kucher D. E., Kharchenko S. G. How to assess environmental safety? *Ecology and Industry of Russia*. 2021, vol. 25, no. 9, pp. 56–61. [In Russ]. DOI: 10.18412/1816-0395-2021-9-56-61.

26. Kucher D. E., Kharchenko S. G. To assess environmental security. *Bol'shaya Evraziya: razvitie, bezopasnost', sotrudnichestvo*. 2022, no. 5-1, pp. 186–188. [In Russ].

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Вурдова Надежда Георгиевна — канд. техн. наук, доцент, НИТУ МИСИС,  
e-mail: nadya\_vurdova@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-9572-7733.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

N.G. Vurdova, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,  
NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia,  
e-mail: nadya\_vurdova@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-9572-7733.

Получена редакцией 16.10.2024; получена после рецензии 25.11.2024; принята к печати 10.01.2025.  
Received by the editors 16.10.2024; received after the review 25.11.2024; accepted for printing 10.01.2025.