

ОПТИМИЗАЦИЯ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ КРУГЛОСУТОЧНОГО МЕДИЦИНСКОГО ЦЕНТРА: ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ HOMER PRO

Дееб Али✉, А. Н. Дорошин, Диб Мухаммад

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Россия, 111250, г. Москва, ул. Краснознаменная, д. 14, стр. 1

✉ alideb20001@gmail.com

Статья посвящена исследованию оптимального использования гибридной энергосистемы, включающей солнечные и ветровые установки, дизельный генератор, а также геотермальный тепловой насос, для обеспечения электроснабжения и горячего водоснабжения медицинского центра, расположенного в г. Сальмия (Сирия). Указанный регион является отдалённым и испытывает острый дефицит электроэнергии.

Моделирование и оптимизация системы проводились с использованием программного обеспечения HOMER PRO. В расчетах учитывалась переменная суточная нагрузка в размере 60 кВт·ч и пиковая мощность потребления 5,9 кВт. Солнечные и ветровые источники обеспечивают базовую нагрузку, в то время как дизельный генератор используется в периоды низкой генерации. Геотермальный тепловой насос обеспечивает горячее водоснабжение с высокой энергоэффективностью.

В исследовании был проведён анализ технико-экономической эффективности предложенного решения. Результаты показывают, что использование гибридной системы позволяет существенно снизить эксплуатационные затраты и повысить надёжность энергоснабжения в удалённых регионах.

Ключевые слова: гибридная энергосистема, возобновляемые источники энергии, фотоэлектрические системы, ветрогенератор, дизель-генератор, аккумуляторная батарея, средняя приведённая стоимость энергии, вероятность потери нагрузки

Для цитирования: Дееб Али, Дорошин А. Н., Диб Мухаммад. Оптимизация гибридной системы электроснабжения для круглосуточного медицинского центра: экономический анализ с использованием HOMER PRO. Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2026. Т. 10, № 1. С. 39–48. DOI: 10.25206/2588-0373-2026-10-1-39-48. EDN: ZCGSBK.



© Дееб Али, Дорошин А. Н., Диб Мухаммад, 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

OPTIMIZATION OF A HYBRID POWER SUPPLY SYSTEM FOR THE ROUND-THE-CLOCK MEDICAL CENTER: AN ECONOMIC ANALYSIS USING HOMER PRO

Deeb Ali✉, A. N. Doroshin, Deeb Muhammad

National Research University "Moscow Power Engineering Institute",
Krasnoznamennaya St., 14, bld. 1, Moscow, 111250, Russia

✉ alideb20001@gmail.com

The article is devoted to the study of the optimal use of a hybrid energy system, including solar and wind installations, a diesel generator, as well as a geothermal heat pump, to provide electricity and hot water to a medical center located in the city of Salmiya (Syria). This region is remote and is experiencing an acute shortage of electricity.

The system was modeled and optimized using HOMER PRO software. The calculations took into account a variable daily load of 60 kWh and a peak power consumption of 5.9 kW. Solar and wind sources provide

the base load, while a diesel generator is used during periods of low generation. The geothermal heat pump provides hot water supply with high energy efficiency. The study analyzed the technical and economic efficiency of the proposed solution. The results show that using a hybrid system can significantly reduce operating costs and increase the reliability of energy supply in remote regions.

Keywords: hybrid power system, renewable energy, photovoltaic panels, wind turbine, diesel generator, battery storage, levelized cost of energy, loss of power supply probability

For citation: Deeb Ali, Doroshin A. N., Deeb Muhammad. Optimization of a hybrid power supply system for the round-the-clock medical center: An economic analysis using HOMER PRO. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2026;10(1):39–48. <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2026-10-1-39-48>. EDN: ZCGSBK. (In Russ.).



© Deeb Ali, Doroshin A. N., Deeb Muhammad, 2026.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Надёжное энергоснабжение является критически важным условием для функционирования медицинских учреждений, особенно в удалённых и энергодефицитных регионах. В таких условиях, характерных для многих районов Сирии, перебои в централизованном электроснабжении напрямую угрожают жизнеобеспечению и снижают качество медицинских услуг [1, 2]. Традиционным решением в подобных случаях выступают дизельные генераторы (ДГ), однако их эксплуатация сопряжена с высокими и нестабильными затратами на топливо, значительными выбросами загрязняющих веществ и необходимостью логистики горюче-смазочных материалов [3].

Перспективной альтернативой для создания автономных и устойчивых энергосистем служат гибридные системы на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), комбинирующие солнечные (ФЭ) и ветровые установки (ВЭУ) с резервным ДГ и накопителями энергии (АКБ) [4, 5]. Подобные системы позволяют существенно снизить зависимость от дизельного топлива, минимизировать экологический след и обеспечить более стабильное электроснабжение [6]. В условиях Ближнего Востока, и в частности Сирии, потенциал солнечной и ветровой энергии является значительным, что создаёт благоприятные предпосылки для внедрения таких технологий [7].

Анализ современных исследований показывает, что, несмотря на обширную литературу по оптимизации гибридных систем общего назначения, остаётся недостаточно изученным вопрос комплексного энергоснабжения социально значимых объектов с круглосуточным режимом работы, таких как медицинские центры [8, 9]. Большинство работ фокусируется на минимизации стоимости энергии, часто без детального количественного анализа надёжности снабжения конкретной, чувствительной к перерывам нагрузки [10]. Кроме того, лишь в единичных исследованиях рассматривается интеграция высокоэффективных тепловых нагрузок (например, геотермальных тепловых насосов для горячего водоснабжения) в расчётную модель и её влияние на оптимальную конфигурацию системы [11].

Целью настоящего исследования является устранение указанных пробелов путём разработки и сравнительного технико-экономического анализа нескольких конфигураций автономной гибридной энергосистемы для круглосуточного медицинского центра в г. Сальмия (Сирия). В работе решаются следующие задачи:

- моделирование часовых профилей электрической нагрузки и оценка климатических ресурсов (солнечная радиация, скорость ветра) для заданного местоположения;

- оптимизация с использованием программного комплекса HOMER PRO для определения состава системы (ФЭ, ВЭУ, ДГ, АКБ) с минимальной приведённой стоимостью энергии (СПСЭ);

- комплексная оценка не только экономических, но и надёжностных показателей различных конфигураций с использованием критерия вероятности потери нагрузки (ВПН);

- анализ влияния на оптимальную конфигурацию сценария с использованием геотермального теплового насоса для покрытия тепловой нагрузки (горячее водоснабжение), смоделированного как энергоэффективный потребитель.

Научная новизна работы заключается в комплексной методике, которая на примере медицинского центра в г. Сальмия (Сирия) позволяет оценить влияние высокоэффективной тепловой нагрузки (смоделированной через геотермальный тепловой насос как электрический потребитель с коэффициентом эффективности $COP = 4$ на оптимальную конфигурацию автономной гибридной системы электроснабжения. Подход объединяет технико-экономическую оптимизацию (минимизация СПСЭ) с количественной оценкой надёжности энергоснабжения (ВПН) для чувствительной нагрузки и анализом изменения структуры системы при замене прямого электронагрева энергосберегающей технологией.

В работе сравниваются два сценария покрытия тепловой нагрузки центра (горячее водоснабжение):

1. Базовый сценарий: нагрев воды осуществляется прямым электрическим способом, соответствующая электрическая нагрузка учтена в общем профиле потребления 60 кВт·ч/сут.

2. Сценарий с геотермальным тепловым насосом (ГТН): прямой электронагрев заменяется высокоэффективным геотермальным тепловым насосом с $COP = 4$, который моделируется как дополнительная электрическая нагрузка.

Преимущество

и компоненты гибридной системы

Современные тенденции развития энергетики направлены на внедрение экологически безопасных и устойчивых технологий, способных обеспечить снижение зависимости от ископаемых видов топлива. Ключевую роль в этом процессе играют фотоэлектрические установки, ветроэнергетиче-

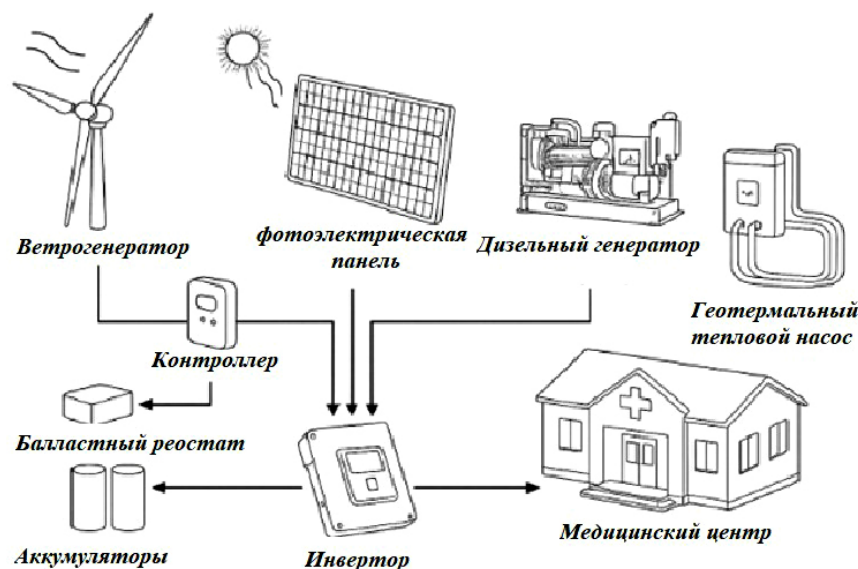


Рис. 1. Гибридная система производства электроэнергии
Fig. 1. Hybrid power generation system

ские системы, аккумуляторы энергии, силовые преобразователи и геотермальные тепловые насосы (рис. 1).

Фотоэлектрические установки (ФЭ) представляют собой устройства, которые преобразуют энергию солнечного излучения непосредственно в электрический ток с использованием полупроводниковых элементов. Данная технология не оказывает вредного воздействия на окружающую среду, не создаёт шумового загрязнения и не требует значительных эксплуатационных затрат. Благодаря модульной конструкции, солнечные панели легко устанавливаются на любых объектах и могут быть быстро демонтированы при необходимости. Хотя первоначальные инвестиции в фотоэлектрические системы остаются сравнительно высокими, непрерывное совершенствование технологий производства и повышение эффективности преобразования энергии приводят к устойчивому снижению стоимости электроэнергии, получаемой от солнечного излучения [12].

Ветроэнергетические комплексы (ВЭК) используют механическую энергию воздушных потоков для генерации электричества. Конструктивно они состоят из турбин, установленных на башнях, систем управления углом наклона лопастей и скорости вращения ротора, а также электрогенераторов, преобразующих механическую энергию в электрическую. Для обеспечения безопасной работы применяются автоматические тормозные устройства и системы дистанционного контроля, позволяющие регулировать работу каждой турбины отдельно [13].

Для стабилизации подачи электроэнергии при переменных природных условиях в гибридных системах применяются аккумуляторные модули. Они позволяют накапливать избыточную энергию, вырабатываемую солнечными и ветровыми источниками, и обеспечивать энергоснабжение при пиковых нагрузках или отсутствии солнца и ветра. Наиболее распространёнными являются электрохимические аккумуляторы вторичного типа, которые могут многократно перезаряжаться и обеспечивать высокий уровень надёжности в автономных энергетических установках.

Силовые преобразователи и системы управления выполняют функции согласования и оптимизации потоков энергии между различными компонентами гибридной сети. Они обеспечивают преобразование постоянного тока в переменный и наоборот, а также координируют работу всех элементов с помощью встроенных микропроцессорных контроллеров. Таким образом достигается устойчивость и эффективность работы всей энергетической системы.

Наряду с возобновляемыми источниками, дизельные и газовые генераторы нередко включаются в состав гибридных комплексов в качестве резервных. Их применение оправдано в периоды дефицита природных ресурсов или повышенного спроса на электроэнергию. Выбор конкретного типа генератора определяется мощностными характеристиками, доступностью топлива и эксплуатационными условиями.

Особое место в гибридных энергосистемах занимают геотермальные тепловые насосы, основанные на использовании постоянной температуры грунта для отопления, охлаждения помещений и подогрева воды. Указанные устройства переносят тепловую энергию из земли в систему отопления здания или наоборот, в зависимости от сезона. Геотермальные установки демонстрируют высокий коэффициент преобразования энергии (COP 3–5), что делает их одной из самых энергоэффективных технологий для теплового обеспечения зданий [14]. При сочетании с фотоэлектрическими и ветровыми источниками они позволяют формировать полностью автономные энергокомплексы, удовлетворяющие как электрические, так и тепловые потребности объектов с минимальным воздействием на окружающую среду.

Оптимизация затрат

Оптимизация структуры и параметров гибридной энергосистемы направлена на минимизацию приведённых затрат при обеспечении требуемой надёжности электроснабжения и тепловой нагрузки объекта. В общем виде задача может быть представлена как задача многопараметрической оптимизации, в которой целевая функция характеризует

суммарные дисконтированные издержки за расчётный период эксплуатации.

Совокупные приведённые затраты $C_{\text{итог}}$ включают капитальные вложения, эксплуатационные и топливные расходы, а также стоимость замены оборудования и остаточную стоимость после завершения расчётного периода [15]:

$$C_{\text{итог}} = C_{\text{кр}} + \sum_{t=1}^N \frac{C_{\text{эп}}(t) + C_{\text{тр}}(t) + C_{\text{зр}}(t) - C_{\text{ор}}(t)}{(1+r)^t}, \quad (1)$$

где $C_{\text{кр}}$ — первоначальные капитальные вложения в оборудование (солнечные панели, ветротурбины, дизель-генератор, аккумуляторные батареи, тепловой насос); $C_{\text{эп}}(t)$ — эксплуатационные и технические расходы в году t ; $C_{\text{тр}}(t)$ — годовые расходы на топливо для дизельного генератора; $C_{\text{зр}}(t)$ — затраты на замену или капитальный ремонт оборудования; $C_{\text{ор}}(t)$ — остаточная (ликвидационная) стоимость оборудования к концу срока службы; r — ставка дисконтирования; N — расчётный период (лет).

Для оценки экономической эффективности применяется показатель чистой приведённой стоимости (ЧПС):

$$\text{ЧПС} = -C_{\text{кр}} + \sum_{t=1}^N \frac{(R_t - C_t)}{(1+r)^t}, \quad (2)$$

где R_t — экономический эффект (доход или эквивалентная стоимость произведённой энергии); C_t — совокупные издержки за период t . Оптимальное решение достигается при минимальном значении $C_{\text{итог}}$ и максимальном значении ЧПС.

Средняя приведённая стоимость энергии (СПСЭ) рассчитывается как отношение суммарных дисконтированных затрат к общему объёму произведённой электроэнергии за срок эксплуатации:

$$\text{СПСЭ} = \frac{C_{\text{итог}}}{\sum_{t=1}^N \frac{E_t}{(1+r)^t}}, \quad (3)$$

где E_t — объём произведённой электроэнергии в году t .

В данном исследовании геотермальный тепловой насос моделируется не как источник энергии, а как составляющая электрической нагрузки медицинского центра — для обеспечения горячего водоснабжения. В программном комплексе HOMER PRO ГТН задаётся как постоянная нагрузка с высоким коэффициентом преобразования энергии ($\text{COP} = 4$). Это означает, что для выработки 4 кВт·ч тепловой энергии требуется 1 кВт·ч электроэнергии от гибридной системы. Такой подход позволяет оценить влияние внедрения энергоэффективных технологий на стороне потребителя на оптимальную конфигурацию системы генерации.

Для гибридных систем с несколькими источниками энергии (ФЭ, ВТ, ДГ, АКБ, ГТН) оптимизация проводится с учётом ограничения баланса мощности и надёжности:

$$P_{\text{ф}}(t) + P_{\text{вт}}(t) + P_{\text{дг}}(t) + P_{\text{акб,разр}}(t) = P_{\text{нагрузка}}(t) + P_{\text{акб,заряд}}(t), \quad (4)$$

при этом выполняются ограничения по уровням заряда аккумуляторов, техническим ограничениям генераторов и коэффициенту недообеспечения нагрузки (вероятность потери питания (ВПП)):

$$\text{ВПП} = \frac{\sum_t (E_{\text{нагрузка}}(t) - E_{\text{питание}}(t))}{\sum_t E_{\text{нагрузка}}(t)} \leq \varepsilon_{\text{доп}}, \quad (5)$$

где $\varepsilon_{\text{доп}}$ — допустимая вероятность недообеспечения (обычно 0,01–0,05).

Решение задачи оптимизации может выполняться методами стохастического поиска (генетические алгоритмы, симуляция Монте-Карло) или детерминированными методами градиентного спуска с последующим уточнением параметров в среде моделирования HOMER PRO, где критерий оптимальности определяется минимальным значением СПСЭ при заданных ограничениях.

Модели комбинированной системы энергоснабжения медицинского центра с применением программы HOMER PRO

Для выбора оптимальной конструкции гибридной энергетической системы необходимо провести детальный анализ электрической нагрузки, учитывая её характер, величину и зависимость от времени. Важно учитывать не только максимальное потребление энергии, но и её колебания в течение суток и сезонов, что позволит точно определить потребности в энергии и выбрать наиболее подходящие источники.

Одним из ключевых аспектов является определение максимально допустимой потери нагрузки, поскольку эта величина напрямую влияет на надёжность и экономическую эффективность системы. Важно также оценить доступные ресурсы в данном регионе, такие как солнечные и ветряные источники энергии, которые играют важную роль в выборе оптимальной конструкции системы. Для этого необходимо собрать данные о климатических условиях, уровне солнечной радиации и средней скорости ветра, что поможет выбрать подходящий источник энергии, способный удовлетворить потребности системы.

Особое внимание уделяется моделированию тепловой нагрузки. Помимо базового электрического профиля в расчёты включён сценарий с использованием геотермального теплового насоса для покрытия потребности в горячей воде. В этом сценарии соответствующая часть электрической нагрузки замещается нагрузкой ГТН с учётом его COP, что позволяет более реалистично смоделировать работу круглосуточного медицинского учреждения и оценить выгоды от снижения пикового электропотребления.

В указанном регионе и на его территории присутствуют источники ветров, а также значительное количество солнечного излучения, где регистрируется высокий уровень солнечной инсоляции (среднегодовое значение суточной суммарной солнечной радиации (инсоляции) составляет около 5,5 кВт·ч/(м²·день) на протяжении большей части года. Местоположение площадки находится на высоте 682 м над уровнем моря, с координатами 35°0.9'N и 37°2.7'E.

Количество энергии солнечного излучения W , падающее на площадку площадью S за N дней, можно оценить по формуле:

$$W \approx 5,5 \cdot S \cdot N \text{ (кВт·ч)},$$

где S — площадь, м²; N — количество дней.



Рис. 2. Средняя месячная скорость ветра, м/с (данные за 2019–2024 гг.)
Fig. 2. Average monthly wind speed, m/s (data of 2019–2024)

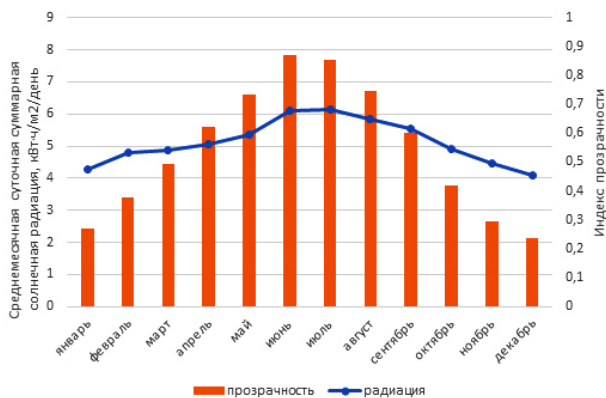


Рис. 3. Среднемесячные значения суточной суммарной солнечной радиации (инсоляции) на площадке, кВт·ч/(м²·день) (данные за 2019–2024 гг.)
Fig. 3. Average monthly values of daily total solar radiation (insolation) at the site, kWh/(m²·day) (data of 2019–2024)

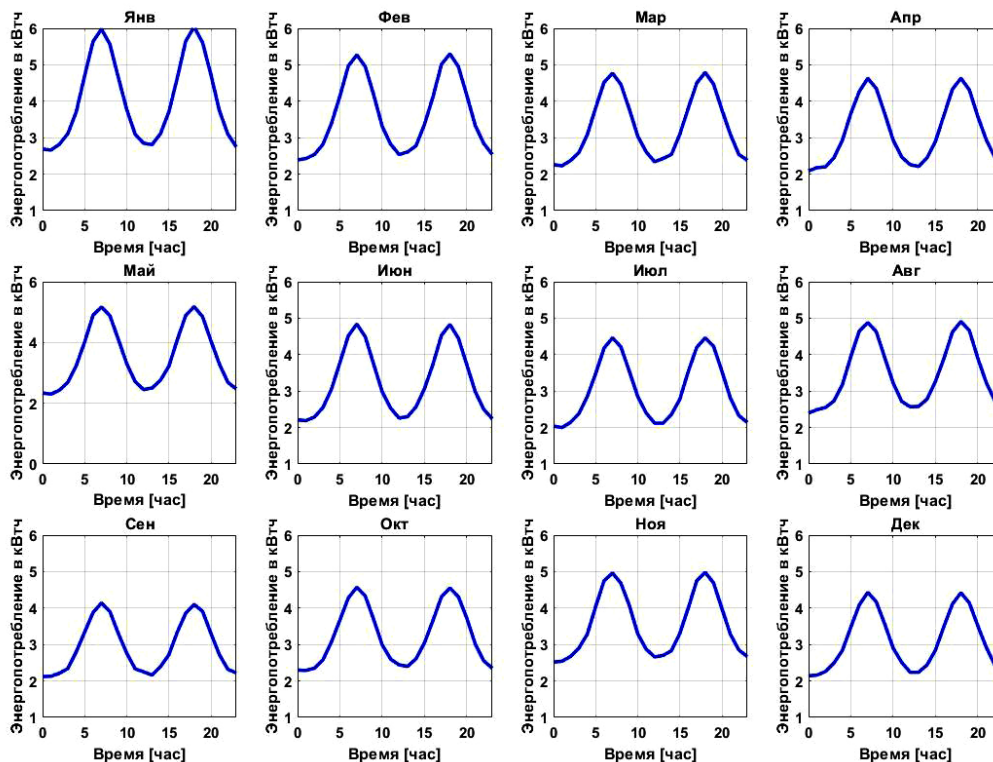


Рис. 4. Совмещённые среднемесячные почасовые профили энергопотребления медицинского центра: по оси ординат — среднее потребление энергии за соответствующий час суток (кВт·ч)
Fig. 4. Combined average monthly hourly energy consumption profiles of the medical center: on the ordinate axis — the average energy consumption for the corresponding hour of the day (kWh)

Данное исследование направлено на обеспечение электроснабжения потребителей с номинальной мощностью 60 кВт·ч/день и пиковой нагрузкой 5,9 кВт с помощью гибридной системы, включающей ветряную и фотоэлектрическую энергию, аккумуляторные батареи и дизельный генератор. Для выбора оптимального решения с минимальными затратами используется программное обеспечение HOMER PRO, которое предлагает несколько вариантов. Проводится анализ различных решений и сравнение их с традиционным методом. Данные, отражающие зависимость средней месячной скорости ветра от времени в период с 2019 по 2024 гг., представлены на рис. 2. Данные на рис. 3, отображают среднемесячные значения суточной суммарной солнечной радиации (инсоляции) в кВт·ч/(м²·день) за период с 2019 по 2024 гг.

Как видно из рис. 4, совмещённые суточные (почасовые) профили энергопотребления (в кВт·ч) медицинского центра для всех месяцев показывают высокую стабильность, демонстрируя характерный для круглосуточного медицинского учреждения устойчивый график с двумя слабовыраженными пиками (дневным и вечерним). На основе этих данных для моделирования в HOMER PRO был составлен типичный суточный почасовой профиль нагрузки, где каждое значение соответствует энергии (кВт·ч), потребляемой объектом в данный час. Выявленная стабильность профиля позволяет обоснованно использовать единый усреднённый суточный график для часового моделирования, что значительно упрощает процесс оптимизации без ущерба для достоверности результатов.

Для моделирования в HOMER PRO были выбраны следующие основные компоненты: фотоэлектрические панели (ФЭ), ветрогенератор (ВЭУ), аккумуляторный банк (АКБ), дизельный генератор (ДГ) и геотермальный тепловой насос (ГТН). Их ключевые параметры:

Таблица 1. Сводка результатов оптимизации HOMER PRO
Table 1. Synopsis of HOMER PRO optimization results

Система	Мощность ФЭ	Ветровые турбины	Дизельный генератор	Батарея	Геотермальная ТН	Начальные капитальные затраты, USD	Годовые эксплуатационные расходы, USD / год — базовые	Годовые эксплуатационные расходы, USD / год — январь (80 кВт·ч / день)	ЧПС затрат, USD — базовые	СПЭСЭ (USD / кВт·ч) — базовые	СПЭСЭ, USD / кВт·ч —январь (80 кВт·ч / день)
Дизель только	0 кВт	0	8 кВт	0	Нет	5 000	6 413	8 550,67	80 181	0,183	0,1833
Вариант 1: ФЭ + АКБ (30 кВт·ч) + Дизель	20 кВт	0	8 кВт	30 кВт·ч	Нет	18 600	2 750	3 426,67	44 979	0,1027	0,1101
Вариант 2: ФЭ + Ветер + АКБ (30 кВт·ч) + Дизель	20 кВт	2 × 3 кВт	8 кВт	30 кВт·ч	Нет	24 600	2 900	3 576,67	49 379	0,1127	0,1263
Вариант 3: ФЭ + Ветер + Дизель + Геотермия (АКБ 10 кВт·ч)	20 кВт	2 × 3 кВт	8 кВт	10 кВт·ч	Включена	30 400	3 190	3 856,67	57 033	0,1303	0,1705
Вариант 4: Полный гибрид (ФЭ + Ветер + АКБ30 + Дизель + Геотермия)	20 кВт	2 × 3 кВт	8 кВт	30 кВт·ч	Включена	36 000	3 210	3 876,67	63 437	0,1449	0,1764

чевые моделируемые параметры (мощность, КПД/СОР, стоимость) представлены в табл. 1, а полные технические характеристики приведены в табл. 2–6

Выбор компонентов и параметры модели. Мощность фотоэлектрического массива (20 кВт) и ветрогенераторов (2×3 кВт) была определена в ходе оптимизации с целью максимального использования высокого солнечного ($> 5,5$ кВт·ч/м²/день) и умеренного ветрового ресурса в локации г. Сальмия. Для аккумуляторного банка в базовом сценарии была выбрана ёмкость 30 кВт·ч, достаточная для обеспечения заданной надёжности системы (ВПН < 1 %). Дизельный генератор (8 кВт) выполняет роль гарантированного резерва.

В рамках работы ГТН моделируется не как источник энергии, а как высокоэффективная электрическая нагрузка с постоянным коэффициентом преобразования СОР = 4. Это допущение позволяет количественно оценить влияние внедрения энергоэффективных технологий на стороне потребителя на оптимальную конфигурацию системы генерации. Важным ограничением модели является то, что значение СОР = 4 принято в предположении корректной работы низкочастотного источника — грунтового теплообменника (вертикального или горизонтального типа), который является стандартным техническим решением для таких систем. Исследование не включает детальный гидрогеологический расчёт, оценку долгосрочной тепловой устойчивости грунта и анализ капитальных затрат на устройство самого теплообменника, что является обязательным этапом для практической реализации данного сценария.

Преобразователь мощности (10 кВт) обеспечивает сопряжение шин постоянного и переменного тока с учётом заложенных в модель КПД преобразования.

Методология моделирования и оптимизации в HOMER PRO

Программный комплекс HOMER PRO использует метод детерминированного почасового моделирования для оценки технико-экономических показателей системы. Для этого исходные среднемесячные климатические данные (солнечная радиация, скорость ветра) служат основой для генерации синтетического почасового ряда продолжительностью в один год (8760 ч), который сохраняет статистические свойства исходных данных, включая сезонные и суточные колебания, а также случайную составляющую.

Для каждого часа моделирования последовательно решается уравнение баланса мощности с учётом:

- текущих значений возобновляемых ресурсов;
- заданного почасового профиля энергопотребления (см. рис. 4);
- текущего состояния заряда аккумуляторов;
- заданной стратегии диспетчеризации (приоритет ВИЭ).

На основе результатов годового моделирования рассчитываются интегральные показатели: выработка по источникам, расход топлива, коэффициент использования установленной мощности, вероятность потери нагрузки и экономические критерии — чистая приведённая стоимость и средняя приведённая стоимость энергии.

Процесс оптимизации заключается в автоматизированном переборе тысяч возможных конфигураций системы (вариации мощности ФЭ, ВЭУ,

Таблица 2. Технические характеристики ветряной турбины, используемой в предлагаемой гибридной системе
Table 2. Technical features of the wind turbine used in the proposed hybrid system

Параметр	Значение	Примечания
Модель турбины	SW whisper 500 (3 кВт)	Рекомендуемая модель для района г. Сальмия
Диапазон скорости ветра, м/с	6,17 – 6,73	Средняя скорость ветра для летнего сезона
Ежемесячная выработка, кВт·ч/день	25 – 35	Выработка на основе предполагаемой скорости ветра в г. Сальмия
Июнь – август, кВт·ч/день	25 – 35	Летний период (июнь – август)
Сентябрь – ноябрь, кВт·ч/день	18 – 22	Осенне-зимний период (сентябрь – ноябрь)
Декабрь – май, кВт·ч/день	15 – 22	Зимний период (декабрь – май)
Срок службы панели, лет	20	Ожидаемая продолжительность эксплуатации

Таблица 3. Технические характеристики солнечных панелей, используемых в предлагаемой гибридной системе
Table 3. Technical features of the solar panels used in the proposed hybrid system

Параметр	Значение	Примечания
Модель солнечных панелей	Солнечные панели (20 кВт)	Мощность 20 кВт для центра
Тип панели	Стационарные панели (не следят за солнцем)	Панели не следят за солнцем
Мощность панели, кВт	20	Солнечные панели мощностью 10 кВт
Среднегодовая суточная инсоляция, кВт·ч/м²/день	5,5	Среднее значение солнечной радиации для г. Сальмия
Срок службы солнечной системы, лет	20	Ожидаемая продолжительность эксплуатации

Таблица 4. Технические характеристики дизель-генератора, используемого в предлагаемой гибридной системе
Table 4. Technical features of the diesel generator used in the proposed hybrid system

Параметр	Значение	Примечания
Модель генератора	Дизельный генератор 8 кВт	Модель для работы с нагрузками до 10 кВт
Мощность генератора, кВт	8	Максимальная мощность генератора
Коэффициент загрузки	0,3	Коэффициент загрузки — 30 % от номинала
Максимальный расход топлива, л/ч	5	Расход топлива в час при полной нагрузке
Срок службы дизельного генератора, лет	15	Ожидаемая продолжительность эксплуатации

Таблица 5. Технические характеристики геотермального теплового насоса, используемого в предлагаемой гибридной системе

Table 5. Technical features of the geothermal heat pump used in the proposed hybrid system

Параметр	Значение	Примечания
Модель теплового насоса	Геотермальный тепловой насос	Мощность 5 кВт для обеспечения горячей воды
Тип насоса	Геотермальный (вертикальный)	Тепловой насос вертикального типа для глубины до 200 м
Мощность теплового насоса (кВт)	5	COP (эффективность) теплового насоса
Коэффициент производительности (COP)	4	Расходы на энергию для работы насоса
Срок службы теплового насоса, лет	20	Продолжительность эксплуатации системы
Ежемесячная выработка горячей воды, л	4 000	Производство горячей воды в месяц

Таблица 6. Технические характеристики аккумуляторных батарей, используемых в предлагаемой гибридной системе
Table 6. Technical features of the batteries used in the proposed hybrid system

Параметр	Значение	Примечания
Модель батареи	Литиевые аккумуляторы	Мощность 5 кВт·ч для системы
Тип батареи	Литий – ион	Тип батареи для солнечных и ветряных систем
Номинальное напряжение, В	12	12 В, соответствуют стандартам системы
Срок службы батареи, лет	10	Ожидаемый срок службы батареи

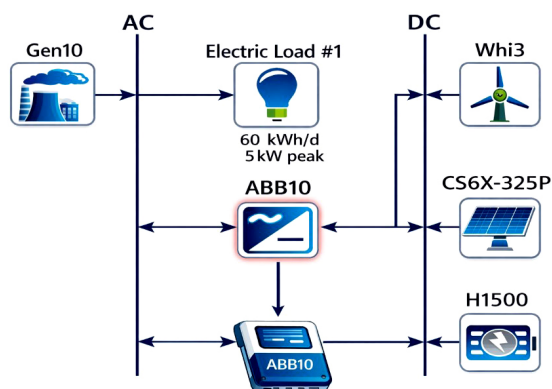


Рис. 5. Элементы гибридной системы
Fig. 5. Elements of the hybrid system

ёмкости АКБ, мощности ДГ). Для каждой конфигурации выполняется почасовое моделирование, и вариант с минимальной ЧПС (или СПСЭ) при соблюдении заданного ограничения по надёжности (СПСЭ) признаётся оптимальным. Таким образом, HOMER PRO выполняет именно математическую оптимизацию на основе детального динамического моделирования, а не простой сравнительный анализ заранее заданных вариантов.

На рис. 5 представлены компоненты гибридной системы, смоделированные с использованием программы HOMER PRO для региона с условиями, близкими к сирийским реалиям.

Данные о скорости ветра, солнечной радиации и технические характеристики компонентов системы передаются в программное обеспечение HOMER PRO. Было проведено несколько симуляций, чтобы получить оптимальную гибридную систему и определить надлежащую подачу электроэнергии, которая удовлетворяет требуемой нагрузке по максимально низкой цене. В табл. 1 приведена краткая информация о каждой разновидности системы, включая значение мощности фотоэлектрических, ветряных турбогенераторов, обычных дизельных генераторов и аккумуляторов, а также величину начального капитала, эксплуатационные расходы и чистую приведённую стоимость.

На основе описанного подхода были смоделированы два сценария для теплоснабжения:

- базовый сценарий (варианты 1 и 2): потребность в горячей воде удовлетворяется за счёт электрической нагрузки, уже учтённой в общем профиле (60 кВт·ч/день);

- сценарий с ГТН (варианты 3 и 4): Часть этой электрической нагрузки замещается нагрузкой от геотермального теплового насоса с $COP = 4$. Это приводит к изменению общего профиля потребления — снижается пиковая мощность и среднесуточное энергопотребление, связанное с нагревом воды, что влияет на оптимальную ёмкость аккумуляторов (см. табл. 1);

- сравнительный анализ (табл. 1) наглядно демонстрирует экономическое преимущество гибридных систем. Несмотря на то, что первоначальные капитальные затраты базового гибридного варианта (ФЭ + АКБ + ДГ) примерно в 3,7 раза выше, чем у варианта с одним дизельным генератором, резкое снижение расходов на топливо и эксплуатацию приводит к значительному падению стоимости энергии (СПСЭ) с 0,183 до 0,1027 USD/кВт·ч, что

соответствует экономии в 44 %. Данная конфигурация также обеспечивает более надёжное энергообеспечение.

Последующие добавления (ветротурбины, геотермальный насос) повышают долю ВИЭ и устойчивость системы, особенно в зимний период при повышенной нагрузке, что отражается в данных для января, однако ведут к увеличению капитальных затрат и, как следствие, к увеличению СПСЭ.

Результаты анализа показали, что базовая конфигурация с ФЭ + АКБ 30 кВт·ч + дизельным генератором имеет минимальные начальные капитальные затраты порядка 18 600 USD и годовые эксплуатационные расходы 2 750 USD, что обеспечивает ЧПС затрат около 44 979 USD и СПСЭ на уровне 0,1027 USD/кВт·ч. Добавление ветряных турбин увеличивает начальные капитальные вложения до 24 600 USD и годовые расходы до 2 900 USD, при этом ЧПС возрастает до 49 379 USD, а СПСЭ достигает 0,1127 USD/кВт·ч, что свидетельствует об умеренном повышении экономической нагрузки при росте доли возобновляемых источников. Интеграция геотермальной тепловой помпы с малой батареей 10 кВт·ч приводит к увеличению начального капитала (IC) до 30 400 USD и годовых расходов до 3190 USD, что повышает ЧПС до 57 033 USD и СПСЭ до 0,1303 USD/кВт·ч, обеспечивая дополнительную энергетическую независимость и снижение потребления дизельного топлива в зимний период. Наиболее комплексный вариант с полным гибридом ФЭ + Ветер + АКБ 30 кВт·ч + дизель + геотермальная тепловая помпа характеризуется с начальным капиталом 36 000 USD, годовыми эксплуатационными расходами 3210 USD, ЧПС — 63 437 USD и СПСЭ — 0,1449 USD/кВт·ч, демонстрируя максимальную интеграцию возобновляемых источников при сохранении надёжности энергообеспечения.

Анализ экстремального пикового потребления в январе (80 кВт·ч/день) показал увеличение эксплуатационных расходов и ЧПС пропорционально росту нагрузки, что приводит к повышению СПСЭ на 8–12 % для каждой конфигурации.

Результаты показали, что вариант с использованием только дизельного генератора характеризуется минимальными первоначальными инвестициями в размере 5000 USD, однако высокие эксплуатационные расходы ($OC \approx 6413$ USD/год) и ЧПС $\approx 80\,181$ USD приводят к СПСЭ $\approx 0,183$ USD/кВт·ч. Гибридная система, несмотря на более высокие капитальные затраты ($IC \approx 18\,600$ USD), обеспечивает снижение годовых расходов до 2750 USD/год, уменьшение ЧПС до 44 979 USD и снижение СПСЭ до 0,1027 USD/кВт·ч. Период окупаемости для гибридной системы составил примерно 3,7 года, что подтверждает экономическую целесообразность инвестиций.

Экономическая целесообразность инвестиций подтверждается и сочетанием умеренных капитальных затрат, снижения потребления дизельного топлива, увеличения доли возобновляемой энергии и обеспечения надёжного электроснабжения центра в условиях пиковых нагрузок. Таким образом, оптимальным, с точки зрения баланса между стоимостью и надёжностью, является вариант с ФЭ + АКБ 30 кВт·ч + дизельным генератором, тогда как варианты с полной интеграцией возобновляемых источников и геотермальной тепловой помпой обеспечивают стратегические преимущества в плане энергетической независимости и экологической

устойчивости, несмотря на более высокие капитальные затраты.

Выводы

1. Проведённое моделирование в программной среде HOMER PRO Pro позволило определить оптимальную конфигурацию автономной гибридной энергосистемы для медицинского центра в г. Сальмия (Сирия), основанную на сочетании фотоэлектрических панелей (20 кВт), аккумуляторных батарей (30 кВт·ч) и дизельного генератора (8 кВт). Данная конфигурация обеспечивает минимальные приведённые затраты и надёжное электроснабжение при базовой суточной нагрузке 60 кВт·ч.

2. Для оптимальной конфигурации средняя стоимость энергии составляет 0,1027 USD/кВт·ч, что на 44 % ниже, чем у системы с изолированным дизельным генератором (0,183 USD/кВт·ч), при обеспечении высокого уровня надёжности (вероятность потери нагрузки менее 1 %).

3. Расчёт чистой приведённой стоимости (ЧПС $\approx$ 44 979 USD) и срока окупаемости (3,7 года) подтверждает экономическую эффективность гибридного решения по сравнению с традиционным.

4. Включение в систему ветровых турбин и ГТН увеличивает долю возобновляемой генерации до 70–75 % и повышает надёжность энергоснабжения в период высоких нагрузок (до 80 кВт·ч/сутки), однако ведёт к росту капитальных затрат. Моделирование сценария с ГТН, учтённым как высокоэффективная нагрузка (COP = 4), выявило стратегический компромисс: несмотря на рост СПСЭ на 16–35 %, появляется возможность снижения необходимой ёмкости аккумуляторного банка на 67 %, что оптимизирует архитектуру системы хранения энергии. Практическая реализация сценария с ГТН требует дополнительных гидрогеологических исследований для оценки потенциала грунтового теплообменника.

5. Разработанная методика сравнительного анализа конфигураций на основе критериев СПСЭ и ВПН, а также полученные количественные зависимости могут служить практическим ориентиром для предпроектных исследований автономных гибридных систем электроснабжения социальных объектов в удалённых регионах Ближнего Востока и территориях со сходными климатическими условиями.

Список источников / References

1. Kaabeche A., Ibtouen R. Techno-economic optimization of hybrid photovoltaic/wind/diesel/battery generation in a standalone power system. *Solar Energy*. 2014;103:171–182. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.02.017>.
2. Hafez O., Bhattacharya K. Optimal planning and design of a renewable energy based supply system for microgrids. *Renewable Energy*. 2012;45:7–15. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.087>.
3. López R. D., Aguado J. A. Power supply for rural health clinics in developing countries: A review of renewable energy solutions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015;44:949–962. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.030>.
4. Kusakana K. Optimal scheduling for distributed hybrid system with pumped hydro storage. *Energy Conversion and Management*. 2016;117:133–144. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.03.026>.
5. Khalid M., Savkin A. V. A method for short-term wind power prediction with multiple observation points. *Power Systems*,

IEEE Transactions. 2012;27(2):579–586. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2011.2170447>.

6. Sharma R., Kumar A., Sahoo S. K. Design and optimization of a standalone hybrid renewable energy system for a healthcare facility in a remote area. *Proc. Int. Conf. Innov. Energy Res.* 2018. P. 6586–6591. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.134>.

7. Al-Ghussain L., Darwish A., Abubaker A. M. [et al.]. An integrated photovoltaic/wind/biomass and hybrid energy system for energy generation in Syria. *Renewable Energy*. 2020;147:682–707. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.035>.

8. Sinha S., Chandel S. S. Review of software tools for hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;32:192–205. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.035>.

9. Ghribi D. A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV/wind system. *Energy Policy*. 2007;35(11):5708–5718. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.06.020>.

10. Baneshi M., Hadianfard F. Techno-economic feasibility of hybrid diesel/PV/wind/battery electricity generation systems for non-residential large electricity consumers under southern Iran climate conditions. *Energy Conversion and Management*. 2016;127:233–244. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.09.008>.

11. Allouhi A., Benzakour Amine M., Reisch C. Multi-objective optimization of solar energy systems for electricity and hot water generation in collective residential buildings considering the power-to-heat concept. *Applied Thermal Engineering*. 2023;230(1):120658. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120658>.

12. Nikhilesh J., Singh S. B. HOMER Pro based: A real time case study on optimization and simulation of hybrid energy system at NIT Kurukshetra and the effect on the environment. *First IEEE International Conference on Measurement, Instrumentation, Control and Automation (ICMICA)*. 2020. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICMICA48462.2020.9242814>.

13. Григораш О. В., Оськин С. В., Денисенко Е. А., Харченко Д. П. Способы оптимизации структурно-схемных решений ветро-солнечных электростанций // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2023. Т. 23, № 3. С. 34–40. <https://doi.org/10.14529/power230303>. EDN: CBKTQQ.

Grigorash O. V., Oskin S. V., Denisenko E. A., Kharchenko D. P. Optimizing the structure and circuits of wind and solar power plants. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2023;23(3):34–40. <https://doi.org/10.14529/power230303>. EDN: CBKTQQ. (In Russ.).

14. Xin Z., Dong X., Xie X. Multi-energy hybrid power generation system based on constant power control. *IEEE 8th International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP)*. China, 2019. P. 745–749. <https://doi.org/10.1109/APAP47170.2019.9225178>.

15. Шарипова Ш. М., Кенжаев И. У. Состояние и перспективы инвестирования в возобновляемые источники электроэнергии: опыт зарубежных стран // Вестник ТГУПБП. 2024. № 1 (98). С. 130–140. <https://doi.org/10.24412/3005-8023-2024-1-130-140>. EDN: ZWVWXM.

Sharipova Sh. M., Kenjaev I. U. Condition and prospects of investment in renewable sources of electricity: experience of foreign countries. *Bulletin TSULBP*. 2024;1(98):130–140. <https://doi.org/10.24412/3005-8023-2024-1-130-140>. EDN: ZWVWXM. (In Russ.).

Вклад авторов:

Деев Али. Постановка целей и задач исследования, разработка концепции и методологии оптимизации гибридной энергосистемы, проведение численного моделирования в программном комплексе HOMER PRO, сбор и обработка исходных данных (климатические параметры, характеристики нагрузки), построение графиков и визуализация результатов, анализ и интерпретация полученных результатов,

написание основного текста статьи, подготовка выводов, редактирование и окончательная доработка текста.

А. Н. Дорошин. Научное руководство, определение общей структуры исследования, критический анализ результатов, проверка достоверности полученных данных, редактирование и рецензирование содержания, обеспечение научной строгости изложения, языковая и стилистическая правка.

Диб Мухаммад. Участие в проведении численного моделирования, помощь в сборе и обработке исходных данных, участие в построении графиков и визуализации результатов, участие в написании разделов, посвященных моделированию.

Authors' contribution:

Deeb Ali. Formulated the research goals and objectives, developed the hybrid system optimization concept and methodology, performed numerical modeling using the HOMER PRO software package, collected and processed input data (climatic parameters, load characteristics), generated plots and visualized results, analyzed and interpreted the obtained results, wrote the original draft of the manuscript, prepared the conclusions, edited and finalised the text.

Aleksandr N. Doroshin. Supervised the research, determined the overall study structure, critically analyzed the results, verified data validity, reviewed and edited the content, ensured scientific rigor of the presentation, performed language and stylistic proofreading.

Deeb Muhammad. Participated in numerical modeling, assisted in collecting and processing input data, contributed to plotting and visualization of results, participated in writing sections related to modeling.

Deeb Muhammad. Participated in numerical modeling, assisted in collecting and processing input data, contributed to plotting and visualization of results, participated in writing sections related to modeling.

Информация об авторах:

ДЕЕБ АЛИ, аспирант кафедры «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии» Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва.
e-mail: alideb20001@gmail.com

ДОРОШИН Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии» Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва.

SPIN-код: 1078-8914

AuthorID (РИНЦ): 751790

e-mail: DoroshinAN@mpei.ru

ДИБ МУХАММАД, кандидат технических наук, ассистент кафедры «Электромеханика, электрические и электронные аппараты» Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва.

AuthorID (SCOPUS): 57216623195

e-mail: muhamaddeeb002@gmail.com

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Статья поступила в редакцию 16.06.2025; одобрена после рецензирования 18.02.2026; принята к публикации 06.03.2026.

Information about the authors:

DEEB ALI, Postgraduate of the Hydropower and Renewable Energy Department, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow.

e-mail: alideb20001@gmail.com

DOROSHIN Aleksandr Nikolayevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Hydropower and Renewable Energy Department, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow.

SPIN-code: 1078-8914

AuthorID (RSCI): 751790

e-mail: DoroshinAN@mpei.ru

DEEB MUHAMMAD, Candidate of Technical Sciences, Assistant of the Electromechanics, Electrical and Electronic Apparatuses Department, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow.

AuthorID (SCOPUS): 57216623195

e-mail: muhamaddeeb002@gmail.com

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The authors have read and approved the final manuscript.

The article was submitted 16.06.2025; approved after reviewing 18.02.2026; accepted for publication 06.03.2026.