

## ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ УСТРОЙСТВА ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ РЕГАЗИФИКАЦИИ СЖИЖЕННЫХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ

Для надежного круглосуточного естественного испарения жидкой фазы СУГ в регазификаторах нового типа предложено использовать альтернативный возобновляемый источник теплоты – геотермальную энергию глубинных слоев грунта, где температура не зависит от сезонных колебаний на поверхности. Такие регазификаторы получили название геотермальных. Применение геотермальных регазификаторов является одним из направлений энергосбережения в газоснабжении потребителей сжиженными углеводородными газами.

Проблеме энергосбережения в различных отраслях хозяйства Украины, в том числе за счет использования нетрадиционных возобновляемых (альтернативных) источников энергии, уделяется в последнее время большое внимание. Правительством принят ряд документов, составляющих законодательную базу для работ в этом направлении.

Разработаны нормативные и методические материалы для обоснования технико-экономической целесообразности создания установок с использованием альтернативных источников энергии в различных отраслях хозяйственной деятельности. Такой анализ предусматривается как обязательный действующими нормами проектирования указанных установок.

Решения об экономической привлекательности проекта установки, в которой используются альтернативные источники энергии, и заключения о целесообразности его реализации на практике принимаются на основе сопоставления главных технико-экономических показателей проектируемой альтернативной (а) и базовой (б) установки одинакового назначения, где используются традиционные источники энергии.

Для оценки экономической эффективности проектов установок используется понятие *приведенных затрат*. Их относят к году, предшествующему вводу в строй проектируемой установки.

Приведенные затраты  $Z_{np}$  представляют собой сумму годовых текущих (эксплуатационных) расходов  $B$  и нормативной прибыли  $\Pi_n = E_n \cdot K$ :

$$Z_{np} = B + E_n \cdot K, \text{ грн.} \quad (1)$$

Здесь  $K$  – капитальные вложения в создание установки, грн;  $E_n$  – норма прибыли или норматив эффективности, %.

Нормативная прибыль  $E_n \cdot K$  характеризует нижнюю границу стоимости проекта, при которой вложение инвестиций в создание установки равноценно иному возможному вложению капитала, например, помещению на депозит в банке. В связи с этим норма прибыли  $E_n$  обычно приравнивается к учетной процентной ставке Национального банка Украины.

Для условий стабильного развития экономики во всех расчетах на перспективу рекомендуется принимать норматив эффективности  $E_n = 0,1 \dots 0,12$  [1].

При сопоставлении альтернативной и базовой установки рассматривается разность соответствующих приведенных затрат:

$$\Delta Z_{np} = (B_b - B_a) + E_n \cdot (K_b - K_a), \text{ грн.} \quad (2)$$

Так как одноименные годовые эксплуатационные расходы могут быть опущены, то их разность складывается из дохода  $D_a$ , получаемого при эксплуатации альтернативной установки за счет использования нетрадиционного источника энергии и разности амортизационных отчислений на реновацию в базовом и альтернативном вариантах (соответственно  $B_b^{ам}$  и  $B_a^{ам}$ ):

$$B_b - B_a = D_a + (B_b^{ам} - B_a^{ам}), \text{ грн.} \quad (3)$$

Таким образом, чтобы экономическая эффективность новой установки была значительной, следует увеличивать доходность энергосберегающих мероприятий  $D_a$  и уменьшать затраты  $B_a$  на их осуществление в процессе эксплуатации.

В геотермальной регазификационной установке естественное испарение жидкой фазы СУГ осуществляется круглогодично за счет притока геотермальной энергии из массива грунта. В базовой резервуарной установке, расположенной вблизи поверхности, теплопритоки из грунта возможны только в летний период, поэтому в зимний период для испарения СУГ используется электрическая энергия. В выбранном для

сравнения базовом варианте установки теплота для испарения СУГ поступает от погружного электрического регазификатора (РЭП). Отказ от РЭП в геотермальной установке обеспечивает получение дохода при ее эксплуатации. Он складывается из средств, расходуемых на оплату электрической энергии при работе РЭП  $B_{РЭП}^э$ , капитальных вложений на приобретение РЭП и вспомогательных электроустройств, проведение строительных и монтажных работ по их установке, а также годовых текущих (эксплуатационных) расходов по замене РЭП  $B_{РЭП}^{зам}$  и амортизационных отчислений на их реновацию  $B_{РЭП}^{ам}$ :

$$D_a = B_{РЭП}^э + B_{РЭП}^{зам} + B_{РЭП}^{ам}, \text{ грн.} \quad (4)$$

Введение в состав ежегодных текущих расходов амортизационных отчислений  $B^{ам}$  является обязательным в соответствии с Законом Украины «Про оподаткування прибутку підприємств». Их величина определяется нормативным процентом от капитальных вложений в установку, который зависит от распределения капитальных вложений по группам основных фондов. Последние делятся на вложения в строения, приборы и другое оборудование (автоматика и др.), а также на прочие. Реновации обычно подлежат приборы и оборудование, поэтому, чем большую долю в основных фондах занимают эти элементы установок, тем больше норматив (процент) амортизационных отчислений  $N^{ам}$ , %.

Ориентировочные значения  $N^{ам}$  для установок, где используются нетрадиционные источники энергии зависят от их типа.

Для геотермальных установок скважинного типа, где доля капитальных затрат на бурение скважин доходит до 90% от их общей стоимости, рекомендуется принимать  $N_{ГТР}^{ам} = 2,7\% (0,027)$  [1].

Нормативы амортизационных отчислений при создании базового варианта резервуарной установки с погружным электрическим регазификатором целесообразно устанавливать отдельно для РЭП и собственно резервуаров. Так как доля капитальных вложений в приборы и оборудование РЭП сравнительно велика, то для РЭП можно принять  $N_{РЭП}^{ам} = 0,092 (9,2\%)$  [2].

Отсюда

$$B_{РЭП}^{ам} = N_{РЭП}^{ам} \cdot K_{РЭП} = 0,092 K_{РЭП},$$

где  $K_{РЭП} = K_0 - K_{рез}$ .

По той же причине следует разделить общие капитальные затраты на сооружение геотермальных установок на затраты собственно на бурение скважин ГТР и их обустройство и общестроительные затраты.

Капитальные затраты на устройство геотермальных регазификаторов определяются по зависимости:

$$K_{ГТР} = K_a - K_{стр}, \text{ грн.} \quad (5)$$

где  $K_{стр}$  – общестроительные капитальные вложения, грн.

Разность амортизационных отчислений в базовом и альтернативном вариантах можно записать так:

$$B_6^{ам} - B_a^{ам} = N_{рез}^{ам} \cdot K_{рез} - N_{ГТР}^{ам} \cdot K_{ГТР}, \text{ грн.} \quad (6)$$

Здесь  $K_{рез}$  – капитальные вложения в резервуарную установку, включая расходы на оборудование РЭП, грн;

$K_{ГТР}$  – капитальные вложения в устройство геотермальных регазификаторов скважинного типа, без общестроительных расходов, грн;

$N_{рез}^{ам}$  – норматив амортизационных отчислений на устройство резервуарной установки без РЭП, %;

$N_{ГТР}^{ам}$  – норматив амортизационных отчислений на устройство геотермальных регазификаторов, %.

Учитывая, что указанные выше капитальные вложения относятся к одной группе основных фондов, нормативы  $N_{рез}^{ам}$  и  $N_{ГТР}^{ам}$  можно принять одинаковыми и равными  $N_{рез}^{ам} = N_{ГТР}^{ам} = 0,027 (2,7\%)$ .

Разность приведенных затрат, отражающую экономическую эффективность создания новой установки, можно выразить в виде:

$$\Delta Z_{пр} = B_{РЭП}^3 + B_{РЭП}^{ам} + B_{РЭП}^{ам} + N_{ГТР}^{ам} (K_{рез} - K_{ГТР}) + E_n (K_6 - K_a), \text{ грн.} \quad (7)$$

Другим критерием, определяющим экономическую целесообразность создания новой установки, является срок окупаемости разности капитальных вложений в альтернативную и базовую установки, или период ее возврата  $T_{ок}$ :

$$T_{ок} = \frac{\Delta K}{\Delta Z_{пр}} = \frac{K_a - K_6}{\Delta Z_{пр}}, \text{ грн.} \quad (8)$$

Чем меньше этот срок, тем более выгодным является замена традиционной установки новой, использующей альтернативный источник энергии.

Сопоставление затрат на устройство альтернативного и базового вариантов установок должно проводиться при обязательном выполнении следующих условий:

- альтернативная (новая) и базовая установки должны иметь максимально близкие технико-экономические показатели;
- обе установки должны иметь одинаковую (или близкую) технологическую нагрузку в течение рассматриваемого периода (в нашем случае – одинаковую среднюю паропроизводительность в течение цикла газоснабжения);
- все характеристики сопоставляемых установок должны быть приведены к одинаковому виду и размерности;
- стоимостные показатели установок должны приниматься при одинаковом уровне цен и одном и том же нормативе эффективности.

Основой обоснования технико-экономической целесообразности устройства геотермальных регазификаторов являются расчеты приведенных затрат по каждому из сопоставляемых вариантов. Они базируются на составленной в соответствии с действующими нормативами проектно-сметной документации на создание сопоставляемых установок.

В качестве примера обоснования технико-экономической целесообразности устройства геотермальной установки для хранения и испарения (регазификации) СУГ рассмотрим простейший случай, когда в ее состав входят два геотермальных регазификатора (ГТР) скважинного типа глубиной  $H = 0,5$  м с диаметром обсадной колонны  $\varnothing 0,5$  м. При этом один из ГТР является рабочим, другой, одинаковых размеров, находится в резерве, при циклическом газоснабжении потребителя. Примем, что в рассматриваемом случае объектом газоснабжения СУГ является оборудованное газовыми плитами жилое здание.

Потребный часовой расход газа на нужды указанного потребителя примем равным  $10 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

В качестве базового варианта принята подземная групповая резервуарная установка (ГРУ) с погружным электрическим регазификатором (РЭП), максимально близкая по своим технико-экономическим характеристикам установке с геотермальными регазификаторами. Так как вместимость геотермальной установки с двумя геотермальными регазификаторами скважинного типа составляет  $20 \text{ м}^3$ , то примем, что в состав ГРУ входят 4-е подземных типовых резервуара вместимостью  $5,0 \text{ м}^3$ .

Так как расчеты и натурные эксперименты показали, что средняя за цикл паропроизводительность геотермального регазификатора состав-

ляет порядка  $10 \text{ м}^3/\text{ч}$ , то ГРУ следует оборудовать одним погружным электрическим регазификатором типа РЭП-5А-10 с такой же паропроизводительностью.

Объемы строительных работ по устройству подземной групповой резервуарной установки из 4-х резервуаров с одним РЭП определялись по типовому проекту 905-1-38.88, что облегчило расчет сметных затрат на ее создание.

Основным элементом конструкции ГТР являются обсадные колонны, которые представляют собой стальные трубы, укрепляющие скважину, пробуренную в грунте. Нижний торец обсадной колонны герметично затампонирован пробкой из водонепроницаемого цемента марки 400 толщиной порядка 1 м.

К верхнему торцу крепится штатная редукционная головка типа ГР-10, защищенная металлическим кожухом.

Скважины бурятся роторным методом с помощью бурильных станков с дизельным двигателем и прямой промывкой глинистым раствором.

До начала монтажа буровой установки отведенная под ГТУ площадка должна быть спланирована и очищена от мусора и посторонних предметов.

Предусматривается прокладка подъездных путей, а также каналы для отвода бурового раствора и ливневых вод. По завершении монтажа оборудования площадку огораживают забором из металлической сетки на бетонных столбах.

В соответствии с объемом работ и перечнем оборудования и приборов, необходимых для устройства геотермальной установки, был выполнен расчет объектной сметы на ее строительство.

Общая сметная стоимость устройства геотермальной установки из 2-х ГТР составляет  $K_a = 111,185$  тыс. грн. Стоимость чисто строительных работ по устройству ГТУ составляет  $K_{cmp} = 4122$  грн.

Капитальные затраты по устройству собственно геотермальных регазификаторов равны:

$$K_{ГТР} = K_a - K_{cmp} = 111185 - 4122 = 107063 \text{ грн.}$$

Общая сметная стоимость групповой резервуарной установки с 4-мя резервуарами и одним погружным электрическим регазификатором РЭП-5А-10 согласно расчету составляет  $K_{\phi} = 95179$  грн.

Стоимость капитальных затрат на устройство РЭП составляет  $K_{РЭП} = 5935$  грн. Капитальные затраты на устройство резервуаров  $K_{рез} = 89244$  грн.

Рассчитаем величину дохода, полученного за счет внедрения геотермальной установки, где на испарение жидкой фазы СУГ не расходуется электроэнергия и отсутствует погружной электрический подогреватель РЭП.

Эксплуатационные расходы на оплату потребляемой при работе РЭП-5А-10 электрической энергии определяются по формуле:

$$B'_{РЭП} = W'_{РЭП} \cdot C', \text{ грн}, \quad (9)$$

где  $W'_{РЭП}$  – количество электрической энергии, затрачиваемой на испарение СУГ в холодный период года, кВт-ч;  $C'$  – стоимость 1 кВт-ч электрической энергии по действующим тарифам.

Согласно данным Киевэнего по состоянию на июнь 2005 г.  $C' = 0,25$  грн/кВт-ч.

Годовой расход электрической энергии на указанные нужды можно представить в виде:

$$W'_{РЭП} = W'_r \cdot \tau_{РЭП} \cdot \frac{\eta_{ГТУ}}{\eta_{ГРУ}} \text{ кВт-ч}, \quad (10)$$

где  $W'_r$  – часовой расход электрической энергии при работе РЭП, кВт-ч/ч;  $\tau_{РЭП}$  – время работы РЭП в течение года, ч;  $\eta_{ГТУ}$ ,  $\eta_{ГРУ}$  – коэффициент полезного действия соответственно ГТУ и ГРУ (принято  $\eta_{ГТУ} = 0,9$ ,  $\eta_{ГРУ} = 0,5$ ).

Согласно паспортным данным РЭП-5А-10  $W'_r = 5$  кВт-ч/ч.

Время работы РЭП в течение года определяется из выражения:

$$\tau_{РЭП} = \tau_u \cdot Z_u, \text{ час}, \quad (11)$$

где  $\tau_u$  – время работы РЭП в течение цикла между заправками установок жидкой фазой СУГ, час;  $Z_u$  – количество циклов заправок установок СУГ в год.

Последнее определяется по зависимости:

$$Z_u = 8760 \frac{Q^{бум}}{V_u^{бум} + V_u^{проп}} \cdot K_s. \quad (12)$$

Здесь  $Q^{бум}$  – паропроизводительность установок по бутану,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $V_u^{бум}$  – объемный расход паровой фазы бутана за цикл,  $\text{м}^3/\text{цикл}$ ;  $V_u^{проп}$  – объемный расход паровой фазы пропана за цикл,  $\text{м}^3/\text{цикл}$ ;  $K_s$  – коэффициент, характеризующий длительность холодного периода, в течение которого работает РЭП.

Время работы РЭП, обеспечивающего испарение высококипящих компонентов (бутана) в течение цикла от заправки до заправки установок СУГ определяется зависимостью:

$$\tau_{\text{ц}} = \frac{V_{\text{ц}}^{\text{бут}}}{Q_{\text{ГРУ}}^{\text{бут}}}, \text{ час.} \quad (13)$$

Паропроизводительность альтернативной и базовой установок по бутану принята одинаковой и равной  $Q_{\text{ГРУ}}^{\text{бут}} = 10 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Холодный период года для северных и центральных регионов Украины можно принять равным половине года, откуда  $K_{\text{г}} = 0,5$ .

Объемные расходы паровой фазы СУГ за цикл определяются по формуле:

$$V_{\text{ц}} = 2,5 \cdot 10^{-3} \pi d^2 \cdot H \cdot n \cdot k_{\text{зан}} \cdot 22,4 \cdot \frac{\rho}{\mu} p, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (14)$$

где  $d$  – внутренний диаметр обсадной колонны ГТР, принятый равным 0,5 м;  $H$  – глубина скважины, принятая округленно равной 50 м;  $n$  – количество ГТР в составе геотермальной установки, принято 2 шт.;  $k_{\text{зан}}$  – средний коэффициент заполнения резервуара жидкой фазой СУГ, принимаемый равным 0,5; 22,4 – молярный объем газа при нормальных условиях,  $\text{м}^3/\text{моль}$ ;  $\rho$  – плотность жидкой фазы СУГ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\mu$  – молярная масса газа,  $\text{кг}/\text{моль}$ ;  $p$  – массовая доля компонента в СУГ, %.

Объемный расход газа за цикл для рассматриваемого геотермального регазификатора определяется по расчетной формуле:

$$V_{\text{ц}} = 2,2 \cdot \frac{\rho}{\mu} \cdot p, \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (15)$$

Для бутана с плотностью  $\rho^{\text{бут}} = 600 \text{ кг}/\text{м}^3$  и молярной массой  $\mu^{\text{бут}} = 58 \text{ кг}/\text{моль}$ , массовой долей в составе СУГ  $p^{\text{бут}} = 80\%$

$$V_{\text{ц}}^{\text{бут}} = 2,2 \cdot \frac{600}{58} \cdot 80 = 1820 \text{ м}^3/\text{цикл} [3].$$

Для пропана плотность  $\rho^{\text{проп}} = 585 \text{ кг}/\text{м}^3$  с молярной массой  $\mu^{\text{проп}} = 44 \text{ кг}/\text{моль}$ , массовой долей в составе СУГ  $p^{\text{проп}} = 20\%$

$$V_{\text{ц}}^{\text{проп}} = 2,2 \cdot \frac{585}{44} \cdot 20 = 585 \text{ м}^3/\text{цикл} [3].$$

Количество циклов, в течение которых работает РЭП, согласно (12), равно:

$$Z_{\text{ц}} = 8760 \frac{10}{1820 + 585} \cdot 0,5 = 18 \text{ циклов/год.}$$

Количество часов работы РЭП за цикл согласно формуле (13) составляет:

$$\tau_{\text{ц}} = \frac{1820}{10} = 182 \text{ ч.}$$

Время работы РЭП в течение года по формуле (11) будет:

$$\tau_{\text{РЭП}} = 182 \cdot 18 = 3276 \text{ ч.}$$

Годовой расход электроэнергии при работе РЭП по формуле (10) составляет:

$$W_{\text{РЭП}} = 5 \cdot 3276 \frac{0,9}{0,5} = 29484 \text{ кВт-ч.}$$

Эксплуатационные расходы на оплату этого количества потребляемой электрической энергии в год составляют в базовом варианте согласно формуле (9):

$$B_{\text{РЭП}}^{\text{э}} = 29484 \cdot 0,25 = 7371 \text{ грн.}$$

Эксплуатационные расходы на замену РЭП в случае его выхода из строя определяются по формуле:

$$B_{\text{РЭП}}^{\text{зам}} = \tau_{\text{см}} \cdot C \cdot m \cdot S, \text{ грн,}$$

где  $\tau_{\text{см}}$  – продолжительность смены, ч, (принимается  $\tau_{\text{см}} = 8$  ч);  $C$  – число смен для замены РЭП, (по опыту эксплуатации примем  $C = 3$  смены);  $m$  – количество рабочих, занятых в смену в работах по замене РЭП, чел., (по опыту эксплуатации примем  $m = 2$  чел.);  $S$  – средняя стоимость человеко-часа для разрядности работ равной 3,5 (согласно справочнику «Ціноутворення у будівництві» № 4 за 2005 р. примем  $S_{3,5} = 5,42$  грн/чел.-час).

Подставляя в формулу (16) принятые значения параметров, получим:

$$B_{\text{РЭП}}^{\text{зам}} = 8 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 5,42 = 260 \text{ грн.}$$

Расходы на амортизационные отчисления для РЭП при  $N_{\text{РЭП}}^{\text{ам}} = 0,092$  составляют:

$$B_{\text{РЭП}}^{\text{ам}} = 0,092 \cdot 5935 = 546 \text{ грн.}$$

Разность приведенных затрат на устройство альтернативной и базовой установки, характеризующая экономическую эффективность энергосберегающей технологии согласно формуле (7) равна:

$$\Delta Z_{np} = 7371 + 260 + 546 + 0,027(107063 - 89244) + 0,1(111185 - 95179) = 10258 \text{ грн.}$$

Срок окупаемости капитальных затрат при этом составляет согласно формуле (8):

$$T_{ок} = \frac{111185 - 95179}{10258} = \frac{16006}{10258} = 1,56 \text{ года.}$$

Такой срок окупаемости перехода от традиционных ГРУ к ГТР приемлем для инвестирования капитала.

Расчеты подтверждают технико-экономическую целесообразность устройства геотермальных установок для хранения и регазификации СУГ, в особенности при значительной доле в их составе высококипящих компонентов, в частности, бутана.

### Выводы

На основании расчетов объектных смет для геотермальной регазификационной установки из 2-х ГТР и аналогичной по техническим параметрам базовой резервуарной установки из 4-х типовых резервуаров емкостью 5 м<sup>3</sup> и одного электрического погружного регазификатора РЭП-5-10 оценена технико-экономическая целесообразность создания первой установки, которая использует для испарения только теплоту глубинного массива грунта.

Показано, что за счет экономии средств на оплату электрической энергии, затрачиваемой на испарение СУГ с помощью РЭП в холодное время года, создание геотермальной установки взамен традиционной резервуарной установки окупается за 1,56 года.

Экономический эффект (разность приведенных затрат) при этом составляет  $\Delta Z_{np} = 10258$  грн.

### Литература

1. Методичні рекомендації з обґрунтування техніко-економічної доцільності застосування альтернативних джерел енергії на об'єктах житлово-громадського будівництва. – К.: Видав. Проблемного інституту нетрадиційних енерготехнологій та інжинірингу, 2004.
2. Богуславский Л. Д., Симонова А. А., Митин М. Ф. Экономика теплогазоснабжения и вентиляции. Учебн. для вузов. – М.: Стройиздат, 1988.
3. Стаскевич Н. Л., Вигдорчик Д. Я. Справочник по сжиженным углеводородным газам. – Л.: Недра, 1986.