

## МЕТОДИКА ТЕПЛООВОГО РАСЧЕТА ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РЕГАЗИФИКАТОРОВ СЖИЖЕННОГО УГЛЕВОДОРОДНОГО ГАЗА

Целью проектирования геотермальных регазификаторов (ГТР) является определение размеров теплообменной поверхности и других геометрических параметров по заданной паропроизводительности (прямая задача) или, наоборот, определение паропроизводительности установки при заданных размерах ГТР (диаметре обсадной колонны  $D$  и глубине скважины  $H_c$ ), что составляет обратную задачу.

В основе проектирования геотермального регазификатора лежат тепловые расчеты, методика которых базируется на результатах проведенных теоретических и экспериментальных исследований теплового взаимодействия грунта и жидкой фазы СУГ, находящейся в скважине ГТР.

В ходе тепловых расчетов ГТР основная задача состоит в определении удельных тепловых потоков на стенке скважины, содержащей сжиженный газ,  $q_r$ , Вт/м<sup>2</sup> в различные моменты времени их теплового взаимодействия.

Принципиально новым в предлагаемой в данной статье методике является непосредственное использование для этого нестационарного распределения температуры грунта в слое, прилегающем к стенке скважины ГТР. Указанное распределение получено в результате численного решения на ЭВЦМ краевой сопряженной задачи нестационарной теплопроводности методом конечных элементов (МКЭ) в процессе математического моделирования теплового взаимодействия ГТР и грунта.

Зная температуру грунта на стенке скважины (при  $r_1 = r_c$ ) и в непосредственной близости от нее (например, при  $r_2 = 1,05r_c$ ) для ряда фиксированных моментов времени  $\tau$ , можно определить изменение во времени удельных тепловых потоков на стенке скважины, омываемой жидкой фазой СУГ,  $q_r$ . Для этого используется закон Фурье для стационарной одномерной теплопроводности в бесконечном цилиндрическом

слое твердого тела, принимая в малом интервале  $\Delta\tau_i = \tau_{i+1} - \tau_i$ , что процесс теплопереноса протекает в квазистационарном режиме:

$$q_{\tau} = \lambda_n \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{\tau} \cong \lambda_n \frac{(T_{r_2} - T_{r_1})_{\tau}}{r \ln \frac{r_2}{r_1}}, \text{ Вт/м}^2, \quad (1)$$

где  $\lambda_n$  – теплопроводность породы, слагающей грунт, Вт/(м·°С);  $(T_{r_2} - T_{r_1})_{\tau} = \Delta T_{\tau}$  – конечная разность температур в цилиндрическом слое, ограниченном радиусами  $r_2$  и  $r_1$ , в рассматриваемые интервалы времени  $\Delta\tau_i$ .

Учитывая, что толщина слоя  $\delta = r_2 - r_1$ , много меньше радиуса  $r$ , влиянием его кривизны можно пренебречь и производить определение удельных тепловых потоков по формуле для бесконечной плоской стенки:

$$q_{\tau} = \lambda_n \frac{\Delta T_{\tau}}{\delta}, \text{ Вт/м}^2. \quad (2)$$

В нашем случае  $\delta = r_2 - r_1 = 1,05r_c - r_c = 0,05r_c$ , м.

Обработка термограмм грунта, полученных в вычислительных экспериментах, позволяет определить значения разности температур  $\Delta T_{\tau}$  в пристенном слое для различных моментов времени и с их помощью оценить величину удельных тепловых потоков  $q_{\tau}$ , также меняющихся во времени.

Основной задачей теплового расчета одиночного ГТР является оценка паропроизводительности при его тепловом взаимодействии с грунтом.

После этого по заданному или найденному по известной методике, приведенной в [2], максимальному расчетному часовому расходу газа на нужды потребителей  $V_{c, \max}$  можно найти необходимое количество геотермальных регазификаторов  $n_{ГТР}$  одновременно работающих на конкретную централизованную систему локального газоснабжения СУГ.

Имея план площадки строительства групповой геотермальной установки (ГТУ), выбираем схему размещения ГТР, руководствуясь требованиями СНиП 2.04.08-87 и не допуская взаимного теплового влияния рядом расположенных регазификаторов. Расстояние между центра-

ми скважин ГТР должно превышать удвоенный радиус их теплового влияния на массив грунта  $r_c$ .

При тепловом расчете ГТР исходными данными являются:

- географический пункт строительства ГТР;
- климатологические характеристики местности;
- породный состав грунта и его естественная влажность;
- теплофизические свойства породы при различных состояниях грунта (сухой, талый, мерзлый);
- состав СУГ;
- теплофизические характеристики жидкой и паровой фазы СУГ;
- диаметр обсадной колонны скважины  $D_{ГТР}$  м (радиус скважины  $r_c$ ) и ее глубина  $H_{ГТР}$ , м;
- максимальный объемный расход газа в системе газоснабжения потребителей СУГ,  $V_{c,max}$ ;
- режим газоснабжения (циклический или постоянный);
- в случае циклического режима задаются длительностью рабочего цикла газоснабжения.

Тепловой расчет геотермальных регазификаторов выполняется в порядке, изложенном ниже.

1. Определяем температуру массива грунта для условий конкретной местности на глубинах, где располагается зона активного теплообмена с ГТР.

Ранее принято, что активный теплообмен жидкой фазы СУГ в ГТР с грунтом протекает на глубинах, расположенных ниже нейтрального слоя гелиотермозоны, где годовыми колебаниями температуры грунта можно пренебречь. Нейтральный слой гелиотермозоны в грунтах, характерных для Украины, размещается на глубине 15...18 м [10].

Можно принять, что температура массива грунта  $T_{n,\infty}$  в зоне активного теплового взаимодействия с ГТР по глубине не изменяется.

Согласно положениям теплофизики грунта [6], данная температура равна среднегодовой температуре поверхности грунта в данной местности. При отсутствии данных метеослужбы о ее величине, указанную температуру можно приближенно определить по формуле:

$$T_{n,\infty} = T_{ноя}^{ср.год} = t_{возд}^{ср.год} + (2...2,5), \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (3)$$

где  $t_{возд}^{ср.год}$  – среднегодовая температура наружного воздуха для данного географического пункта,  $^\circ\text{C}$ .

Эту температуру можно определить по данным многолетних метеонаблюдений в конкретной местности, а в случае их отсутствия – по данным, приведенным в СНиП 2.01.01-82 «Строительная климатология и геофизика» [8].

2. По породному составу грунта (коэффициенту температуропроводности породы  $a_n$ , м<sup>2</sup>/час) и радиусу скважины ГТР  $r$ , м, находим перепады температуры  $\Delta T_\tau$  для различных моментов времени  $\tau$  по эмпирическим формулам, полученным в результате обработки термограмм грунта при взаимодействии с СУГ:

– для н-бутана

$$\Delta T_\tau = 0,0071 \cdot \frac{(1,3 + 0,2\tau) \cdot \left(0,5 + \frac{r_c}{0,25}\right) \cdot r_c}{a_n \cdot \sqrt{\tau} \cdot (1 + \ln \tau)}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4)$$

– для пропана

$$\Delta T_\tau = 0,015 \cdot \frac{(1,3 + 0,2\tau) \cdot \left(0,5 + \frac{r_c}{0,25}\right) \cdot r_c}{a_n \cdot \sqrt{\tau} \cdot (1 + \ln \tau)}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5)$$

Коэффициент температуропроводности породы находим по выражению:

$$a_n = \frac{3,6\lambda_n}{c_n \cdot \rho_n}, \text{ м}^2/\text{час}, \quad (6)$$

где  $\lambda_n$  – теплопроводность породы, Вт/(м · °С);  $c_n$  – теплоемкость породы, Дж/(кг · °С);  $\rho_n$  – плотность породы, кг/м<sup>3</sup>.

Теплофизические свойства сухого, влажного и мерзлого грунта характерных для Украины пород определяется по таблицам, приведенным в [6].

3. По найденным значениям  $\Delta T_\tau$  определяем величину нестационарного удельного теплового потока для соответствующих моментов времени:

$$q_\tau = \frac{\lambda_n}{0,05r_c} \cdot \Delta T_\tau, \text{ Вт/м}^2. \quad (7)$$

4. Зная изменения удельного теплового потока на стенке скважины во времени, находим изменяющиеся соответственно коэффициенты теплоотдачи при неразвитом режиме пузырькового кипения углеводородов по формуле, приведенной в [5]:

$$\alpha_{\kappa,\tau} = 0,385 (g \cdot \beta_{\text{ж}} \cdot \text{Pr}_{\text{ж}})^{0,25} \cdot \frac{\lambda_{\text{ж}}^{0,75}}{V_{\text{ж}}^{0,5}} \cdot q_{\tau}^{0,25}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}), \quad (8)$$

где  $g = 9,81 \text{ м}/\text{с}^2$  – ускорение свободного падения;  $\beta_{\text{ж}}$  – объемное расширение жидкости при нагреве  $1/^\circ\text{С}$ ;  $\text{Pr}_{\text{ж}} = \frac{V_{\text{ж}}}{\alpha_{\text{ж}}}$  – число Прандтля жидкости;  $V_{\text{ж}}$  – кинематическая вязкость жидкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\lambda_{\text{ж}}$  – теплопроводность жидкости,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$ .

Значения теплофизических характеристик жидкой фазы СУГ определяются по таблицам, приведенным в [9].

5. Определяем часовое количество теплоты, переданное от массива грунта к жидкой фазе СУГ в ГТР в процессе ее поверхностного кипения:

$$Q_{\text{ж},\tau} = \alpha_{\kappa,\tau} \cdot F \cdot \Delta t_{\text{ж},\tau} = 3,6 \alpha_{\kappa,\tau} \cdot 2\pi r_c \cdot H_{\kappa} \cdot \Delta t_{\text{ж},\tau}, \text{ Дж}, \quad (9)$$

где  $H_{\kappa}$  – глубина, на которой происходит пузырьковое кипение СУГ со средним значением коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{\kappa,\tau}$ , оцененная ранее  $H_{\kappa} = 10 \text{ м}$ ;  $\Delta t_{\text{ж},\tau} = T_{n,r_c} - t_{\text{ж}}$  – перегрев жидкости у стенки скважины при неразвитом режиме кипения, являющийся функцией удельного теплового потока  $q_{\tau}$ .

Неразвитый режим кипения характеризуется малыми перегревами пристенного слоя жидкости, не превышающими  $5^\circ\text{С}$ .

Примем зависимость перегревов жидкости  $\Delta t_{\text{ж},\tau}$  от  $q_{\tau}$ , представленную в табл. 1.

Таблица 1

Значения  $\Delta t_{\text{ж},\tau} = (f\tau)$

|                            |                        |      |      |      |     |     |      |
|----------------------------|------------------------|------|------|------|-----|-----|------|
| $q_{\tau}$                 | $\text{Вт}/\text{м}^2$ | 3000 | 1000 | 500  | 250 | 100 | 50   |
| $\Delta t_{\text{ж},\tau}$ | $^\circ\text{С}$       | 5    | 2    | 1,75 | 1   | 0,5 | 0,25 |

6. Для образования  $1 \text{ м}^3$  паровой фазы СУГ необходимо расходовать количество теплоты, которое определяется по формуле:

$$Q_{\text{ф}} = \sigma_{\text{ф}} \cdot \rho_{\text{пар}}, \text{ Дж}, \quad (10)$$

где  $\sigma_{\phi}$  – скрытая теплота фазового перехода при испарении конкретного углеводорода, Дж/кг;  $\rho_{\text{пар}}$  – плотность пара (газа) данного СУГ в рабочем состоянии, кг/м<sup>3</sup>.

Плотность газа приводится в справочниках [9] при нормальных условиях (температура  $t_p = 0^\circ\text{C}$ , давление  $p = 101,3$  кПа) и обозначается  $\rho_0$ .

Если температура и давление газа в рабочем состоянии отличаются от нормальных, то плотность газа определяется по формуле:

$$\rho_{\text{пар}} = \rho_0 \cdot \frac{273}{273 + t_p} \cdot \frac{p_p}{101,3} = 2,7 \rho_0 \frac{p_p}{T_p}, \text{ кг/м}^3. \quad (11)$$

7. Определяем часовую паропроизводительность (часовой объемный расход газа) одиночного ГТР в различные моменты времени цикла газоснабжения:

$$V_{z,t} = \frac{Q_{\text{ж,г}}}{Q_{\phi}} = \frac{3,6 \alpha_{\kappa,\tau} \cdot 2\pi r_c \cdot H_{\kappa} \cdot \Delta t_{\text{ж,г}}}{2,7 \sigma_{\phi} \cdot \rho_0 \frac{p_p}{T_p}}, \text{ м}^3/\text{час}. \quad (12)$$

8. Находим среднее за цикл газоснабжения значение часового объемного расхода газа от одного ГТР:

$$V_{z,\text{cp}} = \frac{\sum V_{z,t} \cdot \Delta \tau}{\sum \Delta \tau}, \text{ м}^3/\text{час}, \quad (13)$$

где  $\Delta \tau = 1$  час;  $\sum \Delta \tau = \tau_{\text{ц}}$  – длительность цикла газоснабжения от одного ГТР, обычно составляющая 6...8 час.

9. Определим количество одновременно работающих ГТР для обеспечения максимального часового расхода газа на нужды потребителя  $V_{z,\text{max}}$ :

$$n_{\text{ГТР}} = \frac{K_z \cdot V_{z,\text{max}}}{V_{z,\text{cp}}}, \text{ шт}, \quad (14)$$

где  $K_z = 1,5$  – коэффициент запаса расхода газа, компенсирующий влияние ряда неучтенных факторов и упрощающих допущений.

10. При многорядном размещении ГТР на площадке, отведенной под строительство, расстояния между центрами скважин в ряду  $L$ , м и

между рядами  $B$ , м должны превышать удвоенный радиус зоны теплового влияния скважины  $r_i$  при ее взаимодействии с грунтом.

Установлено, что относительный радиус теплового влияния для рассмотренных ГТР составляет  $R_i = \frac{r_i}{r_c} = 5,0 \dots 5,2$ .

Отсюда по известному радиусу скважины определяется радиус теплового влияния  $r_i$ :

$$r_i = (5,0 \dots 5,2) r_c. \quad (15)$$

Меньшее значение  $R_i$  принимается для пород с относительно малым коэффициентом температуропроводности  $a_n$ , м<sup>2</sup>/час (глины и суглинки), большее – для пород с большим  $a_n$  (плотный песчаник).

Вследствие радиальной симметрии размеры  $L$  и  $B$  должны выбираться одинаковыми и равными:

$$L = B = 2r_i \cdot K_s = (5,0 \dots 5,2) \cdot 2r_c \cdot K_s, \quad (16)$$

где  $K_s = 1,5$  – коэффициент запаса.

### Пример теплового расчета ГТР

Пример теплового расчета ГТР для циклического газоснабжения объекта (жилищно-административного здания ГНС) проводится при следующих исходных данных:

- географический пункт строительства ГТР – г. Тульчин Винницкой обл.;
- климатологические характеристики местности приняты согласно данным [8] следующими:
  - среднегодовая температура воздуха составляет  $t_{ср.год} = 12,35$  °С.
- породный состав грунта и его естественная влажность  $W_e$ , %:
  - суглинок с  $W_e = 20$  %;
- теплофизические характеристики влажной (талой) породы:
  - плотность  $\rho_{n,m} = 2000$  кг/м<sup>3</sup>;
  - теплопроводность  $\lambda_{n,m} = 1,47$  Вт/(м · °С);
  - теплоемкость  $c_{n,m} = 1,34$  кДж/(кг · °С);
  - температуропроводность  $a_{n,m} = 0,002$  м<sup>2</sup>/час
- состав СУГ: н-бутан (100%)

- теплофизические характеристики н-бутана:
  - плотность жидкой фазы  $\rho_{ж} = 600 \text{ кг/м}^3$ ;
  - теплопроводность  $\lambda_{ж} = 0,132 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ ;
  - теплоемкость  $c_{р,ж} = 2,24 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°C)}$ ;
  - температуропроводность  $a_{ж} = 0,98 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с} = 3,53 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{час}$ ;
  - кинематическая вязкость  $\nu_{ж} = 3,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ ;
  - число Прандтля  $Pr_{ж} = 3,6$ ;
  - объемное расширение  $\beta_{ж} = 2,1 \cdot 10^{-4}$ ;
  - температура кипения при  $p_p = 120 \text{ кПа}$   $t_{кип} = +4 \text{ °C}$ ;
  - скрытая теплота испарения  $\sigma_{ж} = 390 \text{ кДж/кг}$ ;
  - плотность паровой фазы  $\rho_0 = 2,7 \text{ кг/м}^3$
- наружный диаметр стальной трубы (обсадной колонны):  $\varnothing 500 \text{ мм}$ ; радиус скважины  $r_c = 0,25 \text{ м}$ , глубина скважины  $H_{ГТР} = 50 \text{ м}$ ;
- максимальный объемный расход газа на нужды потребителя:  $V_{г, \max} = 37 \text{ м}^3/\text{час}$ .
- режим газоснабжения: циклический со средним периодом непрерывного отбора газа в сеть  $\tau_u = 8 \text{ час}$ .

Тепловой расчет ГТР выполняем в соответствии с методикой, изложенной выше.

1. Расчетное значение температуры массива грунта, не подверженного влиянию сезонных колебаний на поверхности и тепловому воздействию скважины ГТР:

$$T_{n, \infty} = t_{ср, год} + 2 = 12,35 + 2 = 14,35 \text{ °C}.$$

2. Перепады температуры в пристенном слое грунта толщиной  $\delta = 0,05 r_c = 0,05 \cdot 0,25 = 0,0125 \text{ м}$  для различных моментов времени определяем по расчетной зависимости:

$$\begin{aligned} \Delta T_r &= 0,0071 \frac{(1,3 + 0,2\tau) \left( 0,5 + \frac{r_c}{0,25} \right) \cdot r_c}{\alpha \sqrt{\tau} (1 + \ln \tau)} = \\ &= 0,0071 \frac{(1,3 + 0,2\tau) \left( 0,5 + \frac{0,25}{0,25} \right) \cdot 0,25}{2 \cdot \sqrt{\tau} (1 + \ln \tau)} = 1,35 \frac{(1,3 + 0,2\tau)}{\sqrt{\tau} (1 + \ln \tau)}, \text{ °C}. \end{aligned}$$



3. Текущее значение удельного теплового потока на стенке скважины определяем по расчетной зависимости:

$$q_{\tau} = \frac{\lambda_{n,m}}{\delta} \cdot \Delta T_{\tau} = \frac{1,47}{0,0125} \cdot \Delta T_{\tau} = 117,6 \cdot \Delta T_{\tau}, \text{ Вт/м}^2.$$

4. Изменение коэффициентов теплоотдачи при поверхностном пузырьковом кипении на стенке скважины во времени определяется по расчетной зависимости:

$$\begin{aligned} \alpha_{k,\tau} &= 0,385 (g \cdot \beta_{ж} \cdot \text{Pr}_{ж})^{0,25} \cdot \frac{\lambda_{ж}^{0,75}}{V_{ж}^{0,5}} \cdot q_{\tau}^{0,25} = \\ &= 0,385 (9,81 \cdot 0,0021 \cdot 3,6)^{0,25} \cdot \frac{0,132^{0,75}}{(3,5 \cdot 10^{-7})^{0,5}} \cdot q_{\tau}^{0,25} = \\ &= 0,385 \cdot 0,521 \cdot \frac{0,216}{0,6 \cdot 10^{-3}} \cdot q_{\tau}^{0,25} = 72,21 q_{\tau}^{0,25}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}. \end{aligned}$$

5. Изменения часового количества теплоты, переданного жидкости при кипении определяем для соответствующих моментов времени по расчетной формуле:

$$Q_{ж,\tau} = 3,6 \alpha_{k,\tau} \cdot 2\pi r_c \cdot H_k \cdot \Delta t_{ж,\tau} = 3,6 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 0,25 \cdot 10 \cdot \alpha_{k,\tau} \Delta t_{ж,\tau} = 56,52 \alpha_{k,\tau} \cdot \Delta t_{ж,\tau},$$

кДж/час

6. Плотность н-бутана при рабочих условиях ( $t_p = 4 \text{ °C}$  и  $p_p = 120$  кПа) равна:

$$\rho_c = 2,7 \cdot \rho_0 \frac{p_p}{273 + t_p} = 2,7 \cdot 2,7 \frac{120}{277} = 3,2 \text{ кг/м}^3.$$

7. Количество теплоты необходимое для получения  $1 \text{ м}^3$  паровой фазы за счет испарения (кипения) н-бутана определяем по формуле:

$$Q_{\phi} = \sigma_{\phi} \cdot \rho_c = 390 \cdot 3,2 = 1248 \text{ кДж/м}^3.$$

8. Объемный расход газа от одного ГТР определяется по зависимости:

$$V_{c,\tau} = Q_{ж,\tau} / Q_{\phi}, \text{ м}^3/\text{час}.$$

Расчеты изменения объемного расхода газа для фиксированных моментов времени  $\tau = 1; 2; 3; 6; 9$  и  $12$  ч сводим в табл. 2.

Значения  $\Delta V_{\tau} = f(\tau)$ 

| $\tau$ , час                               | 1     | 2     | 3     | 6    | 9     | 12   |
|--|-------|-------|-------|------|-------|------|
| $\Delta T_{\tau}$ , °C                     | 2,0   | 0,94  | 0,69  | 0,48 | 0,43  | 0,4  |
| $q\tau$ , Вт/м <sup>2</sup>                | 235,2 | 110,5 | 81,1  | 56,5 | 50,5  | 47   |
| $\alpha_{\kappa}$ , Вт/м <sup>2</sup> · °C | 283   | 234   | 216,6 | 198  | 192,7 | 189  |
| $\Delta t_{\text{ж}}$ , °C                 | 2,0   | 1,0   | 0,75  | 0,5  | 0,5   | 0,5  |
| $Q_{\text{ж}}$ , кДж                       | 31980 | 13220 | 9178  | 5594 | 5444  | 5440 |
| $V_{\tau}$ , м <sup>3</sup> /час           | 25,6  | 10,6  | 7,34  | 4,48 | 4,35  | 4,34 |

Полученные данные, отражающие изменение часовых расходов газа во времени, представлены в виде графика на рис. 1. На этот график нанесены точки, соответствующие результатам натурных замеров расхода газа с помощью счетчика от ГТР в г. Тульчин Винницкой обл., где регазификатор работал в цикличном режиме газоснабжения (кружки) и от такого же по размеру ГТР, который работал в постоянном режиме в г. Немиров Винницкой обл. (треугольники).

Совпадение расчетных значений часовых расходов газа с экспериментальными данными достаточно хорошее, что свидетельствует о правильности принятой физической модели процесса теплового взаимодействия грунта с ГТР, схемы решения системы уравнений, описывающих ее, и разработанной методики теплового расчета.

9. Пользуясь приведенным графиком, определим среднее за цикл газоснабжения значение объемного расхода газа от одного ГТР по формуле (13):

$$V_{\tau, \text{ср}} = \frac{\sum \bar{V}_{\tau} \cdot \Delta\tau}{\sum \Delta\tau}, \text{ м}^3/\text{час},$$

где  $\Delta\tau = 1$  час,  $\sum \Delta\tau = 8$  час,  $\bar{V}_{\tau}$  – средняя для  $\Delta\tau$  значения  $V_{\tau}$ .

Отсюда:

$$V_{\tau, \text{ср}} = \frac{40,0 + 15,0 + 8,5 + 6,0 + 5,0 + 4,5 + 4,3 + 4,2}{8} = \frac{87,2}{8} = 10,9 \text{ м}^3/\text{час}.$$

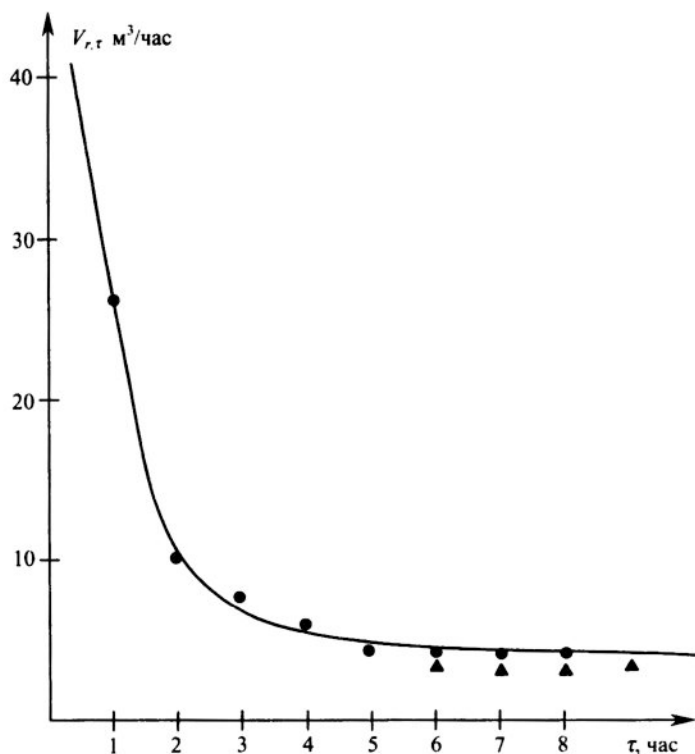


Рис. 1. Изменение паропроизводительности одиночного ГТР радиусом  $r_c = 0,25$  м во времени

Обозначения: — — расчет согласно табл. 2; ● — экспериментальные точки для  $V_{r,\tau}$  от ГТР в г. Тульчин; ▲ — то же в г. Немиров

10. По формуле (14) определим необходимое количество одновременно работающих ГТР для покрытия максимального объемного расхода на нужды потребителя  $V_{\max} = 37$  м³/час:

$$n_{\text{ГТР}} = \frac{K_3 \cdot V_{\max}}{V_{z,\text{ср}}} = \frac{1,5 \cdot 37}{10,9} = 5,1 \text{ шт.}$$

Количество ГТР округляем до ближайшего большего целого числа:

$$n_{\text{ГТР}} = 6 \text{ шт.}$$

Указанное количество ГТР целесообразно разместить на площадке, отведенной для устройства геотермальной регазификационной установки (ГРУ), в два ряда по три ГТР в ряду.

При этом расстояния между центрами скважин следует принять, согласно зависимости (16) такими:

$$L = B = 5,2 \cdot 2 \cdot 0,25 \cdot 1,5 = 3,9 \text{ м}$$

или округленно  $L = B = 4 \text{ м}$ .

На этом тепловой расчет ГТР, работающего в циклическом режиме, считается законченным.

Расчет ГТР для режима непрерывного газоснабжения объектов с отопительной или технологической нагрузкой производится аналогичным образом, с той разницей, что рассматривается стадия квазистационарного теплообмена между грунтом и СУГ, наступающая в рассмотренном случае при  $\tau \geq 8$  час.

### **Выводы**

По результатам полученным в вычислительных экспериментах для нестационарного распределения температур в слое, непосредственно прилегающем к стенке скважины ГТР, рассчитаны изменения удельного теплового потока на стенке, позволяющие определить интенсивность теплоотдачи при пузырьковом кипении жидкой фазы СУГ в неразвитом режиме.

На этом основании определено количество теплоты, переданное от массива грунта к жидкости, что позволило рассчитать объемный расход газа от одного ГТР при испарении СУГ и его изменение во времени при циклическом и постоянном газоснабжении объектов.

По среднему значению паропроизводительности можно определить количество геотермальных регазификаторов заданных геометрических параметров, которые способны обеспечить надежное газоснабжение конкретного потребителя.

На основании этого подхода разработана методика теплового расчета геотермальных регазификаторов.

### **Литература**

1. Авторское свидетельство СССР №1374680, кл FC3/00, Установка для испарения и хранения сжиженного углеводородного газа. 1987, Енин П. М. и др.

2. Енин П. М., Шишко Г. Г., Пилюгин Г. В. Газификация сельской местности. Справочное пособие. – К.: Урожай, 1992. – 200 с.
3. Енин П. М. и др. Отчет о научно-исследовательской работе «Создать геотермальный регазификатор сжиженного углеводородного газа по авторскому свидетельству СССР №1374680» – К.: ИПК РРиС МЖКХ УССР, Гос. регистр. №01860069121, 1987. – 139 с.
4. Енин П. М. Централизованная система локального газоснабжения потребителей сжиженным углеводородным газом от геотермальных установок. – К.: Изд-во КНУБА. Вып. 6, 2002.
5. Клименко А. П., Козицкий В. И. Расчет коэффициентов теплоотдачи при кипении углеводородов и их галоидопроизводных // Химич. пром-сть Украины. – 1967. – № 1. – 2 с.
6. Методика выбора параметров теплоаккумулирующих выработок сланцевых шахт. РД. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1989. – 38 с.
7. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. – 208 с.
8. СНиП 2.01.01-82. Строительная климатология и геофизика. – М.: Стройиздат, 1983. – 186 с.
9. Стаскевич Н. Л., Вигдорчик Д. Я. Справочник по сжиженным углеводородным газам. – Л.: Недра, 1986. – 543 с.
10. Фролов Н. М. Температурный режим гелиотермозоны. – М.: Недра, 1966. – 15 с.