

ЯДЕРНАЯ, РАДИАЦИОННАЯ И  
ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ  
NUCLEAR, RADIATION AND  
ENVIRONMENTAL SAFETY

УДК 621.039.5: 620.91: 338.45  
<https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-02>  
EDN FUHC DK

Оригинальная статья / Original paper



Исследование целесообразности сочетания солнечной электростанции с реактором малой мощности для опреснения морской воды

М.М. Салех , А.А. Абдельразек  , А.Ф. Мохаммед ,  
А.А. Калютик , Е.А. Соколова 

Высшая школа атомной и тепловой энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация  
 [abdelrazek.a@edu.spbstu.ru](mailto:abdelrazek.a@edu.spbstu.ru)

**Аннотация.** В статье рассматривается технико-экономический анализ установки по опреснению морской воды. Источником энергии на предлагаемой станции является сочетание солнечной и атомной видов энергии, поскольку они являются одними из наиболее экологически чистых источников энергии по сравнению с электростанциями, работающими на ископаемом топливе. Источником ядерной энергии в данном исследовании является модульный реактор малой мощности (ММР). В состав комбинированной установки входит гибридная система опреснения морской воды: либо сочетание установки обратного осмоса с установкой многоступенчатой дистилляции (RO+MED), либо установка обратного осмоса с установкой дистилляции мгновенным вскипанием (RO+MSF). Реакторы малой мощности можно использовать не только для производства электроэнергии, но и для других, неэлектрических применений, поскольку они производят высокотемпературный пар для промышленных процессов (например, для производства водорода и опреснения морской воды). Реакторы малой мощности также считаются экономически более эффективными, безопасными, более гибкими и имеют большее количество применений по сравнению с реакторами большой мощности. Проводимый в работе анализ основан на расчете экономической стоимости одного кубометра пресной воды при использовании гибридной опреснительной установки и сравнении результатов с результатами, полученными в результате использования опреснительной установки, интегрированной с электростанцией, использующей исключительно ядерную энергию в качестве энергоисточника на базе реактора ВВЭР-1200. Также в данном исследовании рассматривается влияние степени гибридизации, то есть отношения мощности, используемой от солнечной энергии, к мощности, используемой от ядерной энергии, на стоимость опреснения одного кубометра воды, а также на качество опресненной воды.

**Ключевые слова:** реактор малой мощности, ММР, опреснение морской воды, атомное опреснение, обратный осмос, мгновенное вскипание, многоступенчатая дистилляция, солнечная электростанция, гибридизация энергетических систем, ВВЭР-1200.

**Для цитирования:** Салех М.М., Абдельразек А.А., Мохаммед А.Ф., Калютик А.А., Соколова Е.А. Исследование целесообразности сочетания солнечной электростанции с реактором малой мощности для опреснения морской воды. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(2):20–30. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-02>

**For citation:** Saleh M.M., Abdelrazek A.A., Mohammed A.F., Kalyutik A.A., Sokolova E.A. Feasibility study of hybridizing a solar power plant with a small modular reactor for seawater desalination. *Global nuclear safety*. 2024;14(2):20–30 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-02>

## Feasibility study of hybridizing a solar power plant with a small modular reactor for seawater desalination

Mostafa M. Saleh , Ahmed A. Abdelrazek  , Arafa F. Mohammed ,  
Alexander A. Kalyutik , Ekaterina A. Sokolova 

*Higher School of Nuclear and Thermal Power Engineering, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU), Saint Petersburg, Russian Federation*  
 *abdelrazek.a@edu.spbstu.ru*

**Abstract.** The article discusses the technical and economic analysis of a seawater desalination plant, where the power source is a hybrid of solar and nuclear energy, as they are considered the cleanest energy sources compared to fossil fuel power plants. The source of nuclear energy in this study is a small modular reactor (SMR). This plant also uses a hybrid of seawater desalination systems: either a reverse osmosis plant with a multi-effect distillation (RO + MED) unit, or a reverse osmosis plant with a multi-stage flash distillation (RO + MSF) unit. Small modular reactors can be used for other applications besides generating electricity, as they produce high-temperature steam which can be used in many industrial processes such as hydrogen production and seawater desalination. Small modular reactors are also considered to be more cost effective, safer, more flexible and have a greater number of applications compared to high power reactors. The analysis is based on calculating the cost of producing of one cubic meter of fresh water using this hybrid desalination plant and comparing the results with those of desalination plant integrated with a power plant that uses exclusively nuclear energy as a source of thermal and electrical power, which uses the VVER-1200 reactor. Also, this study studies the impact of the degree of hybridization, that is, the ratio of power used from solar energy to power used from nuclear energy, on the cost of desalination of one cubic meter of water, as well as on the quality of the desalinated water.

**Keywords:** small modular reactor, SMR, seawater desalination, nuclear desalination, RO, MSF, MED, solar power plant, energy hybridization, VVER-1200.

### Введение

Вода – это ограниченный ресурс, спрос на который постоянно растет. По мере роста численности населения Земли и продолжения ресурсоемкого экономического развития во многих странах, водные ресурсы и инфраструктура не могут удовлетворить растущий спрос. Изменение климата усугубляет дефицит воды. Запасы земной воды, представляющие из себя воду, содержащуюся в почве, снегу и льде – уменьшаются. Это приводит к увеличению дефицита воды. Одним из наиболее важных и надежных решений проблемы нехватки воды является опреснение морской воды, но большинство опреснительных установок, существующих в настоящее время в мире, работают на ископаемом топливе, что приводит к негативным экологическим последствиям, таким как глобальное потепление, загрязнение воздуха и изменение климата. В связи с этим необходимо было изучить безопасные и экологически чистые альтернативы, на которые можно положиться для решения этой про-

блемы. Среди этих альтернатив — использование ядерной или солнечной энергии в качестве источника энергии для опреснения морской воды или использование совместной выработки ядерной и солнечной энергии. В данном исследовании изучается экономическая и техническая целесообразность сочетания источников солнечной и ядерной энергии для нужд опреснения морской воды. В рассматриваемой работе источником ядерной энергии служит реактор малой мощности (малый модульный реактор – ММР).

Реакторы малой мощности представляют собой реакторы с электрической мощностью обычно до 300 МВт<sub>эл</sub>, что составляет около одной трети генерирующих мощностей традиционных ядерных энергетических реакторов<sup>1</sup>. ММР разрабатываются для всех ос-

<sup>1</sup> Advances in small modular reactor technology developments, IAEA publications, 2022. Available at: <https://aris.iaea.org/sites/Publications.html> (accessed: 07.03.2024).

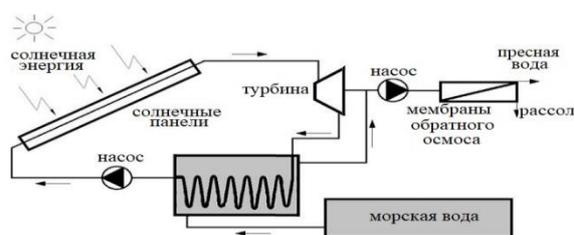
новых технологических линий реакторов: водоохлаждаемых реакторов, высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов, реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем, расплавленносолевых реакторов и микрореакторов. ММР представляют собой низкоуглеродную альтернативу системам производства электроэнергии, работающим на ископаемом топливе, в странах с непротяженными электросетями и ограниченными финансовыми возможностями. ММР могут сыграть ключевую роль в смягчении последствий изменения климата не только из-за их способности снижать выбросы углекислого газа электростанциями благодаря быстрой масштабируемости и распространению дополнительных модулей по мере необходимости, но также из-за их потенциальной пользы для неэлектрических применений, таких как опреснение морской воды, централизованное теплоснабжение и хладоснабжение, а также производство водорода – процессы, которые до сих пор были основаны в основном на ископаемом топливе [1,2].

Поскольку ММР находятся на ранней стадии разработки, крайне важен углубленный анализ необходимости и осуществимости их распространения. По сравнению с АЭС ММР считаются более безопасными, более экономически эффективными, требуют меньших капитальных затрат и имеют более короткие сроки строительства [3], в частности, ММР изготавливаются на заводе, что значительно упрощает транспортировку и сборку и может сократить сроки строительства на месте [4]. Кроме того, реакторы имеют улучшенные системы безопасности, что делает ядерную энергетическую технологию еще более безопасной.

С учетом требований безопасности были предприняты различные меры по улучшению характеристик ММР, такие как меньшие размеры активной зоны, большее отношение поверхности к объему реактора и меньшая удельная мощность активной зоны. В большинстве современных конструкций внутри корпуса реактора нет вращающихся частей; весь теплоноситель протекает через активную зону за счет естественной циркуляции, что позволяет исключить выход из

строения насоса первого контура и тем самым – ремонт или замену насосов [5].

Солнечная энергия может использоваться в качестве источника энергии для опреснения воды, поскольку фотоэлектрическая (PV) технология может быть напрямую подключена к процессам обратного осмоса, которые основаны на использовании электричества в качестве привода (см. рис. 1). Различные небольшие фотоэлектрические системы опреснения были построены в качестве демонстрационных моделей в разных странах мира. Одной из основных причин использования метода обратного осмоса вместо термической дистилляции является надежность и простота прямого объединения с возобновляемыми источниками энергии, такими как солнечная и ветровая энергия. Хоссам-Элдин и др. [6] исследовали сочетание фотоэлектрических и ветровых источников энергии с опреснительной обратноосмотической установкой для производства 1200 м<sup>3</sup>/сут. Хелал и др. [7] исследовали экономическую целесообразность использования системы PV-RO при низком энергопотреблении. Три альтернативные конструкции независимого блока PV-RO были протестированы в отдаленных районах Объединенных Арабских Эмиратов. Изучалась возможность использования дизель-генераторов в выходные дни.

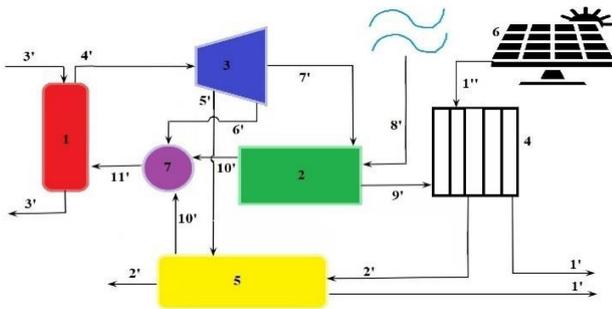


**Рисунок 1.** Схема подключения солнечной панели в качестве источника энергии к системе обратного осмотического опреснения морской воды

**Figure 1.** Diagram of connecting a solar panel as an energy source to a seawater desalination system using reverse osmosis

В данном исследовании использовались два типа гибридизации для получения более высокого уровня производства опресненной воды в день, а также для получения более низкой цены за кубический метр. Первый тип – это использование гибридных источников энергии, то есть использование сол-

нечных панелей с ММР, а второй тип – это гибридизация используемого типа опреснения за счет использования систем термического опреснения с системами обратного осмоса. Солнечные панели вырабатывают электроэнергию для насосов установки обратного осмоса, а ММР применяются для выработки пара, который используется для работы установок термического опреснения воды. Целью сочетания энергоисточников



**Рисунок 2.** Предлагаемая схема гибридной установки опреснения воды: 1 – парогенератор; 2 – конденсатор; 3 – турбина; 4 – мембраны ОО; 5 – установка термического опреснения; 6 – солнечные панели; 7 – подогреватель; 1' – опресненная вода; 2' – рассол; 3' – теплоноситель первого контура реактора; 4' – свежий пар на турбину; 5' – пар на установку термического опреснения; 6' – греющий пар на подогреватель; 7' – отработанный пар; 8' – морская вода; 9' – питательная вода для мембран ОО из конденсатора; 10' – конденсат; 11' – питательная вода; 1'' – электроэнергия для насосов ОО

**Figure 2.** A proposed diagram of a hybrid water desalination plant. 1 – steam generator; 2 – condenser; 3 – turbine; 4 – RO membranes; 5 – thermal desalination plant; 6 – solar panels; 7 – reheater; 1' – desalinated water; 2' – brine; 3' – the coolant of the reactor's primary circuit; 4' – fresh steam to the turbine; 5' – steam for the thermal desalination plant; 6' – heating steam to the heater; 7' – spent steam; 8' – sea water; 9' – feed water for RO membranes from the condenser; 10' – condensate; 11' – feed water; 1'' – electric power for RO pumps

является получение воды наилучшего качества по оптимальной стоимости, так как метод обратного осмоса обеспечивает производство воды более низкого качества, но с более низкой стоимостью, а методы термического опреснения позволяют получить воду более высокого качества, но с более вы-

сокими затратами. Подобная схема представлена на рисунке 2.

### Методология

Основная идея исследования заключается в сочетании двух типов технологии опреснения воды – электрического (обратного осмоса) и термического (метода мгновенного вскипания или многоколонного испарения) Используемые источники энергии также будут гибридизированы. Вместо того, чтобы полностью полагаться на один источник энергии в качестве источника тепловой и электрической энергии, электроэнергия, необходимая для работы насосов опреснительной установки, будет вырабатываться с помощью солнечной электростанции. Малый модульный реактор будет использоваться в качестве источника тепловой энергии для термической опреснительной установки. Установка РО использует воду, поступающую из конденсатора ядерного реактора (малого модульного реактора), чтобы воспользоваться преимуществами высокой температуры нагрева этой воды. Потому что чем выше температура воды, тем быстрее происходит диффузия. По мере ускорения диффузии потребляемая энергия уменьшается. Таким образом рассол, полученный на установке обратного осмоса, станет источником питания для установки термического опреснения. Для определения входной мощности для системы РО [8], скорость подачи воды к мембранам обратного осмоса (РО) может быть выражена следующим уравнением (1):

$$M_f = M_p / RR, \quad (1)$$

где  $M_f$ ,  $M_p$  и  $RR$  – расход питательной воды, расход пермеата и коэффициент восстановления соответственно.

Соленость пресной воды (пермеата) выражается следующим уравнением (2):

$$X_p = (K_s \times A_t \times X_{av}) / M_p, \quad (2)$$

где  $X_p$ ,  $k_s$ ,  $A_t$  и  $X_{av}$  – это соленость пермеата, проницаемость для соли, общая площадь

мембраны и средняя соленость, соответственно.

Соленопроницаемость определяется по формуле (3):

$$K_s = 4.72 \times 10^{-7} \times FF \times TCF \times (0.062 - (5.3 \times 10^{-5} \times (T_{sea} + 273))), \quad (3)$$

где FF, TCF, Tsea – коэффициент обрастания мембраны, температурный поправочный коэффициент и температура морской воды, соответственно.

Температурный поправочный коэффициент TCF рассчитывается по формуле (4):

$$TCF = \exp\left(3020 \times \left(\frac{1}{273+T_{sea}} - \frac{1}{298}\right)\right), \quad (4)$$

Расход рассола можно рассчитать по формуле (5):

$$M_c = M_f - M_p, \quad (5)$$

Концентрацию рассола можно определить по формуле (6):

$$X_c = (M_f \times X_f - M_p \times X_p) / M_c, \quad (6)$$

где  $X_c$ ,  $X_f$  – концентрация рассола и исходной соли соответственно.

Водопроницаемость мембраны  $K_w$  рассчитывается по формуле (7):

$$K_w = 6.84 \times 10^{-8} \times (18.685 - \left(\frac{0.177X_c}{T_{sea}+273}\right)), \quad (7)$$

Чистая разница давлений на мембране  $\Delta P$  выражается следующим уравнением (8):

$$\Delta P = M_p / (TCF \times K_w \times FF \times A_e \times N_e \times N_v) + \Delta \pi, \quad (8)$$

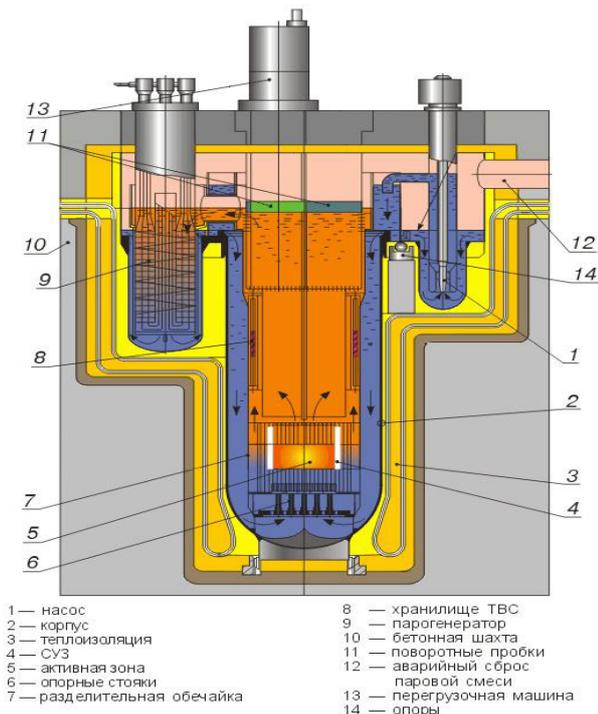
где  $A_e$ ,  $N_e$ ,  $N_v$  и  $\Delta \pi$  – площадь мембранного элемента, количество мембранных элементов на сосуд под давлением, количество сосудов под давлением и чистое осмотическое давление на мембране соответственно.

Требуемая потребляемая мощность для насоса высокого давления установки обратного осмоса  $P_{RO}$  определяется уравнением (9):

$$P_{RO} = (0.2777 \times M_f \times \Delta P) / (\rho \times \eta_{hpp}). \quad (9)$$

После определения энергии, необходимой для насосов системы обратного осмоса, можно приступить к расчетам солнечной станции (определить количество требуемых солнечных панелей, а также количество аккумуляторов, необходимых для производства этой энергии). Аккумуляторы сохраняют излишки энергии солнца, выработанные фотоэлектрической станцией в дневное время, и используют их вечером. Солнечную радиацию рассчитываем, используя программу «Pvsyst», задав необходимое местоположение. Прежде чем выбрать подходящее место для строительства солнечной электростанции, необходимо учесть многие критерии размещения реактора малой мощности. К ним относятся географические и геологические параметры, поверхностные и подземные воды, зоны отчуждения, транспортные маршруты, социально-экономические и экологические риски.

В качестве примера был выбран участок в городе Эль-Дабаа в провинции Матрух, в Арабской Республике Египет, где вышеупомянутые факторы выбора участка были полностью изучены за последние годы. Известно, что данный участок был выбран для строительства первой египетской атомной электростанции в сотрудничестве с российской Государственной корпорацией по атомной энергии «Росатом». Город Эль-Дабаа расположен в 296 км от Каира на северном побережье Средиземного моря, а в качестве энергоисточника был выбран реактор малой мощности типа БРЕСТ-ОД-300, представленный на рисунке 3. Это надежный реактор российского производства на быстрых нейтронах, со свинцовым теплоносителем и пристанционным топливным циклом.



**Рисунок 3.** Схема реактора БРЕСТ-ОД-300  
**Figure 3.** Schematic design of BREST-OD-300 reactor

Реактор работает на мононитриде урана и плутония (U-Pu)N и использует двухконтурную систему теплопередачи для подачи тепла на паровую турбину. В таблице. 1. приведены технические характеристики реактора БРЕСТ-ОД-300.

**Таблица 1.** Технические характеристики реактора БРЕСТ-ОД-300

**Table 1.** Technical characteristics of the BREST-OD-300 reactor

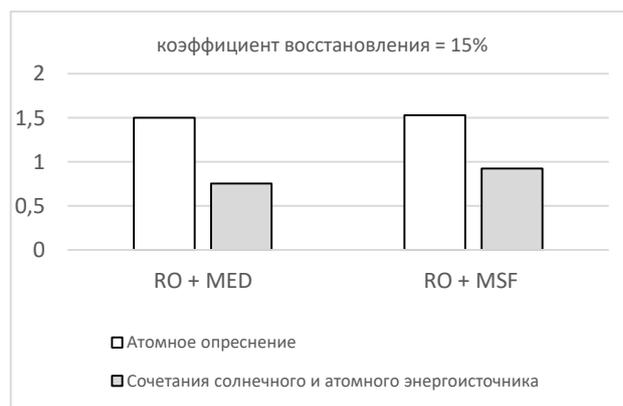
Тип реактора	Быстрый реактор с жидкометаллическим охлаждением
Тепловая мощность	700 МВт
Температура активной зоны на входе/выходе	420/540°C
Эл. мощность	300 МВт
Охлаждающая жидкость	свинец

### Результаты и обсуждение

Для оценки производительности фотоэлектрической системы после определения местоположения и нагрузки, было использовано программное обеспечение «PVsyst» [9]. Пользователь выбирает различные компоненты из базы данных программного обеспечения, и оно автоматически рассчитывает

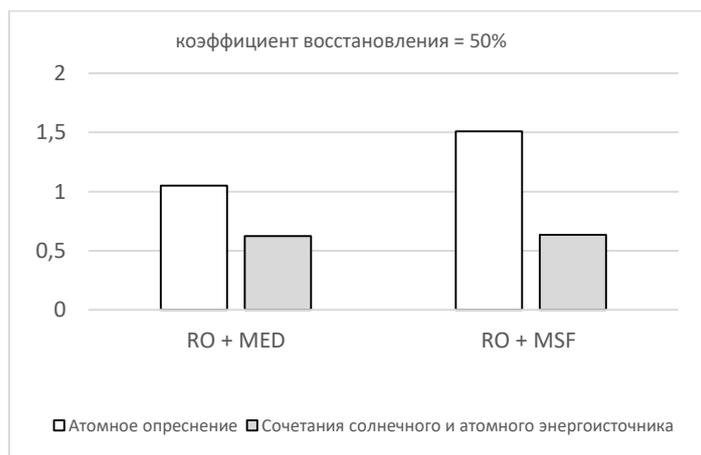
размер системы. В расчетах было выбрано 4655 солнечных панелей типа «Sunnytilr Typ amorph», площадь каждой 533 м<sup>2</sup>, и 444 аккумулятора типа «Wesco GS-100, 105 Ah», расположенные 74 последовательно и 6 параллельно. После выбора и расположения панелей определялась общая стоимость всей солнечной электростанции, а на основе пакета MATLAB была разработана программа для расчета стоимости производства одного кубометра опресненной воды из морской на основе параметров каждого типа опреснения, и с использованием расчетных методов, одобренных Международным Агентством по Атомной Энергии по оценке экономической стоимости установок опреснения морской воды [10] и согласно экономическим данным реактора Брест-од-300 (капитальные затраты, стоимость топлива, стоимость эксплуатации и технического обслуживания) [11].

Стоимость производства одного кубометра опресненной воды сравнивалась при использовании гибридных источников энергии и без использования гибридных источников энергии при коэффициенте восстановления 15% и 50%. Полученные результаты представлены на рисунках 4 и 5.



**Рисунок 4.** Сравнение стоимости производства 1 м<sup>3</sup> опреснённой воды с использованием гибридных энергоисточников и без использования сочетания энергоисточников при коэффициенте восстановления 15%

**Figure 4.** Comparison between the cost of producing one cubic meter of desalinated water using hybrid energy sources and the cost without using hybridization at a recovery factor of 15%

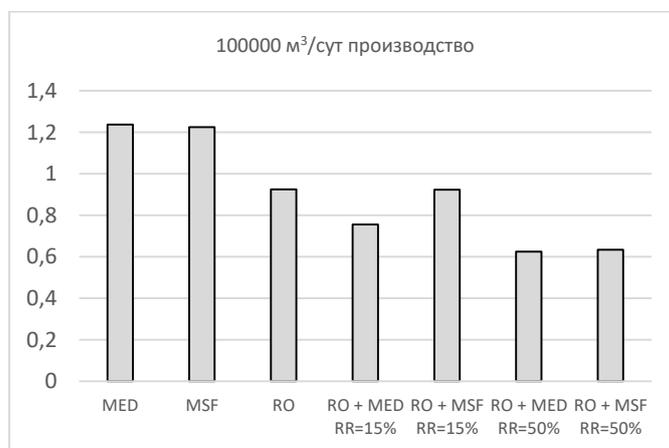


**Рисунок 5.** Сравнение стоимости производства одного кубометра опреснённой воды с использованием гибридных источников энергии и стоимости без использования сочетания при коэффициенте восстановления 50%

**Figure 5.** Comparison between the cost of producing one cubic meter of desalinated water using hybrid energy sources and the cost without using hybridization at a recovery factor of 50%.

Сравнение стоимости опреснения с использованием гибридных систем опреснения и без рассматривается на рисунке 6. Сравнение проводилось на основе расчетов опреснительной установки производительностью 100000 м<sup>3</sup>/сут. Также

сравнивалась стоимость производства воды при использовании двух различных типов гибридных систем опреснения: RO+MSF и RO+MED при коэффициенте восстановления 15% и 50%.



**Рисунок 6.** Сравнение стоимости кубометра опресненной воды при использовании гибридных систем опреснения и без использования

**Figure 6.** Comparison of the cost of desalination using hybridization of desalination systems and without using hybridization

Из рисунков 4,5,6 можно прийти к выводу, что для снижения стоимости опреснения воды рекомендуется сочетание энергоисточников, а также использование гибридных систем опреснения (RO+MSF) или (RO+MED).

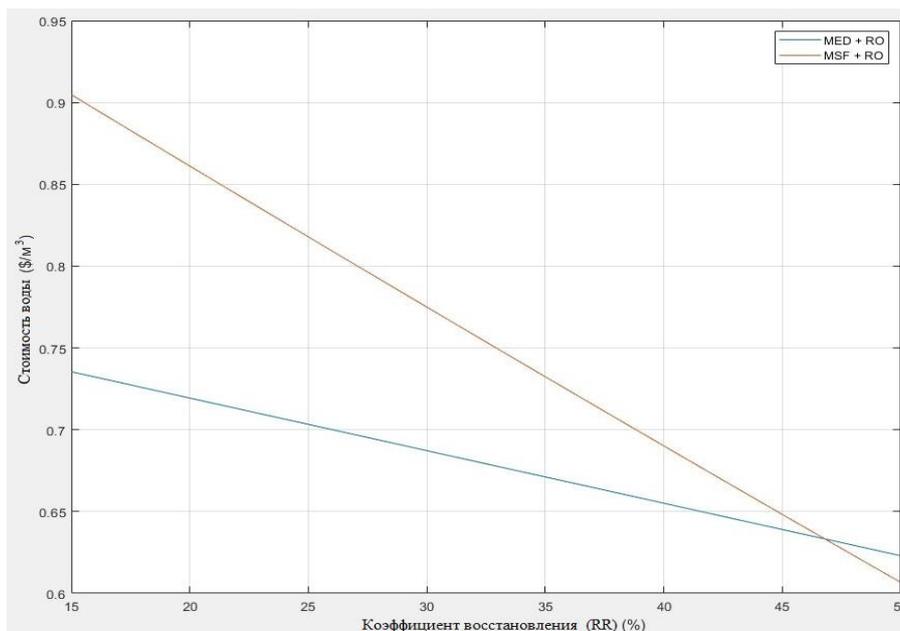
На рисунке 7 показана зависимость стоимости производства одного кубометра пресной воды от коэффициента восстановления.

Как видно из рисунка, с увеличением коэффициента восстановления стоимость воды снижается, поскольку коэффициент восстановления мембраны обратного осмоса относится к проценту питательной воды, преобразованной в опресненную воду или пермеат в мембранной системе обратного осмоса. Чем выше коэффициент восстановления, тем выше производство опресненной воды мето-

дом обратного осмоса. Следует учесть, что по мере роста коэффициента восстановления соленость воды также увеличивается, как показано на рисунке 8.

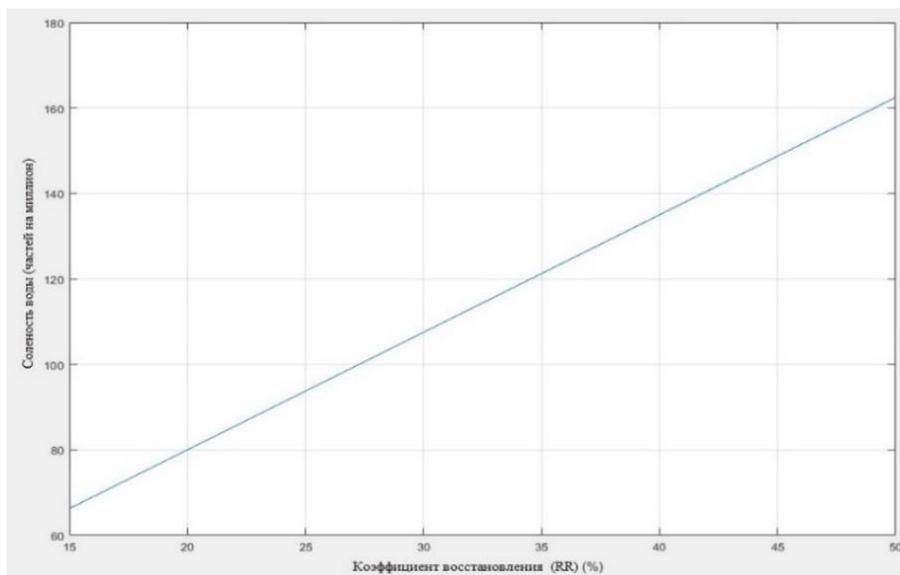
Известно, что от солености воды зависит качество опресненной воды, и в зависимости от цели опреснения, определяется допустимый предел солености опресненной воды.

Если целью опреснения является получение питьевой воды, то качество воды должно быть высоким и стоимость опреснения увеличивается, а для промышленных и сельскохозяйственных целей соленость опресненной воды выше, но стоимость опреснения меньше.



**Рисунок 7.** Зависимость стоимости производства 1 м<sup>3</sup> пресной воды от коэффициента восстановления

**Figure 7.** The relationship between the recovery ratio and the cost of producing one cubic meter of fresh water



**Рисунок 8.** Зависимость солености воды от коэффициента восстановления

**Figure 8.** The relationship between recovery ratio and water salinity

### Заключение

В данной статье представлен технико-экономический анализ сочетания солнечного и ядерного энергоисточника для нужд опреснения морской воды. В качестве примера было предложено разместить реактор малой мощности с солнечной электростанцией в городе Эль-Дабаа, Египет, с целью изучения экономической и технической целесообразности использования такого гибридного комплекса для опреснения морской воды.

Отдельным блоком были проведены расчеты различных опреснительных установок производительностью 100000 м<sup>3</sup>/сут для исследования степени влияния сочетания системы опреснения на итоговую стоимость воды. Были получены результаты, представленные в таблице 2.

**Таблица 2.** Стоимость производства 1 м<sup>3</sup> опреснённой воды с использованием сочетания системы опреснения и без использования сочетания

**Table 2.** The cost of producing one cubic meter of desalinated water using hybrid desalination methods and the cost without using hybridization

Метод опреснения	Стоимость опреснения
MED	1,24 \$/м <sup>3</sup>
MSF	1,22\$/м <sup>3</sup>
RO	0,93 \$/м <sup>3</sup>
RO+MED	0,74 \$/м <sup>3</sup>
RO+MSF	0,91 \$/м <sup>3</sup>

Стоимость производства одного кубометра пресной воды была рассчитана для двух вариантов: при использовании сочетания и без ее использования, при этом рассматривались разные значения коэффициентов восстановления, равные 15% и 50%. В результа-

те расчетов были получены стоимости, представленные в таблице 3.

**Таблица 3.** Стоимость производства 1 м<sup>3</sup> опреснённой воды с использованием гибридных энергоисточников и без использования сочетания

**Table 3.** The cost of producing one cubic meter of desalinated water using hybrid energy sources and the cost without using hybridization

Коэффициент восстановления = 15%		
Метод опреснения	С сочетанием энергоисточников	без сочетания энергоисточников
RO + MED	0,74 \$/м <sup>3</sup>	1,5 \$/м <sup>3</sup>
RO + MSF	0.91 \$/м <sup>3</sup>	1,53 \$/м <sup>3</sup>
Коэффициент восстановления = 50%		
Метод опреснения	С сочетанием энергоисточников	без сочетания энергоисточников
RO + MED	0,62 \$/м <sup>3</sup>	1,05 \$/м <sup>3</sup>
RO + MSF	0,6 \$/м <sup>3</sup>	1,51 \$/м <sup>3</sup>

Следует отметить, что с увеличением коэффициента восстановления стоимость опреснения снижается, поскольку с увеличением коэффициента восстановления, увеличивается производство опресненной воды методом обратного осмоса, а производство опресненной воды с использованием технологии термического опреснения уменьшается, что приводит к снижению стоимости опреснения воды, поскольку метод обратного осмоса производит воду более низкого качества, но с более низкой стоимостью. была рассчитана соленость опресненной воды при изменении коэффициента восстановления в диапазоне от 15% до 50% и находилась в пределах 65-162 частей на миллион, а при использовании только метода обратного осмоса, соленость воды составляет около 300 частей на миллион, а при использовании только термических методов соленость воды менее 25 частей на миллион.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Naterer G.F., Dincer I., Zamfirescu C. Worldwide Nuclear Energy Research Programs. Hydrogen Production from Nuclear Energy. Springer-Verlag London Ltd, 2013. P. 65–97. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4938-5>
2. Lindroos T.J., Pursiheimo E., Sahlberg V., Tulkki V. A techno-economic assessment of NuScale and DHR-400 reactors in a district heating and cooling grid. *Energy Sources. Part B: Economics, Planning, and Policy*. 2019;14(1):13–24. <https://doi.org/10.1080/15567249.2019.1595223>
3. Vujić J., Bergmann R.M., Škoda R., Miletić M. Small modular reactors: Simpler, safer, cheaper? *Energy*. 2012;45(1):288–295. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.01.078>

4. Devanand A., Kraft M., Karimi I.A. Optimal site selection for modular nuclear power plants. *Computers and Chemical Engineering*. 2019;125:339–350. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.03.024>
5. Nian V. The prospects of small modular reactors in Southeast Asia. *Progress in Nuclear Energy*. 2017;98:131–142. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2017.03.010>
6. Hossam-Eldin A., El-Nashar A., Ismaiel A. Investigation into Economical Desalination Using Optimized Hybrid Renewable Energy System. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2012;43(1):1393–1400. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.05.019>
7. Helal A., Al-Malek S., E. Al-Katheeri Economic feasibility of alternative designs of a PV-RO desalination unit for remote areas in the United Arab Emirates. *Desalination*. 2008;221(1-3):1–16. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.064>
8. Ahmed A. Hossam-Eldin, Kamal A. Abed, Karim H. Youssef, Hossam Kotb. Techno-economic optimization and new modeling technique of PV-Wind-Reverse osmosis desalination plant at variable load conditions, *International Journal of Environmental Science and Development*. 2019;10(8):223–230. <https://doi.org/10.18178/ijesd.2019.10.8.1177>
9. Кирпичникова И.М., Махсумов И.Б. Выбор электрооборудования автономной фотоэлектрической системы с использованием программного обеспечения PVsyst. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. 2020;20(2):77–88. <https://doi.org/10.14529/power200207>
10. Saleh M.M., Abdelrazek A.A., Mohammed A.F., Sokolova E.A. A Solution to the problem of fresh water shortage in Egypt using nuclear desalination. Proceedings of the 2024 6<sup>th</sup> International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering. REEPE 2024. <https://doi.org/10.1109/REEPE60449.2024.10479700>
11. Steigerwald B., Weibezahn J., Slowik M., von Hirschhausen C. uncertainties in estimating production costs of future nuclear technologies: A model-based analysis of small modular reactors. *Energy*. 2023;281:128204. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128204>

#### ВКЛАД АВТОРОВ:

**Салех М.** – разработка программы исследований, анализ результатов расчетов, формулирование выводов;

**Абдельразек А.** – написание статьи, оформление материалов статьи;

**Мохаммед А.** – подбор литературных источников и обзор источников литературы по теме исследования;

**Калютик А.А.** – общее руководство работой, научное консультирование;

**Соколова Е.А.** – научное консультирование, редактирование текста статьи.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### AUTHORS' CONTRIBUTION:

**Saleh M.** – development of the research program, analysis of the results of calculations, formulating conclusions;

**Abdelrazek A.** – writing the paper, design of article materials;

**Mohammed A.** – selecting literary sources and preparing a review of literature sources on the research topic;

**Kalyutik A.A.** – general management of the work, scientific consulting;

**Sokolova E.A.** – scientific consulting, editing the text of the article.

#### FUNDING:

The authors state that there are no sources of funding.

#### CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Мостафа Салех**, аспирант Высшей школы атомной и тепловой энергетики, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6888-1039>

e-mail: saleh.m@edu.spbstu.ru

**Ахмед Абдельразек**, аспирант Высшей школы атомной и тепловой энергетики, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5188-7798>

e-mail: abdelrazek.a@edu.spbstu.ru

**Арафа Мохаммед**, аспирант Высшей школы атомной и тепловой энергетики, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4531-3605>

e-mail: mohammed.a@edu.spbstu.ru

**Александр Антонович Калютик**, к.т.н., доцент, директор Высшей школы атомной и тепловой энергетики, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2965-357X>

e-mail: aa\_kalyutik@spbstu.ru

**Екатерина Андреевна Соколова**, к.т.н., старший преподаватель Высшей школы атомной и тепловой энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2018-6258>

e-mail: sokolova\_ea@spbstu.ru

Поступила в редакцию 06.04.2024

После доработки 07.06.2024

Принята к публикации 11.06.2024

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

**Mostafa Saleh**, Postgraduate student, The Higher School of Atomic and Thermal Power Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6888-1039>

e-mail: saleh.m@edu.spbstu.ru

**Ahmed Abdelrazek**, Postgraduate student, The Higher School of Atomic and Thermal Power Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5188-7798>

e-mail: abdelrazek.a@edu.spbstu.ru

**Arafa Mohammed**, Postgraduate student, The Higher School of Atomic and Thermal Power Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4531-3605>

e-mail: mohammed.a@edu.spbstu.ru

**Alexander A. Kalyutik**, Cand. Sci. (Engin.), Associate Professor, Director of The Higher School of Atomic and Thermal Power Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2965-357X>

e-mail: aa\_kalyutik@spbstu.ru

**Ekaterina A. Sokolova**, Cand. Sci. (Engin.), Senior Lecturer, The Higher School of Atomic and Thermal Power Engineering, St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great, St. Petersburg, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2018-6258>

e-mail: sokolova\_ea@spbstu.ru

Received 06.04.2024

Revision 07.06.2024

Accepted 11.06.2024