Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы

1997 жылдан бастап шығады

ВЕСТНИК Торайгыров университета

Энергетическая серия

Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№3 (2026)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО
о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания
№ 14310-Ж
выдано
Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность
публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

---

https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/2710-3420

Бас редакторы – главный редактор
Талипов О. М.
доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора — Калтаев А.Г., *доктор PhD*
Ответственный секретарь — Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	*д.т.н., профессор*
Никифоров А. С.,	*д.т.н., профессор*
Новожилов А. Н.,	*д.т.н., профессор*
Алиферов А. И.,	*д.т.н., профессор (Российская Федерация)*
Кошеков К. Т.,	*д.т.н., профессор*
Приходько Е. В.,	*к.т.н., профессор*
Кислов А. П.,	*к.т.н., доцент*
Нефтисов А. В.,	*доктор PhD*
Шерьязов С. К.	т.ғ.д., *профессор (Российская Федерация)*
Искакова З. С.	*технический редактор*

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели
Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов
При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

МРНТИ 70.94.19

https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/198-213

В. В. Воронков[1], *И. М. Раделюк[2]

[1,2]Торайгыров университет,
Республика Казахстан, г. Павлодар.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0001-4645-2884
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6067-3034
*e-mail: radelyuk.i@tou.edu.kz

РАЗРАБОТКА ГИБРИДИЗИРОВАННОЙ МОДЕЛИ ОПТИМИЗАЦИИ ВОДНОГО СЛЕДА НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

В данном исследовании представлены результаты разработки гибридной математической модели оптимизации, объединяющей принципы водной интеграции и качественно-количественной оценки водного следа для промышленных предприятий. Модель реализована в среде алгебраического программирования GAMS с использованием MILP подхода и применена к нефтеперерабатывающему заводу в Казахстане. Результаты моделирования показали существенное повышение эффективности водопользования. В частности, потребление свежей воды было снижено с 161,5 до 102,8 м³/ч (на 36,35 %), а объем образующихся сточных вод с 204,4 до 65,9 м³/ч (на 67,76 %). При этом общий водный след сократился с 365,9 до 25,2 USD/ч, что соответствует снижению на 93,11 %. Значительное уменьшение достигнуто как по количественному компоненту (–63,02 %), так и по качественному (–98,21 %), что обусловлено оптимизацией потоков и снижением концентраций загрязняющих веществ за счет формирования замкнутых контуров водооборота. Полученные результаты подтверждают, что интеграция методов водной интеграции и водного следа позволяет не только минимизировать водопотребление, но и учитывать экономические аспекты загрязнения. Предложенный гибридный подход может быть использован в качестве эффективного инструмента для повышения ресурсной эффективности и снижения экологической нагрузки на промышленных предприятиях.

Ключевые слова: водный след, повторное использование, водная интеграция, оптимизация водопотребления, гибридные модели.

Введение

Вода является одним из наиболее важных природных ресурсов, играющих ключевую роль в различной деятельности человека [1]. Промышленное производство выступает основным двигателем экономического роста, что сопровождается значительным потреблением водных ресурсов [2]. На мировом уровне доля забора пресной воды промышленными предприятиями составляет чуть менее 20 % [3]. Данный аспект усугубляется глобальным изменением климата и климатическими аномалиями, создающие дополнительную нагрузку на водные ресурсы [4]. По прогнозам Fujimori и др. (2016), представленным на основе анализа статистических данных 42 стран по 10 отраслям, к 2050 году глобальный промышленный водозабор составит от 461 до 1560 км³/год, а к 2100 году – от 196 до 1463 км³/год [5]. Также следует отметить, что в результате промышленной деятельности образуется огромное количество сточных вод, которые могут быть сильно загрязнены или содержать токсичные вещества [6]. Эта проблема не ограничивается развивающимися странами, поскольку даже развитые страны испытывают постоянную нехватку воды, усугубляемую загрязнением от промышленной деятельности. Особый вклад в ухудшения качества вод вносят такие отрасли, как нефтепереработка, текстильное производство, молочная промышленность, фармацевтика, лакокрасочная промышленность, кожевенная промышленность и целлюлозно-бумажная промышленность, являясь одними из крупнейших потребителей водных ресурсов, что приводит к значительным объемам сточных вод, содержащих различные загрязняющие вещества [7]. Вдобавок ко всему, отчет UN World Water Development (2024) показывает, что доля повторного использования водных ресурсов в конце производства по отношению к глобальному уровню составляет всего 19 % [8]. Из этого следует, что повышение эффективности использования промышленных водных ресурсов поспособствует не только экономии общего объёма водных ресурсов, но и снижению вреда, наносимого выбросами загрязняющих веществ окружающей среде [9].

В направлении оптимизации водопотребления было проведено немало исследований [10]. Большое внимание при этом уделялось моделям на основе анализа водных потоков в контексте производственной деятельности. Особую роль в этом послужили разработки, направленные на создание оптимальных конфигураций схем водопользования, что, впоследствии, послужило толчком для развития концепции водной интеграции (WI). WI представляет собой мощный инструмент, главными достоинствами которого выступают – сокращение потребления свежей воды и образования сточных вод, что достигается за счет повторного использования

отработанных потоков [11]. Тем не менее, большинство работ, связанных с оптимизацией схем водопотребления, упускали важность оценки качественно-количественных показателей водных потоков и системы в целом. Сточные воды, образующиеся в результате промышленной деятельности, оказывают значительное воздействие на водные экосистемы. Инструмент водного следа (WF) служит важным показателем для оценки влияния на качество водных ресурсов. Адаптация для промышленного водопользования в исследовании Jia и др. (2020) позволяет дать оценку как объемам обращаемых водных потоков, так и образующемуся загрязнению [12]. Помимо этого, данный подход позволяет учитывать вклад каждого из загрязнителей при выборе оптимальных водных сетей, что особенно важно в схеме с несколькими загрязнителями. Позже, опубликованное исследование Radelyuk и др. (2025) позволило совместить обе концепции по оптимизации и оценке водного следа, используя стратегию минимальных водных сетей (MWN) при помощи системы математического моделирования (GAMS) [13]. Подход MWN концептуально учитывает изменения процесса с целью выбора наиболее эффективных схем минимизации водопользования и позволяет не только повторно использовать воду, но и включает методику по сокращению потребления свежей воды. Разработка моделей математического программирования позволяет синтезировать комплекс водных потоков в рамках MILP-MINLP подхода [14].

Целью данной работы выступает разработка гибридной модели оптимизации, в которой объединены подходы WI и QQWF при помощи программного кода в среде GAMS с учетом многокомпонентных систем. В качестве объекта для анализа эффективности предлагаемой модели выступил казахстанский нефтеперерабатывающий завод. Проведенное исследование, в контексте оптимизации управления водными ресурсами, имеет решающее значение по содействию эффективного использования промышленных вод и обеспечения водной безопасности [15].

Материалы и методы

Все последующие формулы и обозначения, используемые для описания математических выражений, были реализованы при помощи средств математического программирования в среде GAMS Studio (релиз 45.7.0).

Исходными данными для составления математической модели послужили теоретические и практические результаты исследований Radelyuk и др. (2025), Jia и др. (2020), а также положения, изложенные в руководстве Hashim и др. [16]

Методология данного исследования включала в себя составление математического программного кода и реализована в две стадии:

построение гибридной модели водной интеграции и оценки качественно-количественного водного следа.

В первую очередь, профиль водных сетей промышленных предприятий задавался за счет составления материального баланса установок потребителей [17]. В уравнении 1 представлен расчет количества потребляемой установкой воды, выраженного в м3/ч:

$$D_j = Fw_j + \sum_i F_{i,j} + \sum_r Fro_{r,j} \quad (1)$$

где Fw_j – объемный расход потребляемой свежей воды установкой, м^3/ч;
$F_{i,j}$– объемный расход потребляемой циркулирующей воды, м^3/ч;
$Fro_{r,j}$– объемный расход потребляемой регенерированной воды, м^3/ч.

В свою очередь уравнение 2 для определения количества уходящей с установки воды в м^3/ч примет вид:

$$S_i = W_i + \sum_j F_{j,i} + \sum_r Fr_{i,r} \quad (2)$$

где W_i – объемный расход сбрасываемых сточных вод с установки, м^3/ч;
$F_{j,i}$ – объемный расход выходящей циркулирующей воды, м^3/ч;
$Fr_{i,r}$ – объемный расход воды, уходящей на регенерацию, м^3/ч.

Аналогично производилось составление материального баланса для установки регенерации сточных вод (в м^3/ч) и может быть определено через равенство 3:

$$\sum_i Fr_{i,r} = \sum_j Fro_{r,j} \quad (3)$$

Следующим шагом послужил учет количества обращаемых загрязнителей k и установление ограничений по их содержанию в потребляемой воде при помощи неравенства 4:

$$\sum_i F_{i,j} \cdot Cs_{i,k} + Fw_j \cdot Cw_k + \sum_r Fro_{r,j} \cdot Cro_{r,k} \leq D_j \cdot Cd_{j,k} \quad (4)$$

где $Cs_{i,k}$ – концентрация загрязнителей в потоке циркулирующей воды, г/м^3;
Cw_k – концентрация загрязнителей в потоке свежей воды, г/м^3;
$Cro_{r,k}$ – концентрация загрязнителей в потоке регенерированной воды, г/м^3;

$Cd_{j,k}$ – предельно допустимые концентрации загрязнителей в потребляемой воде установкой, г/м^3.

Для установления допустимых связей между источниками и потребителями использована бинарная матрица $Bin_{i,j}$, принимающая значение 1 при наличии допускаемого потока и 0 при его отсутствии. Это ограничение можно отобразить через выражения 5 и 6:

$$B_{i,j} \leq Bin_{i,j} \tag{5}$$

$$F_{i,j} \leq B_{i,j} \cdot F_{max} \tag{6}$$

где $B_{i,j}$ – бинарная переменная, принимающая значение 0 или 1;
F_{max} – максимальная нагрузка сети по воде, м^3/ч.

Переменную функции минимизации использования свежей воды выразили при помощи параметра F_{min}, который определяется из уравнения 7:

$$F_{min} = \sum_j Fw_j \tag{7}$$

Концепция водного следа (WF) подразумевает установление качественных характеристик (качественный водный след), таких как содержание загрязнителей *k* (мг/л или г/м^3) в потоке, так и количественных показателей (количественный водный след), которые выражают объемные расходы потоков (м^3/ч), образующихся или обращающихся в схеме. В качестве единицы измерения стоимостей использован USD/ч.

В основе расчета целевой функции – качественно-количественного водного следа (QQWF) выступили уравнения 8-10 в исследовании Jia и др., (2020). Уравнение 8 выражает качественный водный след, характеризующий затраты (в USD/ч) на очистку образующихся сточных вод до требуемого уровня:

$$WFql = \sum_i \left(Fdc_i \cdot Cs_{i,k} \cdot TC_k\right) - \sum_i (Fw_i \cdot Cw_k \cdot TC_k) \tag{8}$$

где $Cs_{i,k}$ – концентрация загрязнителей в потоке сточных вод, г/м^3;
Cw_k – концентрация загрязнителей в потоке свежей воды, г/м^3;
TC_k – затраты на удаление загрязнителей, USD/г.

В то же время, количественный водный след отражает затраты (USD/ч) на безвозвратное использование свежей воды и сброс сточных вод, что описывается уравнением 9:

$$WFqt = ECfs \cdot \sum_j Fw_j + ECre \cdot (\sum_i F_{i,j} - \sum_j F_{j,i}) - ECfs \cdot \sum_i W_i + \\ + WFdc \cdot \sum_i W_i \ , \quad (9)$$

где $ECfs$ – стоимость обращения свежей воды, USD/м^3;
$ECre$ – стоимость обращения циркулирующей воды, USD/м^3;
$WFdc$ – стоимость обращения сточных вод, USD/м^3.

Таким образом, объединив уравнения качественного и количественного водного следа, итоговое значение водного следа (в USD/ч) в уравнении 10 приняло следующий вид:

$$QQWF = WFqt + WFql \quad (10)$$

Следует отметить, что в настоящем исследовании приводится расчет QQWF, который определяется итоговой суммой количественных и качественных показателей в целом, а не отдельных установок. С целью разрешения этой проблемы было предложено использовать дополнительные уравнения 11–14, которые позволили продемонстрировать вклад каждой установки как по обоим показателям, выраженным в USD/ч по потокам:

– свежей воды:

$$CFw_j = Fw_j \cdot ECfs + \sum_k Fw_j \cdot Cw_k \cdot TC_k \quad (11)$$

– циркулирующей воды между установками-потребителями:

$$CF_j = \sum_i F_{i,j} \cdot ECre + \sum_{i,k} F_{i,j} \cdot \ Cs_{i,k} \cdot TC_k \quad (12)$$

$$CF_i = \sum_j F_{i,j} \cdot ECre + \sum_{j,k} F_{i,j} \cdot \ Cs_{i,k} \cdot TC_k \quad (13)$$

– сбрасываемых сточных вод:

$$CW_i = W_i \cdot ECfs \quad (14)$$

Результаты и обсуждение

Предприятия нефтеперерабатывающей отрасли являются одними из крупнейших потребителей водных ресурсов и источниками образования значительных объёмов сточных вод, содержащих широкий спектр органических и неорганических соединений и их производных [18]. Согласно отчету Washington State Department of Ecology (2002) в первую очередь это связано с работой установок ЭЛОУ, систем охлаждения воды и отделения кислых стоков. В технологических процессах нефтепереработки компоненты-загрязнители, чаще всего, представлены в виде кислот, щелочей, твердых частиц (SS), соединений аммиака (NH_4+) и серы (S^2-), а также смесью органических соединений (ТРН) широкого фракционного состава. Основными источниками таких загрязнений выступают процессы электрообессоливания, ректификации, промывки продуктов, высвобождающие значительное количество минерализованных, кислых стоков, содержащих нефтепродукты [19].

Главным литературным источником для написания данной работы послужило исследование Radelyuk и др. (2025), посвященное оптимизации и оценке водопользования на нефтеперерабатывающем предприятии в Казахстане. Ключевыми загрязнителями в данном исследовании выступили ТРН, S^2- и NH_4+, что было принято аналогично в настоящей работе. Опираясь на данные по балансу водных потоков, была выстроена материально-поточная схема (рисунок 1) водной сети, которая послужила базовым сценарием для реализации и сравнительного анализа модели оптимизации. В таблице 1 представлены данные материальному балансу установок, а также по содержанию загрязнителей в потоках на выходе с них. Для оценки водного следа была использована информация по стоимости использования водных потоков (свежей воды, сбрасываемой воды) и удаления загрязнителей, которая показана в таблице 2 [13].

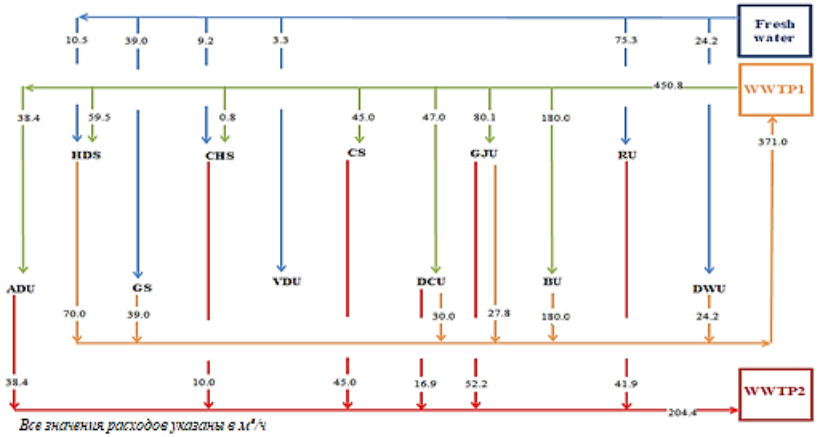


Рисунок 1 – Схема водопользования нефтеперерабатывающего завода в базовом сценарии

Таблица 1 – Характеристика потоков нефтеперерабатывающего завода

Установки и сокращения на схеме	Приход, $м^3/ч$	Расход, $м^3/ч$	Загрязнители ($г/м^3$)		
			ТРН	NH_4^+	S^{2-}
Атмосферная перегонка (ADU)	38,4	38,4	1000	4500	5000
Гидроочистка (HDS)	70,0	70,0	300	4278	4870
Компрессия газов (GC)	39,0	39,0	800	4500	5000
Утилизация тепла дымовых газов 1 (CHS)	10,0	10,0	200	30	20
Вакуумная перегонка (VDU)	3,3	-	-	-	-
Утилизация тепла дымовых газов 2 (CS)	45,0	45,0	188	30	20
Замедленное коксование (DCU)	47,0	46,9	200	30	20
Сжижение газов (GJU)	80,1	80,0	65	30	20
Производство битумов (BU)	180,0	180,0	3000	30	20
Рециркуляция воды (RU)	75,3	41,9	25	30	20
Подготовка питьевой воды (DWU)	24,2	24,2	5	30	20
Итого	612,3	575,4			

Таблица 2 – Данные по стоимости обращения свежей воды, сброса сточных вод и удаления загрязнителей

Наименование обращаемого потока	Стоимость, USD/м^3	Наименование загрязнителей	Стоимость, USD/г
Свежая вода	0,05	Общее содержание углеводородов (TPH)	3,90
Циркулирующая вода	0,27	Соединения аммиака (NH_4^+)	0,50
Сточная вода	0,27	Сульфиды (S^{2-})	0,015

Посредством реализации гибридной математической модели в среде GAMS была произведена оптимизация водных потоков и на основании полученных данных выстроена новая материально-поточная схема (рисунок 2). Сравнение результатов сценариев до и после оптимизации позволило отметить существенное снижение образования сточных вод с 204,4 до 65,9 м^3/ч, а также сокращение потребления свежей воды со 161,5 до 102,8 м^3/ч. При этом стоит выделить, что нагрузка на установку водоочистки WWTP1 уменьшилась с 371,0 до 319,79 м^3/ч за счет формирования новых контуров циркуляции между потребителями. Основными источниками образования сточных вод, согласно модели, выступили установки RU и DWU, что объясняется низким предельным содержанием загрязнителей в выходных потоках с этих установок. Кроме того, на установки RU, DWU и VDU приходился набольший расход свежей воды. Потребление воды ниже 102,8 м^3/ч не может быть достигнуто, поскольку это бы потребовало использования дополнительных мощностей по регенерации стоков. По этой же причине невозможно снижение объемов сбрасываемых сточных вод ниже 65,9 м^3/ч.

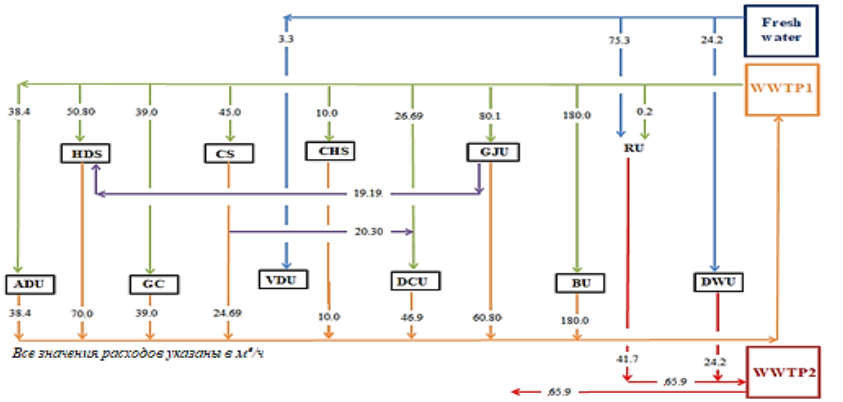


Рисунок 2 – Схема водопользования нефтеперерабатывающего завода после оптимизации

Наряду с этим была произведена оценка QQFW, которая показала, что наибольшие экономические затраты, в данном случае, были связаны с количественными показателями. Причиной этому выступили значительные расходы на транспортирование водных потоков, составляющих по некоторым расчетам 19,6 USD/ч. Вклад качественных показателей, характеризующих содержание загрязнителей в сточных водах, сбрасываемых с установки водосброса WWTP2, оценивается в 5,6 USD/ч. Совокупный водный след оптимизированной системы составляет 25,2 USD/ч. Данный эффект наблюдается при использовании свежей воды с нулевым содержанием загрязнителей в сочетании с концепцией MWN. Помимо этого, на основании уравнений 11-15, были получены данные, позволившие выразить затраты на использование воды в поточной схеме водной сети модели оптимизации (рисунок 3).

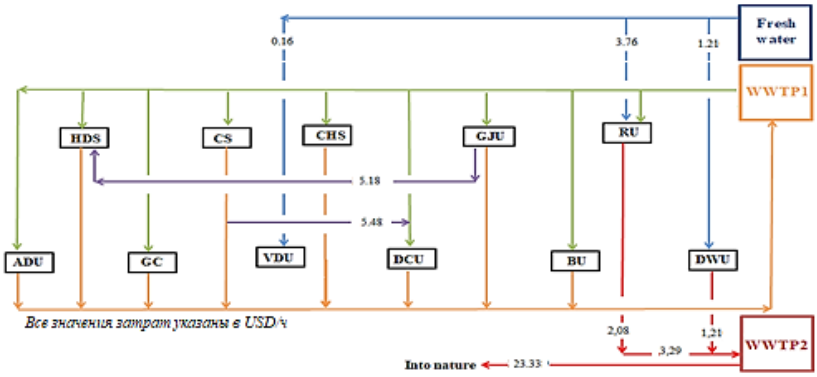


Рисунок 3 – Схема распределения затрат для оптимизированной схемы нефтеперерабатывающего завода в Казахстане

Сравнительный анализ исходных данных базового сценария и результатов математического моделирования сведен в таблицу 3.

Таблица 3 – Сравнительный анализ показателей сценариев до и после оптимизации

Индикатор	Базовый сценарий	После оптимизации	Эффект от реализации
Расход свежей воды, м^3/ч	161,5	102,8	-36,35 %
Количество сточных вод, м^3/ч	204,4	65,9	-67,76 %
Качественный водный след, USD/ч	312,9	5,6	-98,21 %
Количественный водный след, USD/ч	53,0	19,6	-63,02 %
Общий водный след, USD/ч	365,9	25,2	-93,11 %

Выводы

В ходе проведенного исследования была продемонстрирована эффективность гибридной оптимизационной модели, которая объединяет подходы водного интегрирования и количественно-качественную оценку водного следа в среде GAMS. Применение модели в отношении нефтеперерабатывающего завода показало ее широкую применимость и высокую эффективность. В результате проведенных мероприятий наблюдается существенное сокращение потребления пресной воды на 36,35 %. Также отмечено значительное уменьшение объемов образующихся

сточных вод на 67,76 %. Общий водный след был снижен на 93,11 % по сравнению с базовым сценарием.

Оптимизация водного следа позволила установить наиболее эффективные схемы водопользования в контексте материально-поточных и финансовых показателей промышленных предприятий. С точки зрения воздействия на окружающую среду, качественно-количественная оценка позволила определить не только объемы сбрасываемых сточных вод, но и количество загрязнителей, содержащихся в них на выходе. В этой связи, представленная модель устраняет пробел традиционных методов оптимизации, которые фокусировались только на количественных показателях, игнорируя качественный состав сточных вод и его стоимость. Стоит отметить, что из открытых источников были приняты средние значения стоимостей обращаемых потоков и удаления загрязнителей. Кроме того, расчет производился в условиях полной годовой производственной мощности с целью использования имеющихся данных по среднегодовым значениям концентраций загрязняющих веществ.

Исходя из вышеописанного, предложенный гибридный метод выступает как эффективное средство для перехода промышленных предприятий к модели устойчивого и рационального водопользования, который позволяет добиться значительной экономии водных ресурсов и сокращения негативного воздействия на окружающую среду.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Radelyuk, I., Tussupova, K., Zhapargazinova, K., Yelubay, M., & Persson, K. M.** Pitfalls of wastewater treatment in oil refinery enterprises in Kazakhstan // A system approach. Sustainability. – 11(6). – 2019. – 1618 p. – https://doi.org/10.3390/su11061618

2 **Weerasooriya, R., Liyanage, L., Rathnappriya, R., Bandara, W., Perera, T., & Gunarathna, M.** Industrial water conservation by water footprint and sustainable development goals : A review // Environment, Development and Sustainability. – 23. – 2021. – P. 12661–12709. – https://doi.org/10.1007/s10668-020-01184-0

3 **Lautze, J., Stander, E., Drechsel, P., da Silva, A. K., & Keraita, B.** Global experiences in water reuse // International Water Management Institute (IWMI). – 2014. [Electronic resource] – https://cgspace.cgiar.org/server/api/core/bitstreams/9a91e6db-dda5-41f5-83b9-877fd4b7522b/content

4 **Masui, T., Hanaoka, T., Hikita, S., & Kainuma, M.** Assessment of CO_2 reductions and economic impacts considering energy-saving investments //

International Association for Energy Economics. – 2014. – P. 175–190. [Electronic resource]. – http://www.jstor.org/stable/23297062

5 **Fujimori, S., Hanasaki, N., Masui, T.** Projections of industrial water withdrawal under shared socioeconomic pathways and climate mitigation scenarios // Sustainability Science. – 12. – 2017. – P. 275–292. – https://doi.org/10.1007/s11625-016-0392-2

6 **Kato, S., Kansha, Y.** Comprehensive review of industrial wastewater treatment techniques // Environ Sci Pollut Res. – 31. – 2024. – P. 51064–51097. – https://doi.org/10.1007/s11356-024-34584-0

7 **Zhang, L., & Chen, X.** Global perspectives on industrial wastewater management : A bibliometric analysis of research output // Hazardous Materials Advances. – 4. – 2024. – 100567 p. – https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2024.100567

8 United Nations. The United Nations World Water Development Report 2024: Water for Prosperity and Peace // UNESCO. – 2024. – https://doi.org/10.54679/WZDQ6209

9 **Liu, C., & Zhang, Y.** A review of industrial water resources efficiency // Frontiers in Science and Engineering. – 4(9). – 2024. – P. 103–108. – https://doi.org/10.54691/yhsanz18

10 **Agana, B. A., Reeve, D., & Orbell, J. D.** An approach to industrial water conservation – A case study involving two large manufacturing companies based in Australia // Journal of Environmental Management. – 114. – 2013. – P. 445–460. – https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.10.047

11 **Dakwala, M., Mohanty, B., & Bhargava, R.** A process integration approach to industrial water conservation: A case study for an Indian starch industry // Journal of Cleaner Production. – 17(18). – 2009. – P. 1654–1662. – https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.08.007

12 **Jia, X., Varbanov, P. S., Wan Alwi, S. R., Yang, D., & Klemeš, J. J.** Cost-based quantitative-qualitative water footprint considering multiple contaminants // Resources, Conservation and Recycling. – 168. – 2021. – 105339 p. – https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105339

13 **Radelyuk, I., Jia, X., Tan, R. R., Yelubay, M., & Baimatova, N.** Assessing the impact of water integration on water resource management in Central Asia: A case study of Kazakhstani industry // ACS ES&T Water. – 2025. – https://doi.org/10.1021/acsestwater.4c00718

14 **Lee, S. J., Wan Alwi, S. R., Lim, J. S., & Manan, Z. A.** Minimum water network design for fixed schedule and cyclic operation batch processes with minimum storage capacity and inter-connections // Journal of Cleaner Production. – 77. – 2014. – P. 65–78. –https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.061

15 **Yue, Z., Alun, G., & Bolin, P.** Relationship between industrial water consumption and economic growth in china based on environmental Kuznets Curve // Water. – 9(8). – 2017. – P. 556. – https://doi.org/10.3390/w9080556

16 **Hashim, H.** Formulation of mathematical modelling for the design of maximum water recovery. Universiti Teknologi Malaysia, Johor Bahru, Malaysia.

17 **Handani, Z. B., Sharifah, R. Wan Alwi, Hashim H., Manan Z. A.** Holistic approach for design of minimum water networks using the mixed integer linear programming (MILP) technique // Chemical Engineering Transactions. – 63. – 2010. – P. 73–78. – https://doi.org/10.3303/CET1863013

18 **Al-Khalid, T., & El-Naas, M. H.** Organic contaminants in refinery wastewater: Characterization and novel approaches for biotreatment / In M. H. El-Naas (Ed.) // Advanced biological processes for wastewater treatment. IntechOpen. – 2018. – https://doi.org/10.5772/intechopen.72206

19 United States Environmental Protection Agency. Petroleum refining effluent guidelines and standards (EPA-821-R-19-005). – 2019. [Electronic resource] – https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-10/documents/petro-refining-elg-study-2019.pdf

Поступило в редакцию 10.07.26.
Поступило с исправлениями 30.07.26.
Принято в печать 03.09.26.

В. В. Воронков[1], **И. М. Раделюк*[2]
[1,2]Торайғыров университеті,
Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
10.07.26 ж. баспаға түсті.
30.07.26 ж. түзетулерімен түсті.
03.09.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ӨНЕРКӘСІПТІК КӘСІПОРЫНДАРДА СУ ІЗІН ОҢТАЙЛАНДЫРУҒА АРНАЛҒАН ГИБРИДТІК МОДЕЛІН ӘЗІРЛЕУ

Осы зерттеуде өнеркәсіптік кәсіпорындарда қолдануға арналған су интеграциясы және сандық-сапалық су ізі тәсілдерін біріктіретін гибридті математикалық оңтайландыру моделін әзірлеу нәтижелері ұсынылған. Модель GAMS алгебралық бағдарламалау ортасында MILP әдістерін қолдану арқылы жүзеге асырылып, Қазақстандағы мұнай өңдеу зауытына қолданылды . Есептеу нәтижелері су

ресурстарын пайдаланудың тиімділігінің айтарлықтай артқанын көрсетті. Атап айтқанда, тұщы су тұтыну көлемі 161,5-тен 102,8 м³/сағ-қа дейін (36,35 %-ға) азайды, ал ағынды сулар көлемі 204,4-тен 65,9 м³/сағ-қа дейін (67,76 %-ға) қысқарды. Сонымен қатар, жалпы су ізі 365,9-дан 25,2 USD/сағ-қа дейін төмендеп, 93,11 %-ға азайды. Бұл нәтиже су ағындарын оңтайлы қайта бөлу және жабық су айналымдарын қалыптастыру арқылы ластаушы заттардың концентрациясын төмендету есебінен сандық (–63,02 %) және сапалық (–98,21 %) көрсеткіштердің қысқаруымен қамтамасыз етілді. Алынған нәтижелер су интеграциясы мен су ізі тәсілдерін біріктіру су тұтынуды азайтумен қатар, ластанудың экономикалық әсерін ескеруге мүмкіндік беретінін көрсетеді. Ұсынылған гибридті әдіс өнеркәсіптік жүйелерде ресурстарды тиімді пайдалану мен қоршаған ортаға түсетін жүктемені азайтудың тиімді құралы бола алады.

Кілтті сөздер: су ізі, су интеграциясы, қайта пайдалану, су тұтынуды оңтайландыру, гибридті модельдер.

*V. V. Voronkov[1], *I. M. Radelyuk[2]*
[1,2]Toraighyrov University,
Republic of Kazakhstan, Pavlodar.
Received 10.07.26.
Received in revised form 30.07.26.
Accepted for publication 03.09.26.

DEVELOPMENT OF A HYBRID MODEL FOR WATER FOOTPRINT OPTIMIZATION IN INDUSTRIAL FACILITIES

This study presents the development of a hybrid mathematical optimization model that integrates the principles of water integration and quantitative–qualitative water footprint assessment for industrial applications. The model was implemented in the GAMS algebraic modeling environment using a MILP approach and applied to an oil refinery in Kazakhstan. The simulation results demonstrate a significant improvement in water use efficiency. In particular, freshwater consumption was reduced from 161.5 to 102.8 m³/h (36.35 %), while wastewater generation decreased from 204.4 to 65.9 m³/h (67.76 %). At the same time, the total water footprint decreased from 365.9 to 25.2 USD/h, corresponding to a 93.11 %

reduction. This improvement was achieved through reductions in both the quantitative (–63.02 %) and qualitative (–98.21 %) components, driven by optimized flow distribution and reduced contaminant concentrations via the formation of closed-loop water reuse systems. The obtained results confirm that integrating water integration and water footprint approaches enables not only the minimization of water consumption but also the incorporation of economic impacts of pollution. The proposed hybrid approach can serve as an effective tool for improving resource efficiency and reducing environmental impacts in industrial systems.

Keywords: water footprint, water reuse, water integration, water optimization, hybrid models.

Теруге 07.09.2026 ж. жіберілді. Басуға 30.09.2026 ж. қол қойылды.
Электронды баспа
19,0 Mb RAM
Шартты баспа табағы 34,4. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.
Компьютерде беттеген: Шукитова А. Б.
Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас
Тапсырыс № 4601

Сдано в набор 07.09.2026 г. Подписано в печать 30.09.2026 г.
Электронное издание
19,0 Mb RAM
Усл. печ. л. 34,4. Тираж 300 экз. Цена договорная.
Компьютерная верстка: Шукитова А. Б.
Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас
Заказ № 4601

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған
Торайғыров университеті
140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы
Торайғыров университеті
140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.
67-36-69
E-mail: kereku@tou.edu.kz
www.vestnik-energy.tou.edu.kz