

УДК 65.011.4

5.2.2. Математические, статистические и инструментальные методы в экономике (физико-математические науки, экономические науки)

### **ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ОБОРОТНОЙ ВОДЫ**

Дмитриева Оксана Сергеевна

Канд. техн. наук, доцент

SPIN – код автора: 3240-7270

Scopus ID: 56132516000

email: [ja\\_deva@mail.ru](mailto:ja_deva@mail.ru)

*Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия*

Маясова Анна Олеговна

аспирант

SPIN – код автора: 5226-0982

Scopus ID: 57223158788

email: [mayasova-fwoq@yandex.ru](mailto:mayasova-fwoq@yandex.ru)

*Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) Казанского национального исследовательского технологического университета, Нижнекамск, Россия*

Селиванова Алсу Ангамовна

магистр

*Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) Казанского национального исследовательского технологического университета, Нижнекамск, Россия*

В настоящее время существуют проблемы, связанные с дефицитом воды и изменением климата, что предполагает внедрение энергоэффективных технологий, а также улучшения управления водными ресурсами, особенно это касается систем водного хозяйства промышленности – градирен. Гибридные градирни являются возможным решением указанной проблемы, в них используется сочетание сухого и испарительного методов теплопередачи, что снижает потребление воды, а также реагентов для ее обработки. Они играют решающую роль в смягчении последствий изменения климата за счет снижения выбросов парниковых газов, связанных с процессом охлаждения. Однако часто внедрению новых технологий препятствуют экономические ограничения. Целью работы является проведение технико-экономического анализа применения гибридной системы охлаждения оборотной воды в результате внедрения дополнительного теплообменного аппарата в действующую установку, в результате которого происходит оснащение вентиляторной градирни БМГ-100 несколькими режимами эксплуатации. Согласно

UDC 65.011.4

5.2.2. Mathematical, statistical and instrumental methods of economics (physical and mathematical sciences, economic sciences)

### **TECHNICAL AND ECONOMIC ANALYSIS OF THE APPLICATION OF A HYBRID CIRCULATING WATER COOLING SYSTEM**

Dmitrieva Oksana Sergeevna

Cand.Tech.Sci.

RSCI SPIN-code: 3240-7270

Scopus ID: 56132516000

email: [ja\\_deva@mail.ru](mailto:ja_deva@mail.ru)

*Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia*

Mayasova Anna Olegovna

graduate student

RSCI SPIN-code: 5226-0982

Scopus ID: 57223158788

email: [mayasova-fwoq@yandex.ru](mailto:mayasova-fwoq@yandex.ru)

*Nizhnekamsk Institute of Chemical Technology (branch) of the Kazan National Research Technological University, Nizhnekamsk, Russia*

Selivanova Alsu Angamovna

master

*Nizhnekamsk Institute of Chemical Technology (branch) of the Kazan National Research Technological University, Nizhnekamsk, Russia*

Currently, there are problems related to water scarcity and climate change, which implies the introduction of energy-efficient technologies, as well as improved water management, especially for industrial water management systems – cooling towers. Hybrid cooling towers solve this problem. They use a combination of dry and evaporative heat transfer methods, which reduces the consumption of water, as well as reagents for its treatment. They play a crucial role in mitigating the effects of climate change by reducing greenhouse gas emissions associated with the cooling process. However, economic constraints often hinder the introduction of new technologies. The purpose of the work is to conduct a technical and economic analysis of the use of a hybrid circulating water cooling system because of introducing an additional heat exchanger into an existing installation, because of which the BMG-100 fan cooling tower is equipped with several operating modes. According to the technology being developed, a heat exchanger is installed above the sprinkler of the cooling tower. Using the new technology will reduce the cost of chemical reagents required to treat circulating water, will reduce the amount of make-up water. According to the results of

разрабатываемой технологии над оросителем градирни устанавливается теплообменный аппарат. Применение новой технологии позволит снизить расходы химических реагентов, требуемых для обработки водооборотной воды, позволит снизить количество подпиточной воды. По результатам экономической оценки рентабельности внедрения предложенной гибридной технологии, взамен существующей имеем, что период возврата капиталовложений составляет 4,05 года; годовой экономический эффект составляет 146,2 тыс. руб. Таким образом, внедрение теплообменного аппарата приведет к изменению термодинамической эффективности, гидравлической нагрузки и охлаждающей площади при реконструкции градирен, что требует доказательства эффективности разработанного проекта

Ключевые слова: ГРАДИРНЯ, ТЕПЛООБМЕННИК, ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ, ЗАТРАТЫ, КАПИТАЛЬНЫЕ ВЛОЖЕНИЯ, ВНЕДРЕНИЕ

the economic assessment of the profitability of implementing the proposed hybrid technology, instead of the existing one, we have that the period of return on investment is 4.05 years; the annual economic effect is 146.2 thousand rubles. Thus, introducing a heat exchanger will lead to a change in thermodynamic efficiency, hydraulic load and cooling area during the reconstruction of cooling towers, which requires proof of the effectiveness of the developed project

Keywords: COOLING TOWER, HEAT EXCHANGER, ECONOMIC EFFECT, COSTS, CAPITAL INVESTMENTS, IMPLEMENTATION

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-204-006>

**Введение.** Вода является жизненно важным ресурсом, глобальное потепление и изменение климата ужесточили проблему нехватки воды до критического предела. По данным имеющимся в AQUASTAT, 34 страны испытывают водный дефицит в соотношении примерно от 25% до 75%. В сложившейся ситуации экономия воды в промышленности особенно актуальна, так как является одной из самых водоемких отраслей народного хозяйства. Градирни широко используются в системах оборотного водоснабжения благодаря своей способности обеспечивать низкотемпературную передачу тепла и высокую эффективность. Для снижения потребления воды в процессе охлаждения этого сектора предлагаются гибридные системы охлаждения. Очевидно, что использование гибридных технологий для целей оборотного водоснабжения достигло значительного развития, послужило появлению инновационных подходов, где были интегрированы различные конфигурации оросителей и теплообменных аппаратов. Последние

<http://ej.kubagro.ru/2024/10/pdf/06.pdf>

достижения в этой области, а также представленные технико-экономические расчеты [1] демонстрируют гибридную технологию как эффективный подход к энергосбережению. Несмотря на доступные методы сокращения промышленного использования воды, их внедрению часто препятствуют экономические ограничения.

**Цель исследования.** Целью работы является проведение технико-экономического анализа применения гибридной системы охлаждения оборотной воды на примере вентиляторной градирни БМГ-100, включающей полимерный ороситель с площадью орошения 6,25 м<sup>2</sup>. Предлагается заменить градирню БМГ-100 с мокрым охлаждением на теплоэлектростанциях на гибридную систему с последовательным контуром мокрой/сухой обработки, достигаемую с помощью внедрения дополнительного теплообменника в качестве модуля сухого охлаждения. Теплообменник передает тепло за счет теплопроводности и конвекции. В частности, в зимнее время года вследствие высокой разности температур охлаждаемой воды и окружающего воздуха достаточным является использование сухой части градирни – теплообменника. Для увеличения мощности теплового потока (в летнее время года) наиболее целесообразным является орошение рабочих поверхностей теплообменника охлаждающей жидкостью (основным технологическим потоком мокрой градирни). Техническое обслуживание градирен обычно включает в себя ряд мероприятий, основными среди которых, являются работы по удалению загрязнений. Потенциальными составляющими экономического эффекта могут выступать снижение затрат на закупку реагентов для обработки оборотной воды.

**Материалы и методы исследований.** Для оценки экономической эффективности внедрения дополнительного теплообменного аппарата в рамках реконструкции градирни применялась стандартная методика прогнозной оценки экономической эффективности в следующей

последовательности: расчет затрат, необходимых для реализации проекта, прогноз экономического эффекта от реализации проекта.

**Расчет дополнительных капитальных вложений.** Для расчета показателей экономической эффективности реконструкции блочной микро-градирни (БМГ-100) производства компании ТМИМ произведем оценку капитальных вложений, в ходе которой требуется установка дополнительного теплообменника, работающего в качестве сухой части градирни, трубопровода, запорной арматуры и контрольно-измерительных приборов. Совместная стоимость оборудования, комплектующих, а также подготовка и оформление разрешительных документов составляют:  $Z_{CM} = 2570$  тыс. руб.

В таблице 1 представлены исходные параметры для проведения расчета технико-экономической эффективности реконструкции в части оценки капитальных затрат и затрат, связанных с эксплуатацией и обслуживанием.

Таблица 1 – ВХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДЛЯ ЭКОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Наименование показателей, единица измерения	Условные обозначения	Величина
Среднегодовая зарплата одного рабочего, тыс. руб.	ЗП	691,93
Количество рабочих, чел.	Ч	3
Норма затрат на ремонт, %		
- капитальный,	$n_1$	12
- текущий.	$n_2$	18
Коэффициент, учитывающий стоимость наладочных работ, %	$\alpha_H$	5
Коэффициент, учитывающий стоимость монтажных работ, %	$\alpha_M$	10
Коэффициент, учитывающий транспортные затраты, %	$\alpha_T$	7
Норма амортизации, %	$N_a$	12

Дополнительные капитальные вложения в реконструкцию существующей системы охлаждения на базе градирни БМГ-100 определяются по формуле:

$$K = Z_{CM} + Z_M + Z_H + Z_{TR.P}, \quad (1)$$

где  $Z_{CM}$  – сметная стоимость вновь вводимого оборудования, руб.;  $Z_M$  – стоимость монтажных работ, руб.;  $Z_H$  – стоимость наладочных работ, руб.;  $Z_{TR.P}$  – транспортные расходы, руб.

Стоимость монтажных работ, наладочных работ и транспортные расходы определяются по формулам с учетом поправочных коэффициентов, принятых в таблице 1, соответственно:

$$Z_M = \frac{\alpha_M}{100} \cdot Z_{CM} = 257 \text{ тыс. руб.}, \quad (2)$$

$$Z_H = \frac{\alpha_H}{100} \cdot Z_{CM} = 128,5 \text{ тыс. руб.}, \quad (3)$$

$$Z_{TR.P} = \frac{\alpha_T}{100} \cdot Z_{CM} = 179,9 \text{ тыс. руб.}, \quad (4)$$

где  $\alpha_M$ ,  $\alpha_H$ ,  $\alpha_T$  – коэффициенты для учета стоимости услуг монтажа, наладки и транспортных услуг соответственно, %.

$K = 3135,4$  тыс. руб. отображает капитальные затраты на реконструкцию мокрой системы охлаждения на основе градирни БМГ-100, рассчитанные по формуле (1), с учетом выражений (1), (3)–(5).

**Расчет показателей экономической эффективности.** Годовые текущие затраты на проект без амортизации можно оценить по формуле:

$$C = Z_{рем} + Z_{ЗП} + Z_{\Delta W} + Z_{эл}, \quad (5)$$

где  $Z_{рем}$  – годовые затраты на капитальный и текущий ремонт, тыс. руб., определяются как:

$$Z_{рем} = K \cdot \frac{n_1 + n_2}{100} = 940,62 \text{ тыс. руб.}, \quad (6)$$

где  $n_1$ ,  $n_2$  – нормативы отчислений на капитальный и текущий ремонт (таблица 1);

$Z_{ЗП}$  – годовые затраты на заработную плату, тыс. руб., определим по формуле:

$$Z_{ЗП} = Ч \cdot ЗП = 2075,79 \text{ тыс. руб.}, \quad (7)$$

$Z_{\Delta W}$  – годовые затраты на закупку химических реагентов, тыс. руб.,

$Z_{эл}$  – годовые затраты электроэнергии для двигательных целей в

стоимостном выражении определяются по формуле:

$$Z_{эл} = Э_{дв} \cdot Ц_{эл} = 274,02 \text{ тыс. руб.}, \quad (8)$$

где  $Э_{дв}$  – годовой расход электроэнергии для двигательных целей (на подачу воды и воздуха), кВт·ч;

$Ц_{эл}$  – цена 1 кВт·ч электроэнергии (принимается равной 1,78 руб./кВт·ч).

Расчет годового расхода электроэнергии для двигательных целей производится с учетом теоретической годовой потребности электроэнергии для двигательных целей, коэффициента спроса, учитывающего неравносильность работы, а также коэффициентов потерь в электросетях и электродвигателях. Таким образом, при производительности по воде 100 м<sup>3</sup>/ч, давлении воды на входе не менее 3 м вод. ст., высоте градирни 5195 мм, мощности электродвигателя насоса 7,5 кВт, мощности электродвигателя вентилятора 11 кВт получаем, что теоретическая годовая потребность электроэнергии для двигательных целей на подачу воды в градирню и привод вентилятора составит 157620 кВт·ч.

Годовые затраты на закупку химических реагентов  $Z_{ΔW}$  складываются из следующих данных. Средний расход реагентов для обработки оборотной воды – ингибиторов коррозии и солеотложений, биоцидов – в системе оборотного водоснабжения на предприятии составляет в течение года 4500 кг, в том числе в зимний период года (с октября по апрель) 2380 кг.

Расчет годовых текущих затрат приведен в таблице 2 при средней стоимости реагентов 214,8 руб. за 1 кг.

Таблица 2 – РАСЧЕТ ГОДОВЫХ ТЕКУЩИХ ЗАТРАТ

Показатель	Значение показателя
Годовые затраты на капитальный и текущий ремонт, тыс. руб.	940,62
Годовые затраты на заработную плату, тыс. руб.	2075,79
Затраты на закупку химических реагентов, тыс. руб.	
в летний период года,	455,38
в зимний период года	511,22
Затраты на электроэнергию, тыс. руб.	274,02
Итого, тыс. руб.	4257,03

Величина амортизационных отчислений от реконструкции градирни в рамках проекта составит, при условии, что проект рассчитан сроком на 10 лет:

$$A = K \cdot \frac{N_a}{100} = 376,25 \text{ тыс. руб.}, \quad (9)$$

где  $K$  – инвестиционные затраты на проект реконструкции, тыс. руб.

**Прогноз экономического эффекта от внедрения.** Подсчитаем экономию от внедрения проекта, результатом которого выступает снижение расхода химических реагентов в системе оборотного водоснабжения за счет использования гибридной системы охлаждения. Рассчитаем ежегодную экономию по формуле:

$$\mathcal{E}_c = P \cdot \mathcal{C} = 773,28 \text{ тыс. руб.}, \quad (10)$$

где  $P$  – снижение расхода использования химических реагентов в системе оборотного водоснабжения, кг/год (таблица 1);

$\mathcal{C}$  – средняя стоимость химических реагентов, руб./кг.

При внедрении теплообменника происходит меньшее расходование реагентов для обработки оборотной воды на предприятии, в среднем это значение составит в зимний период года (с октября по апрель) 476 кг и в летний период года (с мая по сентябрь) 424 кг.

Таким образом, в течение года требуется закупка химических реагентов в количестве 900 кг. Следовательно, сокращение используемых реагентов составит в 5 раз (3600 кг/год).

Срок окупаемости:

$$T = \frac{K}{\Delta_c} = 4,05 \text{ года.} \quad (11)$$

Годовой экономический эффект:

$$\Delta_r = \Delta_c - E_H \cdot K = 146,2 \text{ тыс. руб.}, \quad (12)$$

где  $E_H = 0,2$  – нормативный коэффициент эффективности.

Более актуальным дисконтированного периода окупаемости (DPP), чем срок окупаемости  $T$ , поскольку он принимает во внимание временную стоимость денег. Он определяется как время, необходимое для окупаемости инвестиций на основе ставки дисконтирования инвестиций [1] и его можно оценить следующим образом:

$$DPP = -\frac{\ln\left(1 - \frac{r \cdot K}{B - C}\right)}{\ln(1 + r)} = 6,76 \text{ лет,} \quad (13)$$

где  $B$  – годовой денежный поток от продажи произведенной электрической энергии, тыс. руб., определяется с учетом установленной мощности подстанции и закупочной цены на электроэнергию, вырабатываемую электростанцией (в расчете принят на уровне 5049 тыс. руб.);  $r$  – коэффициент дисконтирования, принятый 0,16.

Отметим, что показатель  $DDP$  определен при фиксированных значениях  $B$ ,  $C$ , поэтому имеет большее значение, чем  $T$ , так как происходит уменьшение ценности денег во времени и требует большего срока окупаемости.

**Заключение.** В результате проведенных расчетов для внедрения гибридной системы охлаждения оборотной воды найдены следующие показатели экономической эффективности проекта:

- 1) период возврата капиталовложений составляет 4,05 года;
- 2) годовой экономический эффект составляет 146,2 тыс. руб.

Полученные результаты анализа свидетельствуют о невысокой экономической эффективности данного проекта и низкой рентабельности (~ 5%). При этом, можно сказать о целесообразности предложенного

проекта реконструкции системы охлаждения оборотной воды с помощью градирни БМГ-100, сравнивая его значение со средним показателем прибыльности в энергетике, что обусловлено высокими затратами на производство и особенно на транспорт энергоносителей. Также не были взяты в расчет сокращение потерь из-за испарения и уноса капельной влаги, расходы на ликвидацию ущерба за сброс загрязняющих веществ в составе сточных вод. Таким образом, необходим более детальный анализ, включающий расчет изменения термодинамической эффективности, гидравлической нагрузки и охлаждающей площади при реконструкции градирен. Этот анализ может предоставить научную основу для улучшения отрасли и принятия инвестиционных решений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01034, <https://rscf.ru/project/23-79-01034/>.

#### **Библиографический список**

1. Marazgioui S.E. Impact of cooling tower technology on performance and cost-effectiveness of CSP plants / S.E. Marazgioui, A.E. Fadar // Energy Conversion and Management. – 2022. – V. 258. – Article No 115448. – DOI: 10.1016/j.enconman.2022.115448

#### **References**

1. Marazgioui S.E. Impact of cooling tower technology on performance and cost-effectiveness of CSP plants / S.E. Marazgioui, A.E. Fadar // Energy Conversion and Management. – 2022. – V. 258. – Article No 115448. – DOI: 10.1016/j.enconman.2022.115448