

## **ЦЕНТРАЛИЗОВАННАЯ СИСТЕМА ЛОКАЛЬНОГО ГАЗОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ СЖИЖЕННЫМ УГЛЕВОДОРОДНЫМ ГАЗОМ (СУГ) ОТ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ УСТАНОВОК (ГТУ)**

*В статье изложено новое направление газоснабжения потребителей сжиженным углеводородным газом (СУГ) за счет использования возобновляемого источника тепловой энергии – теплоты приповерхностных слоев Земли для целей регазификации СУГ.*

*Проведенные экспериментальные и натурные исследования показывают полное преимущество данного решения по сравнению с традиционными.*

*Применение геотермальных установок (ГТУ) для газоснабжения потребителей сжиженным углеводородным газом с повышенным содержанием бутана позволяет высвободить громадное количество активной тепловой энергии (около 0,1 ГДж на каждую тонну СУГ), которое использовалось для регазификации газа в подземных групповых резервуарных установках.*

*Результаты теоретических исследований полностью подтверждены в натурных условиях в процессе опытного внедрения.*

### **Термины:**

|  |   |
|--|---|
| гелиотермозона –                               | поверхностный слой Земли подверженный изменению теплового режима под влиянием Солнца и других внешних факторов;   |
| гелиогеотермозона –                            | внешняя оболочка Земли, из пределов которой за геологическое время происходит отток тепла к поверхности, и в толще которой на термическом режиме грунта сказывается влияние Солнца в соответствующей степени и форме; |
| нейтральная зона грунта («нейтральный слой») – | зона постоянных положительных температур грунта, характеризующаяся практически отсутствием их зависимости от годовых колебаний температуры воздуха и соответствующих колебаний температуры гелиогеотермозоны;         |

|  |  |
|--|--|
| идеальное температурное поле –                   | температурное поле грунта, принимаемое как полубесконечное, не имеющее границ разделов, изотропное твердое тело, в котором тепловая энергия переносится теплопроводностью, а источники и стоки тепловой энергии отсутствуют;                   |
| расчетное температурное поле гелиогеотермозоны – | температурное поле грунта, полученное с учетом аномалий теплофизического, гидрологического и геологического характера, вносимых конвенцией грунтовых вод, локальными источниками и стоками, характерными для фактического температурного поля; |
| альbedo –  | отношение количества отраженной поверхностью Земли лучистой энергии к количеству энергии, падающей на тело; характеризует отражательную способность поверхности Земли;   |
| инсоляция –                                      | непосредственное облучение солнечным светом верхнего слоя земной коры;   |
| эффективное излучение –                          | разность между излучением поверхности Земли и противоизлучением атмосферы;   |
| гипсометрический градиент –                      | градиент изменения температуры пород с изменением высоты над уровнем моря;   |
| экспозиция склонов –                             | угол наклона поверхности Земли, °.   |

. Газификация объектов и населенных пунктов Украины, не имеющих сетевого природного газа, осуществляется сжиженным углеводородным газом (СУГ) от газобаллонных или резервуарных установок.

Как в первом, так и во втором случаях применение СУГ сопряжено с рядом острых экономических и технологических проблем. Газоснабжение потребителей от газобаллонных установок в массовом масштабе характеризуется высокими эксплуатационными расходами, что приводит к убыточности всего мероприятия.

Применение групповых резервуарных установок для газоснабжения потребителей газом с высоким содержанием бутана вызывает необходимость нерационального использования активной тепловой энергии регазификации

газа в связи с расположением резервуаров в зоне промерзания грунта и относительно высокой температуры кипения газа.

Взамен этого под руководством автора на Украине создана принципиально новая конструкция геотермальной установки (ГТУ) для централизованных систем локального газоснабжения на базе геотермальных регазификаторов сжиженного углеводородного газа (ГТР) скважинного типа, обеспечивающая испарение жидкой фазы газа за счет тепловой энергии глубинных слоев грунта.

Паровая фаза от ГТУ транспортируется по подземным газопроводам к каждому потребителю (жилой дом, котельная и т.п.).

Во избежание конденсации паровой фазы газа в подземных газопроводах устраивается автоматическая их тепловая защита или прокладка подземных газопроводов производится ниже глубины промерзания грунта.

Геотермальные регазификаторы специальной конструкции по мере опорожнения периодически заправляются жидкой фазой газа от специальных автомашин – газовозов (АЦРКГ).

Такая система позволяет снизить эксплуатационные расходы по сравнению с газобаллонным газоснабжением в 4 – 5 раз и отказаться от использования активной тепловой энергии для регазификации СУГ.

Главным преимуществом данной установки является использование для испарения газа возобновляемого источника тепловой энергии – геотермальной (энергии приповерхностной толщи Земли), уровень температуры которой для различных климатических зон Украины колеблется в пределах  $+12...+16^{\circ}\text{C}$ .

Отсутствие влияния внешнего климатического фактора в различные периоды года не процесс регазификации газа в геотермальной установке характеризует ее как источник газоснабжения с высокими стабильными показателями надежности, бесперебойности и безопасности.

Кроме того, ГТУ характеризуется целым рядом других преимуществ (компактное расположение, обеспечивающее экономию земельной площади; использование газа различного качества; удобство эксплуатации и др.).

Практическое использование тепловой энергии гелиогеотермозоны открывает широкие перспективы для регазификации СУГ в геотермальных установках систем газоснабжения потребителей на базе ГТР.

Конструктивно ГТР представляет собой вертикальный, заглубленный на 50 метров в грунт герметичный цилиндр, заполненный СУГ на 90% его вместимости, соответствующей по глубине уровню залегания нейтрального слоя грунта (рабочая зона гелиогеотермозоны), а верхний участок цилиндра, расположенный в гелиотермозоне, заполнен паровой фазой СУГ. Наружная поверхность верхней части цилиндра покрыта тепловой изоляцией, предотвращающей процесс конденсатообразования паровой фазы в зимний период эксплуатации ГТР (рис. 1).

В процессе теплообмена изменяется во времени температурное поле грунта, которое классифицируется как нестационарное. Нестационарный тепловой процесс связан с изменением теплосодержания массива грунта и им обуславливается. Так как скорость изменения теплосодержания системы прямо пропорциональна коэффициенту теплопроводности грунта  $\lambda$  и обратно пропорциональна его аккумулирующей способности (объемной теплоемкости  $ср$ ), то в целом скорость теплового процесса при нестационарном режиме определяется значением коэффициента температуропроводности  $a = \lambda / ср$ .

В геотермальном регазификаторе происходит отбор теплоты из окружающего массива грунта, который охлаждается. Этот процесс можно разделить на три режима. Первый из них охватывает начало процесса, когда происходит распространение температурных возмущений в грунтовом массиве и захват все новых слоев грунта. Скорость изменения температуры в отдельных точках при этом различна, и поле температур сильно зависит от начального состояния, которое может быть различным. Этот режим характеризует начальную стадию развития процесса. С течением времени влияние начальных условий сглаживается и относительная скорость изменения температуры во всех точках системы становится постоянной. Этот (второй) режим называется упорядоченным или регулярным. По истечении длительного времени наступает третий, установившийся режим, характерной особенностью которого является постоянство распределения температур во времени.

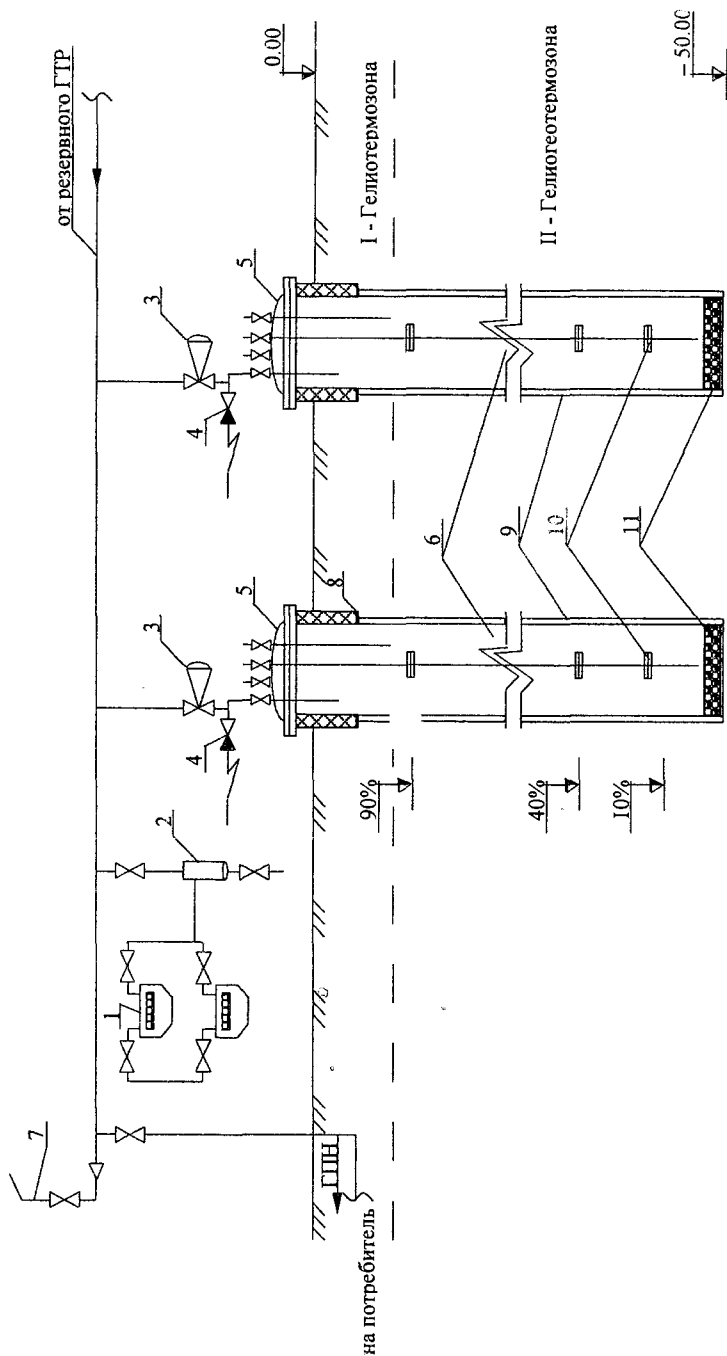


Рис. 1. Принципиальная схема геотермальной установки

1 – счетчик; 2 – конденсатор; 3 – регулятор давления паровой фазы; 4 – предохранительный сбросной клапан; 5 – головка редукционная; 6 – геотермальный регазификатор; 7 – продувочная свеча безопасности; ГП – газопровод паровой фазы низкого давления; 8 – теплоизоляция; 9 – цементная рубашка; 10 – индикаторы уровня; 11 – тампонные бетонные пробки

При эксплуатации ГТУ имеет место циклический характер отбора паровой фазы газа, что обуславливает протекание процесса теплообмена, характерного для первого и второго режимов. При отсутствии газопотребления из ГТР, особенно в ночное время, происходит процесс восстановления температурного поля грунтового массива за счет постоянного теплового потока из глубинных слоев и аккумуляция тепловой энергии в ГТР.

При непрерывном отборе паровой фазы газа из ГТР, что может иметь место при газоснабжении отопительных котельных, технологических потребителей и т.п., может наступить тепловое состояние, характеризующееся третьим режимом установившегося теплообмена.

На практике геотермальные установки будут использоваться в большей части для газоснабжения жилых зданий, что обуславливает их работу в режиме циклического газопотребления в течение суток. Основная нагрузка на ГТР при максимальном режиме газопотребления бывает в утренние и вечерние часы суток, а также в некоторые выходные и праздничные дни. В этих условиях эксплуатация ГТР будет характеризоваться циклическим (прерывистым) режимом отбора паровой фазы потребителями и, следовательно, циклическим режимом отбора теплоты от массива грунта.

Такая постановка задачи сводится к решению балансового уравнения для нахождения суточной продолжительности работы ГТР и суточной продолжительности в нерабочем его состоянии, когда происходит процесс аккумуляции тепловой энергии.

Было установлено, что в первые 20 часов ГТР работает в области начального теплового режима, характеризующегося повышенными параметрами нестационарного теплообмена. Это свидетельствует о том, что при циклическом газоснабжении потребителей можно добиться относительно высокой производительности ГТР по сравнению с непрерывным газоснабжением, когда система переходит в регулярный, а по истечению длительного времени (100–150 часов) в установившийся режим.

При циклическом газоснабжении можно добиться такого состояния, при котором в течение нерабочего состояния (отсутствие отбора паровой фазы газа) температурное поле в системе «ГТР – массив грунта» успеет

восстановиться за счет притока тепловой энергии из глубинных слоев массива.

При этом внешнюю (за пределами ГТР) и внутреннюю (тепловые процессы в ГТР) задачи следует рассматривать совместно.

Внутренняя задача имеет специфику, связанную с отличием термодинамических процессов, протекающих при кипении газа в ГТР во время отбора паровой фазы газа и чисто конвективного теплообмена, когда прекращается газопотребление и температура жидкой фазы газа восстанавливается (повышается) за счет аккумуляции тепловой энергии из окружающего грунта.

#### Условные обозначения

- $t_{p,z}^{cp}$  — средняя температура грунта в рабочей зоне ГТР, °C;
- $H$  — высота местности над уровнем моря, м;
- $t_{ср.в}$  — среднегодовая температура воздуха для данного климатического района, °C;
- $\Delta t_R$  — прирост средней температуры грунта за счет поглощения солнечной радиации, °C;
- $\Delta t_{сн}$  — поправка на температуру грунта, учитывающая влияние снежного покрова на его температурный режим, °C;
- $H_{ГТР}$  — глубина расположения ГТР (высота), м;
- $A$  — часть радиационного баланса земной поверхности, расходуемая на нагревание почвы и грунтовых вод, кДж/(см<sup>2</sup>·год);
- $\tau$  — время, с;
- $c_{гр}$  — удельная теплоемкость грунта, Дж/(кг·K);
- $\rho_{гр}$  — плотность грунта, кг/м<sup>3</sup>;
- $h_{н.з.}$  — глубина залегания нейтральной зоны грунта (принимается в зависимости от географической широты местности от 5 до 15 м);
- $K_1$  — коэффициент нестационарной теплопередачи в ГТР для условий кипения газа, Вт/(м<sup>2</sup>·K);
- $F$  — площадь поверхности ГТР, м<sup>2</sup>;
- $t_{zp} = t_{p,z}^{cp}$  — начальная температура грунта, °C;
- $t_k$  — температура кипения СУГ, °C;
- $\tau_u$  — продолжительность работы ГТР в сутки, ч;

|                  |   |
|------------------|---|
| $K_2$ —          | коэффициент нестационарной теплопередачи в ГТР для условий конвективного теплообмена при прекращении кипения (отбора паровой фазы СУГ), Вт/(м <sup>2</sup> ·К); |
| $\alpha_k$ —     | коэффициент теплоотдачи в ГТР при кипении газа, Вт/(м <sup>2</sup> ·К);   |
| $a_{zp}$ —       | коэффициент температуропроводности грунта, м/с <sup>2</sup> ;   |
| $h$ —            | толщина поверхностного слоя грунта (гелиотермозоны), подверженная резкому сезонному колебанию температуры; м;   |
| $Z$ —            | период колебания температуры, с;  |
| $\beta_{ГТР}$ —  | фактор формы тепловоспринимающей поверхности ГТР (формфактор);  |
| $\lambda_{zp}$ — | коэффициент теплопроводности окружающего ГТР грунта, Вт/(м·К);  |
| $r_{ГТР}$ —      | радиус обсадной трубы ГТР, м;   |
| $\beta_{ж}$ —    | коэффициент объемного расширения жидкой фазы газа (принимается $\beta_{ж} = \frac{1}{273,2}$ );   |
| $g$ —            | ускорение силы земного притяжения, м/с <sup>2</sup> ;   |
| $Pr_{ж}$ —       | критерий Прандтля для жидкой фазы газа;   |
| $Pr_c$ —         | критерий Прандтля для стенки ГТР;   |
| $\lambda_{ж}$ —  | коэффициент теплопроводности жидкой фазы газа, Вт/(м·К);  |
| $\nu_{ж}$ —      | кинематическая вязкость жидкой фазы газа, м <sup>2</sup> /с;  |
| $q$ —            | тепловой поток от грунта к поверхности ГТР, Вт/м <sup>2</sup> ;   |
| $Nu$ —           | критерий Нуссельта;   |
| $Gr_{ж}$ —       | Критерий Грасгофа для жидкой фазы газа;   |
| $\alpha_{ка}$ —  | коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м <sup>2</sup> ·К);  |
| $V_g$ —          | расход паровой фазы газа, м <sup>3</sup> /ч;  |
| $q_g$ —          | удельная теплота парообразования газа, кДж/кг.  |

Методика расчета разработана на основании результатов теоретических и экспериментальных исследований ГТР, проверки тепловых процессов в системе ГТР – массив грунта в натурных условиях.

Основной задачей расчета является определение геометрических размеров ГТР и их количества в зависимости от температуры и теплофизических характеристик массива в рабочей зоне ГТР по заданному расчетному расходу паровой фазы газа для циклического или непрерывного режимов газоснабжения.



Средняя температура грунта в рабочей зоне ГТР находится из выражения

$$t_{p.z}^{cp} = t_{cp.g} + \Delta t_R + \Delta t_{en} + \frac{0,5H_{ГТР}}{30} \pm 0,006H, \quad (1)$$

где

$$\Delta t_R = \frac{A \cdot \tau}{c_{\varphi} \cdot \rho_{\varphi} \cdot h_{н.з.}}. \quad (2)$$

Для условий термодинамических процессов, протекающих при кипении газа в ГТР во время отбора паровой фазы и чисто конвективного теплообмена, когда прекращается газопотребление и температура газа восстанавливается (повышается) за счет аккумуляции тепловой энергии из окружающего ГТР массива грунта, уравнение теплового баланса имеет следующий вид:

$$K_1 F (t_{zp} - t_x) \tau_y - K_2 F \left( t_{zp} - \frac{t_{zp} + t_x}{2} \right) (24 - \tau_y) = 0. \quad (3)$$

Решая данное уравнение относительно  $\tau_y$ , получим

$$\tau_y = \frac{12K_2}{K_1 + 0,5K_2}. \quad (4)$$

Коэффициент нестационарной теплопередачи ГТР при условии кипения газа  $K_1$  находится из выражения

$$K_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_x} + \frac{1,13\sqrt{a \cdot Z}}{\beta_{ГТР} \cdot \lambda_{zp}}}, \quad (5)$$

где

$$\beta_{ГТР} \approx 1 + 0,38 \frac{\sqrt{a_{\varphi} \cdot Z}}{r_{ГТР}}. \quad (6)$$

Коэффициент теплоотдачи в ГТР при кипении газа  $\alpha_x$  определяется как для условий неразвитого кипения, которое возникает при малых плотностях теплового потока  $q$ . Интенсивность теплоотдачи при этом невелика. Для кипящего пропана и н-бутана, а также для их смесей неразвитое кипение протекает при  $q < 3000 \div 4000$  Вт/м<sup>2</sup> [1, 2]. Для этих условий коэффициент теплоотдачи  $\alpha_x$  определяется из выражения:

$$\alpha_x = 0,385 (\beta_x \cdot g \cdot Pr_x)^{0,25} \cdot \frac{\lambda_x^{0,75}}{\nu_x^{0,5}} q^{0,25}; \quad (7)$$

Коэффициент нестационарной теплопередачи в ГТР при отсутствии кипения определяется по формуле

$$K_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\kappa 0}} + \frac{1,13 \sqrt{a_{\text{зп}} \cdot Z}}{\beta_{\text{ГТР}} \cdot \lambda_{\text{зп}}}}. \quad (8)$$

Коэффициент конвективной теплоотдачи  $\alpha_{\kappa 0}$  в ГТР для условий ламинарного режима движения (конвекции) жидкости в вертикальных трубах определяется из критериального выражения

$$Nu_{\text{ж}} = 0,76 (Gr_{\text{ж}} \cdot Pr_{\text{ж}})^{0,25} \left( \frac{Pr_{\text{ж}}}{Pr_c} \right)^{0,25}, \quad (9)$$

где

$$Nu_{\text{ж}} = \frac{\alpha_{\kappa 0} \cdot d_{\text{ГТР}}}{\lambda_{\text{ж}}}, \quad (10)$$

тогда

$$\alpha_{\kappa 0} = \frac{Nu_{\text{ж}} \cdot \lambda_{\text{ж}}}{d_{\text{ГТР}}}. \quad (11)$$

### Режим циклического газопотребления

Тепловой баланс ГТР при циклическом газопотреблении выражается формулами:

уравнение теплового баланса для режима кипения газа

$$3,61 \cdot K_1 \cdot F (t_{\text{зп}} - t_{\kappa}) \tau_{\text{ч}} = q_{\text{Г}} \cdot V_{\text{Г}} \cdot \rho_{\text{Г}} \cdot \tau_{\text{ч}} \quad (12)$$

уравнение теплового баланса для режима аккумулирования тепловой энергии во время перерывов газоснабжения

$$3,61 \cdot K_2 \cdot F \left( \frac{t_{\text{зп}} - t_{\kappa}}{2} \right) (24 - \tau_{\text{ч}}) = c_{\text{ж}} \cdot G_{\text{ж}} (t_{\text{зп}} - t_{\kappa}) \quad (13)$$

$$3,61 \cdot 0,5 \cdot K_2 \cdot F (24 - \tau_{\text{ч}}) = 0,785 c_{\text{ж}} \cdot d_{\text{ГТР}}^2 \cdot H_{\text{ГТР}} \cdot \rho_{\text{ж}}. \quad (14)$$

Продолжительность суточного рабочего цикла ГТР  $\tau_{\text{ч}}$  в часах находится из условия левых частей уравнений 13 и 14.

$$K_1 \cdot F \cdot \tau_{\text{ч}} (t_{\text{зп}} - t_{\kappa}) = K_2 \cdot F \left( \frac{t_{\text{зп}} - t_{\kappa}}{2} \right) (24 - \tau_{\text{ч}}). \quad (15)$$

После сокращений и преобразований, получим

$$\tau_{\text{ч}} = \frac{12 K_2}{K_1 + 0,5 K_2}, \quad (16)$$

где коэффициент теплопередачи для режимов кипения  $K_1$  и аккумулирования тепловой энергии  $K_2$  определяются соответственно из выражений

$$K_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_k} + \frac{1,13\sqrt{a_{zp} \cdot 24}}{\lambda_{zp} \left(1 + 0,76 \frac{\sqrt{a_{zp} \cdot 24}}{d_{ГТР}}\right)}}. \quad (17)$$

$$K_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{кв}} + \frac{1,13\sqrt{a_{zp} \cdot 24}}{\lambda_{zp} \left(1 + 0,76 \frac{\sqrt{a_{zp} \cdot 24}}{d_{ГТР}}\right)}}. \quad (18)$$

Коэффициенты теплопередачи в ГТР при кипении  $\alpha_k$  и конвективном теплообмене  $\alpha_{кв}$  находится соответственно из критериальных уравнений:

$$\alpha_k = 0,385(\beta_{ж} \cdot g \cdot Pr_{ж})^{0,25} \cdot \frac{\lambda_{ж}^{0,75}}{V_{ж}^{0,5}} \cdot q^{0,25}, \quad (19)$$

$$\alpha_{кв} = \frac{0,76\lambda_{ж} (Gr_{ж} \cdot Pr_{ж})^{0,25} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c}\right)^{0,25}}{d_{ГТР}}. \quad (20)$$

Диаметр трубной колонны ГТР выбирается по сортаменту труб для систем не менее 10 мм в соответствии с требованиями СНиП 2.04.08-87.

Рекомендуемые диаметры труб ÷ 351, 377, 426, 530, 630, 720, 820 мм.

Удельный тепловой поток от массива грунта к ГТР  $q$  определяется из условий относительной установившейся величины охлаждения грунта за пределами поверхности цилиндрической стенки ГТР из выражения

$$\frac{2\sqrt{a_{zp} \cdot \tau_y}}{d_{ГТР}}, \quad (21)$$

где  $\tau_y$  представляет собой время в часах, в течение которого совершается цикл регазификации газа, который из условия уклада быта населения принимается в среднем 10 часов.

По найденному значению  $\frac{2\sqrt{a_{zp} \cdot \tau_y}}{d_{ГТР}}$ , из графика (рис. 2) определяем

величину

$$\frac{2\Delta t \cdot \lambda_{zp}}{qd_{ГТР}} = \frac{2\lambda_{zp}(t_{zp} - t_k)}{q \cdot d_{ГТР}}, \quad (22)$$

откуда находим  $q$ .

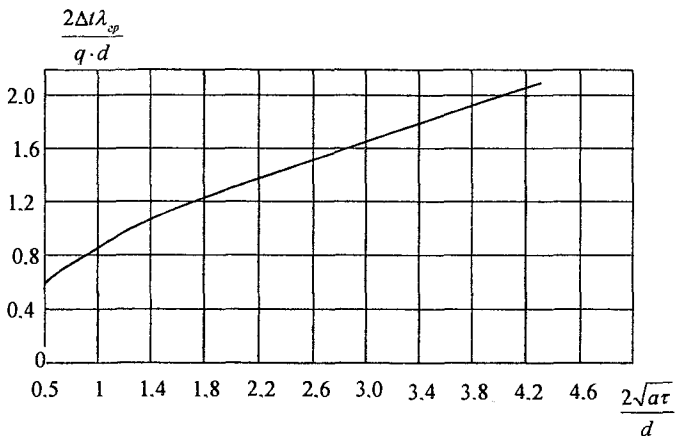


Рис. 2. Кривая изменения температуры на цилиндрической поверхности ГТР

Глубина заложения ГТР  $H_{ГТР}$  определяется из условия

$$H_{ГТР} = \frac{h}{0,1} = \frac{5}{0,1} = 50 \text{ м}, \quad (23)$$

где  $h$  – величина поверхностного слоя грунта (гелиотермозоны), подверженного резкому сезонному колебанию температуры, м. Для центральной и северной климатической зон Украины принимается равной 5 м.

Из формулы 12 определяем часовую производительность одного ГТР

$$V_r = \frac{3,61 \cdot K_1 \cdot \pi \cdot d_{ГТР} \cdot H_{ГТР} (t_{сп} - t_z)}{q_r \cdot \rho_r}. \quad (24)$$

Количество ГТР находится из отношения:

$$n = \frac{1,5 \cdot V_r^{общ}}{V_r} \quad (25)$$

где коэффициент 1,5 принят в качестве резерва для компенсации уменьшения производительности ГТР за счет снижения уровня жидкой фазы газа.

1. Клименко А.П., Козицкий В.И. Расчет коэффициентов теплоотдачи при кипении углеводородов и их галоидопроизводных. – Химическая промышленность Украины, 1967, № 1, с. 18 – 23.
2. Клименко А.П., Козицкий В.И. Экспериментальное исследование теплообмена при кипении н-бутана. – Газовая промышленность, 1967, № 6, с. 46 – 49.

УДК 697

С.Г. Михин

О.В.Медведев

Представительство компании DE-VI A/S (Дания) в России

Представительство компании DE-VI A/S (Дания) в Украине

### **КАБЕЛЬНАЯ СИСТЕМА “ТЕПЛЫЙ ПОЛ” РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТОКОВ ТЕПЛА**

*Рассмотрены вопросы эффективности применения теплоизолятора для кабельных систем подогрева поверхности пола, систем «теплый пол» и уравнения распределения потоков тепла вверх-вниз от греющего кабеля. Приведены графики распределения потоков тепла для теплоизолятора различной толщины и разных наружных температур.*

Задачу полного расчета тепловых полей в системе типа “теплый пол” можно разбить на ряд задач с упрощенной геометрией для получения в общем виде простых соотношений для численных оценок.

#### **Задача №1. Распределение тепла вверх-вниз от греющего кабеля.**

Принимаем, что кабель лежит близко к теплоизоляции.