

## ЭНЕРГЕТИКА ЗАРУБЕЖНЫХ СТРАН

<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2020-13-4-296-303>  
УДК 621.311.22:620.92

# Сравнительная технико-экономическая оценка работы гибридной гелио-геотермальной электростанции в условиях Эфиопии

Гемечу Б. Д., Орлов М. Е.\*

ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет»  
ул. Северный Венец, 32, 432027, г. Ульяновск, Россия

Поступила / Received 10.09.2020

Принята к печати / Accepted for publication 23.10.2020

Представлена технико-экономическая оценка гибридной гелио-геотермальной электростанции, которая смоделирована с учетом имеющихся геотермальных и солнечных энергетических ресурсов энергии на геотермальном месторождении Тендахо-1 (Дубти) в Эфиопии. Гибридная электростанция объединяет в себе геотермальную электростанцию одноступенчатого разделения пара с концентрированной гелиотермальной установкой с параболическим концентратором для повышения уровня энергии геотермального пара. При моделировании гибридной электростанции используется геотермальная жидкость, поступающая из эксплуатационных скважин геотермального поля, и прямое нормальное солнечное излучение на геотермальном месторождении. Выполнен термодинамический анализ, основанный на принципах сохранения массы и энергии, а также произведены расчеты качественного показателя работы гибридной электростанции, позволяющего оценить ее энергетическую и экономическую эффективность в заданных условиях геотермального поля Тендахо. Оценка технико-экономической эффективности определена путем сравнения двух технологий, а именно: гибридной гелио-геотермальной электростанции и энергосистемы из двух автономных геотермальной и солнечной электростанций. Результаты этой показали, что при одинаковом количестве энергозатрат, в зависимости от имеющейся емкости хранения тепловой энергии, гибридная электростанция вырабатывает до 10,4% больше годовой электроэнергии, при этом чистый дисконтированный доход выше, а себестоимость электроэнергии ниже, чем для энергосистемы из двух автономных электростанций. Дополнительно выполнен расчет экономического качественного показателя, значения которого для гибридных электростанций с тепловым аккумулятором и без него составляют 2,62 и 3,42, т. е. стоимость солнечного ресурса на производство 1 кВт·ч электроэнергии в гибридной энергетической системе меньше на 70,5% и 61,5% соответственно.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** геотермальная энергия, солнечная энергия, гибридная гелио-геотермальная электростанция, термодинамический анализ, чистый дисконтированный доход, себестоимость, качественный показатель

### Адрес для переписки:

Орлов М. Е.  
ФГБОУ ВО «УлГТУ», кафедра ТГВ  
ул. Северный Венец, 32, 432027, г. Ульяновск, Россия  
e-mail: mi5h@mail.ru

### Address for correspondence:

Orlov M. E.  
Ulyanovsk State Technical University, Department TGV  
Severnij Venets str., 32, 432027, Ulyanovsk, Russia  
e-mail: mi5h@mail.ru

### Для цитирования:

Гемечу Б. Д., Орлов М. Е. Сравнительная технико-экономическая оценка работы гибридной гелио-геотермальной электростанции в условиях Эфиопии 2020. – Т. 13, №4. – С. 296–303.  
<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2020-13-4-296-303>

### For citation:

Gemechu B. D., Orlov M. E. [Comparative technical and economic study of Hybrid Solar-Geothermal Power Plant in Ethiopia]. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry*. 2020. vol. 13, no. 4, pp. 296–303 (in Russian).  
<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2020-13-4-296-303>

# Comparative technical and economic study of Hybrid Solar-Geothermal Power Plant in Ethiopia

**Gemetchu B. D., Orlov M. E.\***

*Ulyanovsk State Technical University*

*32 Severniy Venets str., 432027, Ulyanovsk, Russia*

This paper presents a techno-economic assessment of a hybrid solar-geothermal power plant that is modelled taking into account the available geothermal and solar energy resources at the Tendaho-1 (Dubti) geothermal field in Ethiopia. The hybrid power plant combines a single-flash geothermal power plant with a parabolic trough solar thermal plant to increase the energy level of geothermal steam. The geothermal fluid from one of the production wells at the geothermal site and the direct normal solar irradiance prevailing in the area offer the primary sources of energy used in the modelling. A thermodynamic analysis based on the principles of mass and energy conservation and a figure of merit analysis that allows evaluating the energy and economic performance of the hybrid power plant were performed. The technical and economic efficiency assessment was performed by comparing the performances of the hybrid power plant with a power system consisting of stand-alone geothermal and solar power plants. Results of the techno-economic assessment showed that for the same amount of energy inputs, depending on the available thermal energy storage capacity, a hybrid power plant generates up to 10.4% more electricity than a power system of two stand-alone power plants while generating a higher net present value at a lower cost of generation. In addition, the hybrid power plants with and without thermal storage system exhibit an economic figure of merit values of 2.62 and 3.42, i.e. the cost of solar resource per kWh of electricity in the hybrid energy system is reduced by 70.5% and 61.5%, respectively.

**KEYWORDS:** Geothermal Energy, Solar energy, Hybrid solar-geothermal power plant, Thermodynamic analysis, Net present value, Cost of generation, Figure of merit

## Введение

Постоянно растущий спрос на энергию в сочетании с недоиспользованием ресурсов и сезонным характером осадков и засухи, с которыми Эфиопия сталкивается в течение многих лет, требует изменения подходов в обеспечении энергобезопасности страны и отказа от доминирования гидроэнергетики в пользу разработки других возобновляемых источников энергии. Среди инициатив, принятых во внимание в этом направлении, является развитие геотермальной и солнечной энергетики. Эфиопский сектор Восточно-африканской рифтовой системы, разделяющий страну на две половины, считается богатым многими энергетическими ресурсами, среди которых основными являются геотермальная и солнечная энергия. Геотермальный энергетический потенциал рифтовой системы оценивается 10 ГВт, а большая часть этого района получает среднегодовое прямое нормальное солнечное излучение 4 кВт·ч/(м<sup>2</sup>сут) [1]. Однако использование местных энергоресурсов до сих пор ограничивалось мощностью одной геотермальной электростанции 7 МВт, что составляет менее 1% потенциала [1].

Целью исследования являлась оценка технической и экономической эффективности гибридной электростанции (ГБЭС), которая сочетает использование солнечных и геотермальных энергетических ресурсов, имеющихся на геотермальном месторождении Тендахо-1 (Дубти) в Эфиопии.

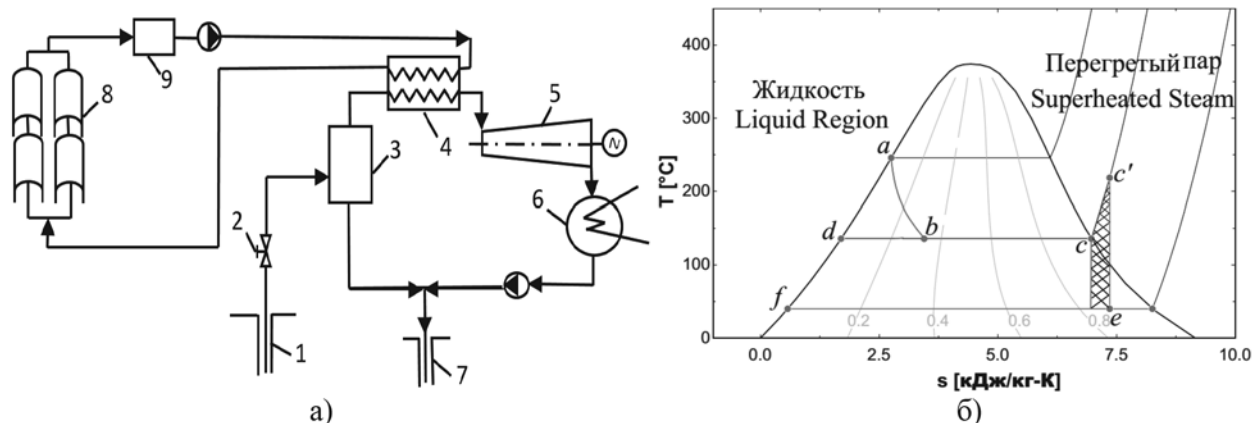
Для оценки технико-экономической эффективности гибридной электростанции сравниваются две технологии. В первой технологии геотермальная и солнеч-

ная энергия используются комбинированно в единой ГБЭС. В этой системе геотермальный пар перегревается до максимально возможной энтальпии в зависимости от количества тепловой энергии, поступающей от гелиотермальной установки, и расширяется в турбине. Вторая технология предусматривает независимое использование геотермальной и солнечной энергии для выработки электроэнергии. В этой системе электроэнергия вырабатывается двумя автономными электростанциями и подается в единую электрическую сеть от каждой электростанции.

При оценке экономической эффективности новых технологий гибридных электростанций в качестве одного из основных критериев используется чистый дисконтированный доход, поскольку позволяет оценить ожидаемую максимальную доходность проекта. В дополнение к чистому дисконтированному доходу при технико-экономическом анализе определены внутренняя норма доходности, срок окупаемости и экономический качественный показатель.

## Методика выполнения технико-экономического анализа

Технико-экономический анализ проведен на основе концепции гибридной гелио-геотермальной электростанции, разработанной в Ульяновском государственном техническом университете [2]. Принципиальная технологическая схема гибридной гелио-геотермальной станции с солнечным перегревом пара показана на рисунке 1 [3, 4]. Гибридная энергоустановка объединяет в себе геотермальную электростанцию с одно-



**Рисунок 1.** Принципиальная схема (а) и T-s диаграмма цикла (б) гибридной гелио-геотермальной электростанции: 1 — эксплуатационная скважина; 2 — дроссельный клапан; 3 — сепаратор; 4 — теплообменник; 5 — турбина; 6 — конденсатор; 7 — нагнетательная скважина; 8 — коллекторы; 9 — аккумулятор; а — параметры при давлении в устье скважины; б — параметры на входе в сепаратор; с — параметры на входе в теплообменник; с' — параметры на входе в турбину; d — параметры при давлении разделения и  $x = 0$ ; e — параметры при идеальной энтальпии отработанного пара; f — параметры на выходе из конденсатора

**Figure 1.** Schematic diagram (a) and T-s diagram (b) of hybrid solar-geothermal power plant: 1 — Production well; 2 — Throttling valve; 3 — Separator; 4 — Heat exchanger; 5 — Turbine; 6 — Condenser; 7 — Injection well; 8 — Collectors; 9 — Thermal Energy Storage (TES); a — parameter at well-head; b — parameter at separator entry point; c — parameter at heat exchanger entry point; c' — turbine entry point; d — parameter at separation pressure and  $x = 0$ ; e — parameter at ideal enthalpy of exhaust steam; f — parameter at exit of condenser

ступенчатым разделением пара и гелиотермальную установку, включающую в себя перегреватель (или солнечный теплообменник), солнечный коллектор, аккумулятор для хранения и циркуляционный насос.

В представленной на рисунке 1 ГБЭС геотермальная жидкость направляется в сепаратор, где пар отделяется от насыщенной геотермальной жидкости, далее разделенный пар попадает в блок пароперегревателя, где его температура дополнительно повышается за счет солнечной энергии. Затем теплота преобразуется, по мере расширения пара в турбинной установке, в механическую работу и далее — в электричество. Отработавший в турбине пар конденсируется при помощи воздушно-охлаждаемого конденсатора, и потом конденсат направляется в нагнетательную скважину. В отличие от других паровых электростанций, геотермальная жидкость, которая используется в гибридной электростанции, проходит процесс незамкнутого цикла.

Рассмотренная в этом исследовании гелиотермальная установка состоит из параболических коллекторов, аккумулятора тепловой энергии, питательного насоса и основных компонентов паровой электростанции: испарителя/теплообменника, турбины, конденсатора и питательного насоса. Оптимизация системы гелиотермальной установки проведена с использованием компьютерной программы System Advisor Model (SAM), разработанной Национальной лабораторией возобновляемых источников энергии (США).

Тепловая мощность  $Q_{сл}$ , кВт, получаемая от гелиотермальной установки [5, 6], рассчитывается по формуле

$$Q_{сл} = S_{кл} (I_b \eta_{оп} \cos(\varphi) - q), \quad (1)$$

где  $S_{кл}$  — общая площадь солнечных коллекторов, м<sup>2</sup>;  $I_b$  — прямое перпендикулярное солнечное излучение,

кВт/м<sup>2</sup>;  $\eta_{оп}$  — оптическая эффективность солнечного поля;  $\varphi$  — угол падения солнечного излучения ( $\varphi = 0$ );  $q$  — общие теплотери в окружающую среду на м<sup>2</sup> общей площади коллектора, кВт/м<sup>2</sup>.

Таким образом, мощность турбины  $N_{сл}$ , кВт, вырабатываемая концентраторной солнечной электростанцией, определяется по формуле

$$N_{сл} = S_{сл} (I_b \eta_{оп} \cos(\varphi) - q) \eta_{сл}, \quad (2)$$

где  $\eta_{сл}$  — номинальный КПД силового цикла гелиоэлектростанции.

Основные исходные данные, используемые в расчетах гелиотермальной электростанции, представлены в таблице 1.

Энтальпия пара  $i_{d'}$ , кДж/кг на входе в турбину в гибридной системе после добавления солнечной тепло-

**Таблица 1.** Основные исходные данные для моделирования гелиоэлектростанции

**Table 1.** Main input data for modeling the concentrated solar power system

Параметры Parameters	Значения Values
Прямое солнечное излучение на Тендахо-1, кВт·ч/(м <sup>2</sup> сут) Direct Normal Irradiance at Tendaho-1, kWh/(m <sup>2</sup> day)	6,33
Тип коллекторов Collectors type	EuroTough ET150
Оптическая эффективность солнечного поля Optical efficiency of the solar filed	0,767705
Номинальный КПД паросилового блока Power cycle efficiency	0,3774

ты в теплообменнике определяется по формуле:

$$i_{4'} = i_4 + Q_{сл} / D_n, \quad (3)$$

где  $i_4$  — энтальпия пара после сепаратора,  $i_4 = 2738$  кДж/кг;  $D_n$  — расход пара, разделенного в сепараторе,  $D_n = 10,93$  кг/с;  $Q_{сл}$  — тепловая мощность, добавляемая в гибридную систему от солнечной тепло-энергетической установки, кВт.

Мощность турбины гибридной гелио-геотермальной электростанции  $N_{гб}$ , кВт рассчитывается по формуле:

$$N_{гб} = D_n (i_{4'} - i_i) \eta_{эм}, \quad (4)$$

где  $i_i$  — энтальпия отработавшего пара на выходе из турбины, кДж/кг;  $\eta_{эм}$  — электромеханический КПД турбогенератора,  $\eta_{эм} = 0,98$ .

Качественный показатель — это отношение выходной мощности гибридной электростанции к сумме выходных мощностей двух автономных электростанций [7]:

$$F_{тех} = N_{гб} / (N_{гео} + N_{сл}). \quad (5)$$

Этот показатель рассчитывается для того, чтобы оценить потенциал производства электроэнергии на гибридной электростанции по сравнению с двумя автономными электростанциями. При значении  $F_{тех} > 1$  мощность гибридной электростанции больше, чем суммарная мощность автономных гелио- и геотермальной электростанций.

Капиталовложения в гибридную электростанцию  $K_{инв,гб}$  долл. представляют сумму капиталовложений в геотермальную электростанцию и гелиотермальную установку без учета стоимости энергоблока и затрат, связанных с установкой энергоблока, математически определяются по формуле:

$$K_{инв,гб} = K_{инв,гео} + K_{инв,гелио}, \quad (6)$$

где  $K_{инв,гео}$  — капиталовложения в геотермальную электростанцию, долл.;  $K_{инв,гелио}$  — капиталовложения в гелиотермальную установку, долл.

Капитальные вложения в геотермальную электростанцию  $K_{инв,гео}$  долл. определяется по формуле

$$K_{инв,гео} = K_p + K_n + K_{ск} + K_{эс}, \quad (7)$$

где  $K_p$  — затраты на разведку геотермальных ресурсов, долл.;  $K_n$  — затраты на подтверждение ресурсов долл.;  $K_{ск}$  — затраты бурение скважины, долл.;  $K_{эс}$  — затраты на электростанцию, долл.

Развитие геотермальной энергетики начинается с разведки геотермальных ресурсов. В результате исследований, опубликованных в открытых источниках, установлено, что затраты на геологоразведку геотермальных ресурсов находятся в диапазоне от 30,44 \$/кВт до 376,18 \$/кВт при среднем значении 154,7 \$/кВт [8]. Перед бурением эксплуатационных скважин необходимо подтвердить наличие геотермальных

ресурсов для выработки около 25% планируемой установленной мощности. Таким образом, затраты на подтверждение наличия геотермальных ресурсов состоят из затрат на бурение, испытание и администрирование с учетом коэффициента успешности бурения на этом этапе 0,6 [8].

Затраты на бурение скважин для эксплуатации рассчитывается, учитывая коэффициент успешности бурения на этом этапе 0,8 и отношение нагнетательной к эксплуатационной скважине 0,5. Стоимость бурения неуспешной скважины принимается равной половине затрат на бурение успешных скважин с учетом прекращения бурения на середине процесса. Для того чтобы уменьшить затраты успешные скважины, пробуренные на стадии подтверждения, используются в качестве эксплуатационных скважин. Хотя стоимость бурения варьируется в зависимости от местоположения, характера подземного объекта и типа требуемой скважины, в большинстве случаев она зависит от глубины скважины. Глубина скважин при освоении геотермальной энергии обычно составляет от 1,5 до 3 км, в среднем около 2 км [9]. В этом исследовании при определении стоимости бурения скважины также рассматривается скважина глубиной 2 км. Таким образом, средняя стоимость бурения одной скважины составляет около 3,94 млн долларов. В затраты на строительство электростанции включаются затраты на монтаж системы сбора пара и установку турбогенератора. Недавний опыт Кеннийского развития геотермальной энергетики показывает, что средние затраты на сбор пара и строительство электростанций оцениваются в 1667 \$/кВт [10].

Капитальные затраты в солнечную энергоустановку включают в себя затраты на подготовку солнечного поля, солнечные коллекторы, установку высокотемпературного теплоносителя и солнечный аккумулятор и рассчитываются по формуле:

$$K_{инв,гелио} = S_{кл} (\bar{c}_{зм} + \bar{c}_{ск} + \bar{c}_{итф}) + \bar{c}_{хр} \cdot Q_{сл} \cdot Z, \quad (8)$$

где  $\bar{c}_{зм}$  — удельные затраты на земляные работы на участке гелиоколлекторов,  $\approx 25$  \$/м<sup>2</sup>;  $\bar{c}_{ск}$  — удельные затраты на гелиоколлекторы,  $\approx 150$  \$/м<sup>2</sup>;  $\bar{c}_{итф}$  — удельные затраты на установку высокотемпературного теплоносителя,  $\approx 60$  \$/м<sup>2</sup>;  $\bar{c}_{хр}$  — удельные затраты на систему хранения тепловой энергии,  $\approx 62$  \$/МВт·ч;  $Z$  — часы накопления тепловой энергии.

Годовые эксплуатационные расходы гибридной электростанции,  $C_{гб}$ , \$/год, определяются по формуле:

$$C_{гб} = C_{гео} + C_{гелио} + C_{пс}, \quad (9)$$

где  $C_{гео}$  и  $C_{гелио}$  — эксплуатационные расходы геотермальной и гелиотермальной установки соответственно, \$/год;  $C_{пс}$  — годовые затраты на бурение подпиточной скважины, \$/год.

Производительность большинства геотермальных скважин снижается плавно по закону гармонических колебаний из-за падения давления и/или температуры в природном резервуаре. Обычно 3% [11] среднего

годового снижения производительности учитывается при расчете количества дополнительных подпиточных скважин, необходимых для компенсации падения производительности. Бурение дополнительных скважин, как правило, рентабельно не позднее, чем за пять лет до конца жизни проекта, потому что бурение скважин после этого времени не имеет существенного экономического значения. Таким образом, затраты на бурение подпиточной скважины  $C_{dc}$ , \$/год определяются по формуле:

$$C_{dc} = \left( R / \left( 1 - (1 + R)^{-T} \right) \right) \cdot \sum_{t=1}^{T-5} \left( \bar{c}_{ck} \cdot n_{dc,t} / (1 + R)^t \right), \quad (10)$$

где  $n_{dc,t}$  — количество дополнительных скважин, необходимых в конце  $t$ -го года;  $\bar{c}_{ck}$  — удельная стоимость бурения скважины, мил. долл./скважина;  $t$  — рассматриваемый период времени, год;  $T$  — срок жизни проекта, лет;  $R$  — ставка (норма) дисконта.

При расчете годовой выработки электроэнергии гибридной электростанцией учитывается, что при отсутствии потока тепловой энергии от солнечной системы теплоснабжения электроэнергия, вырабатываемая гибридной электростанцией, будет равна электроэнергии, вырабатываемой геотермальной электростанцией. Таким образом, выработка электроэнергии  $\mathcal{E}_t$ , кВт·ч/год в конце  $t$ -го года рассчитывается по формуле:

$$\mathcal{E}_t = \sum_{\substack{1 \leq t \leq h \\ Q_{th} > 0}} N_{z6} + M_{z60} \cdot \sum_{\substack{1 \leq t \leq h \\ Q_{th} > 0}} N_{z60}, \quad (11)$$

где  $M_{z60}$  — коэффициент использования установленной мощности геотермальной электростанции;  $h$  — число часов работы турбоагрегатов в течение года,  $h = 8760$  ч/год;

Чистый дисконтированный доход ( $NPV$ ) и срок окупаемости являются критериями, используемыми при оценке экономических показателей гибридной геотермальной электростанции. Чистый дисконтированный доход для однократного вложения инвестиций рассчитывается по формуле:

$$NPV = \sum_{t=1}^T \frac{\Pi_t}{(1 + R)^t} - K_{инв}, \quad (12)$$

где  $t$  — рассматриваемый период времени, лет;  $T$  — срок жизни проекта, 30 лет;  $R$  — ставка (норма) дисконта, равна 10%;  $K_{инв}$  — капиталовложения, долл.;  $\Pi_t$  — поступления денежных средств в конце периода  $t$ , долл., которые определяются по формуле:

$$\Pi_{z6,t} = S_{z3} \times \mathcal{E}_{z6,t} - C_{z6,t} - H_n, \quad (13)$$

где  $S_{z3}$  — тариф на электроэнергию, \$/кВт·ч;  $\mathcal{E}_{z6,t}$  — годовая выработка электроэнергии, кВт·ч;  $C_{z6,t}$  — годовые эксплуатационные расходы гибридной электростанции в  $t$ -й год;  $H_n$  — налог на прибыль, \$/год. В соответствии с федеральной декларацией о подоходном налоге Эфиопии № 979/2016 при определении налогооблагаемой прибыли проекта допускается вычет сум-

мы, на которую амортизируемые активы уменьшались в стоимости в течение жизни проекта. Закон устанавливает ставку федерального налога в размере 25% от налогооблагаемого дохода. Поэтому налог на прибыль,  $H_n$ , долл./год., рассчитывается:

$$H_n = 0,25 \cdot \left( (S_{z3} \times \mathcal{E}_{t,z6} - C_{z6}) - C_{ам} \right), \quad (14)$$

где  $C_{мп}$  — годовое амортизационное отчисление, долл./год. Согласно Федеральному постановлению Эфиопии о подоходном налоге № 979/2016 и постановлению Совета министров Эфиопии № 407/2017 норма амортизации составляет 25% по прямолинейному методу.

Другим показателем экономической эффективности гибридной электростанции является экономический качественный показатель — отношение удельных капиталовложений для автономной геотермальной электростанции к удельным капиталовложениям для используемой солнечной энергии на гибридной электростанции. Экономический качественный показатель  $F_{eco}$  рассчитывается по формуле:

$$F_{eco} = \frac{K_{гелио} (N_{z6} - N_{z60})}{N_{сл} (K_{z6} - K_{z60})}, \quad (15)$$

где  $K_{гелио}$ ,  $K_{z60}$  и  $K_{z6}$  — капиталовложения геотермальной и гибридной электростанций соответственно, долл.

Основные исходные данные для технико-экономического расчета приведены в таблице 2.

## Результаты и обсуждения

Оценка энергоэффективности для данного условия геотермального поля показывает, что одна скважина на геотермальном месторождении Тендахо имеет потенциал генерации 5116 кВт с массовым расходом

**Таблица 2.** Основные исходные данные для технико-экономического расчета

**Table 2.** Major input data for techno-economic analysis

Параметры Parameters	Значения Values
Количество эксплуатационных скважин Total number of production wells	4
Тепловая мощность от одной скважины $Q_{сл}$ , кВт Thermal energy added per well, kW	5750
Емкость аккумулятора тепловой энергии, ч Thermal energy Storage capacity, h	6
Тариф на электроэнергию, долл./кВт·ч Tariff for electricity, \$/kWh	0,1
Ставка (норма) дисконта Discount rate	10%
Инфляция Inflation	12%
Срок жизни проекта, лет Project life, years	30

пара 10,93 кг/с. Фиксируя поток пара из одной геотермальной скважины и анализируя эффект добавления солнечной тепловой энергии, установлено, что электричество, генерируемое гибридной системой, увеличивается по мере увеличения тепловой энергии, используемой для перегрева пара. Увеличение выработки электроэнергии за каждой 1000 кВт тепловой энергии, добавленной в гибридной системе, составило около 411,3 кВт.

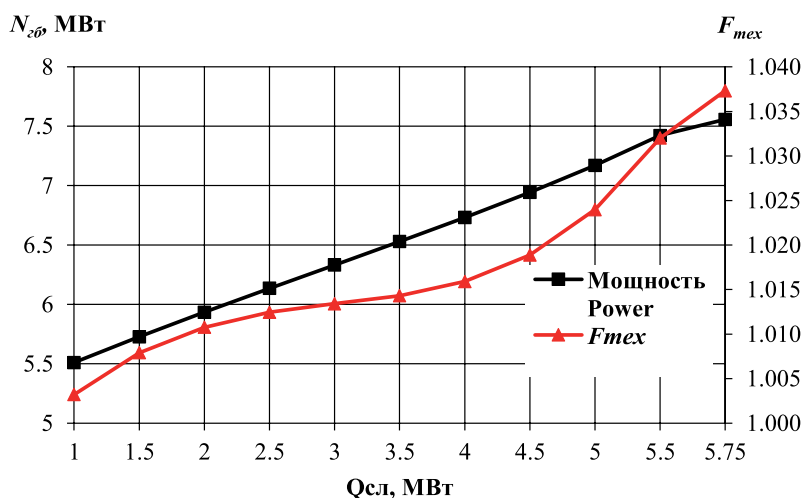
Как видно из графика на рисунке 2,  $F_{mex} > 1$ , в этом случае мощность гибридной электростанции больше, чем суммарная мощность автономных гелио- и геотермальной электростанций. Значение  $F_{mex}$  увеличивается по

мере увеличения тепловой мощности гелиоисточника. Максимальное значение технического качественного показателя, который составляет 1,037, наблюдалось при добавлении 5750 кВт тепловой мощность. Следовательно, при таком количестве добавления тепловой энергии турбина гибридной электростанции вырабатывает мощность на 3,7% больше, чем сумма мощностей двух автономных электростанций.

На рисунке 3 приведен график изменения чистого дисконтированного дохода гибридной электростанции в конце жизни проекта. Реализация проекта гибридной электростанции позволяет увеличить чистый дисконтированный доход по сравнению с энергосистемой, состоящей из двух автономных геотермальной и гелиотермальной электростанций. Как показано на графике, по сравнению с энергосистемой, состоящей из двух автономных электростанций, гибридная электростанция имеет более высокий показатель чистого дисконтированного дохода. Это объясняется меньшими капитальными и эксплуатационными затратами и более высокой эффективностью производства энергии в гибридной системе. При более низких затратах геотермальной и солнечной энергии (т. е. менее 22 кг/с пара и 12 МВт солнечной энергии) энергосистема, состоящая из двух автономных электростанций, экономически невыгодна.

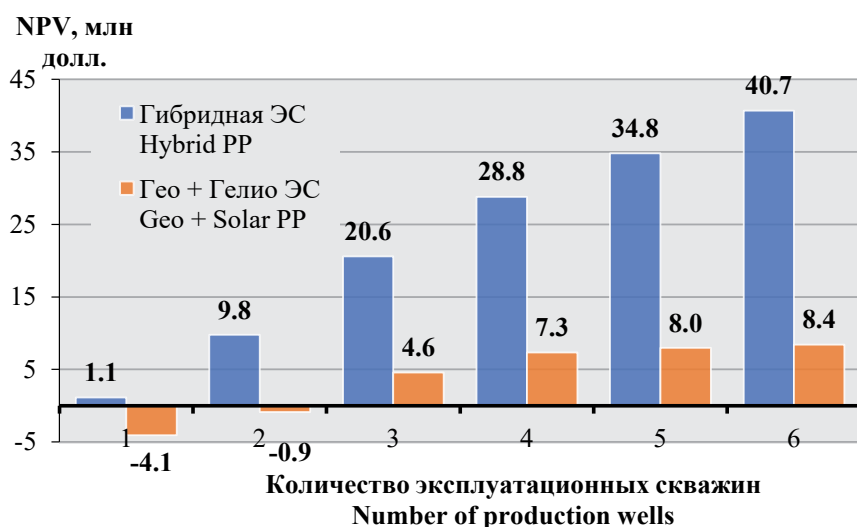
В таблице 3 представлены результаты технико-экономического анализа для гибридной электростанции и энергосистемы двух автономных электростанций. Таблица составлена при расходе пара 43,7 кг/с и солнечной энергии 23 МВт. В таблице 3 представлены технико-экономические показатели двух гибридных электростанций, первая из которых не имеет аккумулятора, а вторая имеет аккумулятор тепловой энергии с запасом мощности 6 часов. Хотя во втором случае капиталовложения и эксплуатационные расходы несколько увеличиваются, производительность электростанции улучшается благодаря наличию аккумулятора. Это ясно видно по снижению себестоимости и увеличению чистого дисконтированного дохода электростанций.

Годовая выработка электроэнергии, как показано в таблице 3, для гибридной электростанции с аккумулятором составляет 207,7 ГВт·ч, тогда как две автономные электростанции в комбинации вырабатывают 188,2 ГВт·ч электроэнергии. Это означает, что



**Рисунок 2.** Изменение мощности турбины и качественного показателя гибридной электростанции в зависимости от величины солнечной тепловой энергии, добавленной в гибридную установку

**Figure 2.** Change in turbine power output and figure of merit value of hybrid power plant with respect to increase in the solar thermal energy added to the hybrid power system



**Рисунок 3.** Чистый дисконтированный доход гибридной гелио-геотермальной электростанции в зависимости от количества эксплуатационных скважин

**Figure 3.** Net present value of the hybrid solar power plant with respect to the number of production wells

**Таблица 3.** Результаты расчета основных технико-экономических показателей электростанций

**Table 3.** Results of calculation of major techno-economic indicators of power plants

Наименование показателя Indicators	Без аккумулятора Without TES		С аккумулятором With TES	
	Гибридная ЭС Hybrid PP	Гео ЭС + Гелио ЭС GeoPP+ CSP	Гибридная ЭС Hybrid PP	Гео ЭС + Гелио ЭС GeoPP+ CSP
Мощность, МВт Power, MW	30,23	29,14	30,23	29,14
Выработка электроэнергии, ГВт*ч Electricity generated, GW*h	189,7	175,9	207,7	188,2
Капитальные затраты, млн долл. Capital cost, mill \$	76,8	87,79	85,36	97,2
NPV, млн долл. NPV, mill \$	26,1	8,7	28,8	7,3
Себестоимость, долл./кВт*ч Cost of generation, \$/kW*h	0,0575	0,0694	0,0568	0,0707
Экономический качественный показатель $F_{eco}$ Economic figure of merit	3,42	-	2,62	-
Срок окупаемости, лет Payback period, years	7	8	8	9

генерация электричества увеличилась на 10,4% за счет гибридизации. Хотя это увеличение уменьшается, когда аккумулятор тепловой энергии исключается из солнечной тепловой системы, при использовании гибридной электростанции годовая генерирующая мощность все же увеличивается на 7,8%, но при этом снижаются капитальные затраты.

Капитальные вложения в гибридные электростанции составили 85,36 и 78,6 млн долларов с аккумулятором тепловой энергии и без аккумулятора соответственно. По сравнению с аналогичными системами производства электроэнергии гибридные электростанции стоят меньше. Снижение капитальных затрат связано с устранением избыточных энергоблоков, которые потребовались бы на солнечных электростанциях.

Для гибридной электростанции без аккумулятора значение чистого дисконтированного дохода 26,1 млн долл., что меньше, чем для второй, при большей себестоимости электроэнергии 0,0575 \$/кВт\*ч. Вторая электростанция, а именно гибридная электростанция с аккумулятором, имеет более высокий чистый дисконтированный доход 28,8 млн долл. при более низкой себестоимости электроэнергии 0,0568 \$/кВт\*ч. Однако, как показано в таблице 3, капитальные затраты и срок окупаемости для второй гибридной электростанции также выше.

Экономический качественный показатель  $F_{eco}$  имеет значения 2,62 и 3,42 для гибридных электростанций с аккумулятором и без него соответственно, т. е. удельные капиталовложения на производство электроэнергии в гибридной энергосистеме меньше на 70,5% и 61,5% соответственно. Таким образом, независимо от использования аккумулятора себестоимость гене-

рации электроэнергии на гибридных электростанциях намного меньше, чем на автономных солнечных электростанциях.

## Выводы

1. Разработана концепция гибридной гелио-геотермальной электростанции, которая объединяет в себе геотермальную электростанцию с одноступенчатым разделением пара и гелиотермальную установку, включающую в себя перегреватель, солнечный коллектор, аккумулятор и циркуляционный насос.

2. Доказано, что комбинированное использование солнечной и геотермальной энергии в тепловой гелио-геотермальной электростанции позволяет существенно увеличить мощность гибридной энергетической системы.

3. Установлено, что при использовании гибридной гелио-геотермальной электростанции можно вырабатывать на 7,8% больше электроэнергии без

использования солнечного теплового аккумулятора и на 10,4% больше электроэнергии с использованием аккумулятора 6-часовой накопительной мощности по сравнению с выработкой двух независимых электростанций.

4. Указано, что интеграция геотермальных и солнечных источников энергии в концепцию гибридной электростанции значительно снижает себестоимость производства электроэнергии. Снижение себестоимости зависит от емкости аккумулятора солнечной тепловой энергии: чем больше емкость аккумулятора, тем больше снижается стоимость генерации.

5. В целом результаты технико-экономических расчетов показывают, что комбинированное использование энергоресурсов в гибридной гелио-геотермальной энергоустановке повышает энергетическую эффективность и экономическую рентабельность по сравнению с отдельным использованием солнечной и геотермальной энергии.

## Список использованных источников

- Гемечу Б. Д., Шарапов В. И. Перспективы использования природных энергетических ресурсов в эфиопии // Энергосбережение и водоподготовка 2018; 1(111): 33–37.
- Патент № 186091 (RU). МПК F24T 50/00. RU, Геотермальная энергетическая установка / В. И. Шарапов, Б. Д. Гемечу; заявл. 31.05.2018; опубл. 29.12.2018. Бюл. №1.
- Гемечу Б. Д., Шарапов В. И. Оценка энергетической эффективности гибридной гелио-геотермальной электростанции // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики 2019; 21(4): 3–11.
- Гемечу Б. Д., Шарапов В. И. Гибридная тепловая электростан-

ция на основе возобновляемых энергетических ресурсов // Сан-техника. Отопление. Кондиционирование 2019; 10: 70–75.

5. Ефимов Н. Н., Аль Гези Моафак Касеим Шиа. Оценка производительности и определение характеристик солнечной тепловой электростанции в условиях Ирака // Известия высших учебных заведений. Северо-кавказский регион. Технические науки 2015; 3(184): 45–49. doi: 10.17213/0321-2653-2015-3-45-49.

6. Иванова И. Ю., [и др.]. Оценка эффективности применения термофотозлектрических установок для обеспечения тепловой и электрической энергией // Вектор науки тольяттинского государственного университета. Серия: экономика и управление 2017; 3(30): 50–56. doi: 10.18323/2221-5689-2017-3-50-56.

7. Cheng Z., Elham D., Behdad M. Figure of merit analysis of a hybrid solar-geothermal power plant // Engineering 2013; 5: 26–31.

8. Nathwani Jay, Mines Greg Cost contributors to geothermal power generation // World Geothermal Congress – Melbourne 2015.

9. Kipsang Carolyn Cost model for geothermal wells // World Geothermal Congress. – Melbourne 2015.

10. Kivure Wellington Geothermal well drilling costing – a case study of menengai geothermal field // Exploration and Development of Geothermal Resources. – Kenya 2016; 1–8.

11. Fitri Oktaviani Purwaningsih, [и др.]. Make-up wells drilling cost in financial model for a geothermal project // International Geothermal Workshop 2017.

## References

1. Gemechu B. D., Sharapov V. I. Prospects of utilization of natural energy resources in Ethiopia. // Energy Saving and Water Treatment 2018; 1(111): 33–37.

2. Sharapov V. I., Gemechu B. D. Geothermal Power Plant. The patent 186091 U1 Russian Federation. Published 29.12.2018. Bulletin 2018; 1.

3. Gemechu B. D., Sharapov V. I. Energy efficiency assessment of hybrid solargeothermal power plant. // Power engineering: research, equipment, technology 2019; 21(4):3–11. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-3-11.

4. Gemechu B. D., Sharapov V. I. Hybrid thermal power plant based on renewable energy resources. // Sanitary engineering. Heating. Air conditioning 2019; 10: 70–75.

5. Yefimov N. N., Al Gezi Moafak Kaseim Shia. Performance evaluation and characterization of solar thermal power plants for Iraq // University news. North-Caucasian Region. Technical Sciences series 2015; 3(184): 45–49. doi: 10.17213/0321-2653-2015-3-45-49.

6. Kuvshinov V. V. [et al.] The assessment of efficiency of thermo-photovoltaic units application for thermal and electric energy providing // Science Vector of Togliatti State University. Series: Economics and Management 2017; 3(30): 50–56. doi: 10.18323/2221-5689-2017-3-50-56.

7. Cheng Z., Elham D., Behdad M. Figure of merit analysis of a hybrid solar-geothermal power plant. // Engineering 2013; 5(1B): 26–31.

8. Nathwani Jay, Mines Greg Cost contributors to geothermal power generation // World Geothermal Congress – Melbourne 2015.

9. Kipsang Carolyn Cost model for geothermal wells // World Geothermal Congress. – Melbourne 2015.

10. Kivure Wellington Geothermal well drilling costing – a case study of menengai geothermal field // Exploration and Development of Geothermal Resources. – Kenya 2016; 1–8.

11. Fitri Oktaviani Purwaningsih, [et al.]. Make-up wells drilling cost in financial model for a geothermal project // International Geothermal Workshop 2017.

