

## **ТЕПЛОПЕРЕНОС В СУХОМ, ВЛАЖНОМ И МЕРЗЛОМ ГРУНТЕ В ОБЛАСТИ РАЗМЕЩЕНИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РЕГАЗИФИКАТОРОВ СУГ (ВНЕШНЯЯ ЗАДАЧА)**

В реальных условиях на глубинах расположения геотермальных регазификаторов СУГ, описанных в [7], грунт представляет собой многофазную полидисперсную систему со сложной капиллярно-пористой структурой, состоящей из многих компонентов.

Согласно современным положениям грунтоведения [14, 18] в его состав входят:

- минеральные порообразующие вещества, в различной степени связанные между собой и образующие твердый скелет породы (сухой грунт);
- вода (влага) в жидком агрегатном состоянии, в различной степени связанная с поверхностным слоем капилляров и пор скелета породы молекулярными или адсорбционными силами;
- вода (влага) в твердом (лед) или газообразном состоянии (пар) в зависимости от температуры грунта;
- газы, частично заполняющие капилляры и поры грунта.

В сухом грунте перенос теплоты осуществляется только молекулярной теплопроводностью [9, 11, 12].

Во влажном грунте при наличии безнапорного или напорного движения грунтовых вод к этому механизму теплопереноса добавляется конвективный теплообмен [6, 10, 12].

В грунтоведении различают два вида безнапорного движения грунтовых вод: миграцию (под действием внутренних неоднородных полей) и просачивание (под действием внешнего гравитационного поля). Напорное движение грунтовых вод под действием гравитации носит название фильтрации. Примем, что в нашем случае влиянием как безнапорного, так и напорного движений грунтовых вод на теплоперенос в грунте можно пренебречь.

Тем самым рассматриваемая задача сводится только к теплопереносу в грунте за счет теплопроводности без учета и с учетом фазовых переходов содержащейся в нем неподвижной влаги.

Имеющиеся в литературе данные об исследовании теплообмена в таких условиях базируются на теории теплообмена в дисперсных капиллярно-пористых телах, впервые разработанной А. В. Лыковым [11] и в дальнейшем развитой отечественными и зарубежными учеными в приложении к задачам теплового взаимодействия массива пород с подземными сооружениями [2, 3, 4, 5, 6, 17, 19, 20].

Основным положением этой теории является предположение, что реальный грунт, для которого характерна влажность, существенная неоднородность и анизотропность, в большинстве случаев может рассматриваться как однородное изотропное твердое тело, к которому применимо уравнение молекулярной теплопроводности при использовании аддитивных (эффективных) теплофизических характеристик, учитывающих свойства отдельных компонентов грунта.

При этом в большинстве работ, посвященных теплопереносу во влажном грунте ограничиваются рассмотрением процесса теплопроводности в массиве с естественной (полевой) влажностью  $W_e$ , под которой понимается наибольшее количество влаги, которое грунт способен удерживать в порах и капиллярах при контакте с водой и последующем стекании ее избытка в низлежащие слои под действием гравитации [8].

Естественная влажность грунта зависит от его пористости, особенности строения и свойств поверхности пор и капилляров.

Плотные кристаллические горные породы (граниты, песчаники, мергели, сланцы и т.д.) характеризуются малой пористостью и, соответственно, низкими значениями естественной влажности, не превышающими  $W_{e,\max} = 6\%$  [13]. Для таких пород грунта в последующих расчетах примем максимальное значение  $W_{e,\max} = 6\%$ .

Дисперсные породы (пески, супеси) имеют естественную влажность, изменяющуюся в широком диапазоне в зависимости от фракционного состава частиц и свойств их поверхности. Для этих грунтов обычно  $W_{e,\max} = 5...15\%$  [13]. В дальнейшем примем для таких пород  $W_{e,\max} = 15\%$ .

Коллоидные породы (глины, суглинки), благодаря весьма малым размерам составляющих их частиц, имеют большую пористость и, следовательно, характеризуются значительной естественной влажностью. Для этих пород примем  $W_{e,\max} = 20\%$  [13].

Мерзлые породы характеризуются массовой льдистостью  $J$ , представляющей собой отношение массы льда, образовавшегося при замер-

зании содержащейся в грунте влаги  $M_1$ , кг, к массе сухого образца  $M_c$ , кг, выраженное в процентах. В грунтоведении принимают, что льдистость пород тождественна их естественной влажности, что равноценно предположению о переходе всей воды в твердое агрегатное состояние при промерзании ( $J = W_c$ ) [1, 8, 14].

Теплофизические характеристики влажных (талых) и мерзлых грунтов зависят от влажности пород и определяются по принципу аддитивности с учетом теплофизических параметров воды для талых и льда для мерзлых грунтов.

Рассчитанные значения теплофизических характеристик талого ( $m$ ) и мерзлого ( $m$ ) грунта, для трех наиболее распространенных на территории Украины пород (плотного песчаника, песка или супеси и глины или суглинка) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Средние значения теплофизических свойств основных пород грунта на территории Украины

| Показатель             | Обозначение                      | Размерность                            | Плотный песчаник |             |             | Песок, супесь |             |            | Глина, суглинок |             |             |
|------------------------|----------------------------------|----------------------------------------|------------------|-------------|-------------|---------------|-------------|------------|-----------------|-------------|-------------|
|                        |                                  |                                        | сухой            | талый       | мерзлый     | сухой         | талый       | мерзлый    | сухой           | талый       | мерзлый     |
| Влажность (льдистость) | $W$                              | %                                      | —                | 6           | 6           | —             | 15          | 15         | —               | 20          | 20          |
| Плотность              | $\rho$                           | кг/м <sup>3</sup>                      | 2300             | 2500        | 2500        | 1800          | 2000        | 2000       | 1900            | 2000        | 2000        |
| Теплосмкость           | $C$                              | кДж/(кг·К)                             | 0,82             | 0,92        | 0,89        | 1,15          | 1,23        | 1,0        | 0,8             | 1,34        | 1,07        |
| Теплопроводность       | $\lambda$                        | Вт/(м·К)                               | 2,50             | 2,75        | 2,85        | 1,5           | 2,5         | 2,6        | 1,4             | 1,47        | 1,77        |
| Температуропроводность | $a \cdot 10^6$<br>$a \cdot 10^3$ | м <sup>2</sup> /с<br>м <sup>2</sup> /ч | 1,33<br>4,8      | 1,17<br>4,2 | 1,28<br>4,6 | 0,93<br>3,3   | 0,83<br>3,0 | 1,3<br>4,7 | 0,92<br>3,3     | 0,55<br>2,0 | 0,83<br>3,0 |

Положение о тождестве льдистости и естественной влажности пород в последнее время разделяется не всеми исследователями.

Так, в [8] указывается, что более близким к реальности является установленный экспериментально факт зависимости температуры замерзания грунтовой воды от степени ее связанности с поверхностью капилляров и пор породы. Исследования последних лет подтвердили положение теории о различных формах существования грунтовой воды в зависимости от силовой связи с поверхностью капиллярно-пористой структуры грунта, разработанной акад. П. А. Ребиндером и развитой его учениками.

Согласно этой теории содержащуюся в грунте влагу подразделяют на свободную и связанную [8].

Теплофизические свойства связанной влаги, содержащейся в грунте, существенно отличаются от таковых для свободной воды. В частности, температура замерзания связанной влаги в грунте отличается от температуры замерзания свободной воды.

Рыхлосвязанная вода, которой больше всего в грунте, замерзает не при  $0^{\circ}\text{C}$ , как свободная вода, а в диапазоне температур от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $-4,5^{\circ}\text{C}$  [8].

Определить долю связанной воды в грунте и степень силовой связи с поверхностью капилляров и пор можно лишь в результате лабораторных исследований образцов пород, отобранных при полевых изысканиях.

Данные, приведенные в [1], позволяют принять, что замерзание влаги, содержащейся в наиболее распространенных на территории Украины грунтах, происходит в диапазоне температур от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $-1,5^{\circ}\text{C}$ . Это положение будет использовано при дальнейшем рассмотрении влияния фазовых переходов грунтовой влаги на теплообмен геотермальных регазификаторов с влажным грунтом.

Для разработки научно-обоснованной методики тепловых расчетов при проектировании геотермальных регазификаторов СУГ необходимо решить задачу по определению их температурного режима при различных условиях эксплуатации. С этой целью необходимо найти нестационарное распределение температуры в жидкой фазе СУГ и в окружающем ГТР грунте при их тепловом взаимодействии.

Подобные задачи приходится решать для большого класса подземных сооружений, в связи с чем они достаточно подробно изучались в значительном количестве работ отечественных и зарубежных исследователей [1, 2, 3, 4, 5, 10, 17, 19, 20].

К этому классу задач в принципе сводятся работы по определению температурных режимов глубоких шахт и рудников, горных туннелей и других капитальных подземных сооружений, а также по разработке методов регулирования температуры в них посредством вентиляции или другими методами.

В 50-ых годах XX столетия в Институте технической теплофизики Академии Наук УССР академики А. Н. Щербань и О. А. Кремнев разработали ставшую классической методику расчета температурного режима подземных сооружений. Данная методика была прогрессивной для своего времени и надолго определила развитие научных основ горной теплофизики.

Предложенные ими решения задачи о тепловом режиме крупных подземных сооружений не могут быть использованы для определения нестационарных температурных полей при тепловом взаимодействии геотермальных регазификаторов СУГ с грунтом. Это объясняется спецификой устройства этих подземных сооружений и особенностями теплообмена рудничного воздуха и горных пород вокруг глубоких шахт.

Процесс теплообмена в глубоких шахтах и других крупных подземных сооружениях можно принять квазистационарным. Это позволяет решать задачу о тепловом режиме таких объектов с помощью метода, основанного на использовании коэффициента нестационарной теплопередачи.

В случае теплового взаимодействия с грунтом геотермальных регазификаторов, напротив, процессы теплообмена характеризуются значительной нестационарностью и протекают обычно на стадиях иррегулярного и регулярного режима, особенно при циклическом характере газопотребления. Поэтому использование в нашем случае коэффициента нестационарной теплопередачи физически неоправдано.

Еще один класс сооружений требует для определения температурного режима решения схожей с нашей задачи о тепловом взаимодействии с окружающим их грунтом. Речь идет о резервуарах для хранения нефти и нефтепродуктов, полностью или частично расположенных под землей в приповерхностном слое грунта на малой глубине. Такая же задача возникает при исследовании работы регазификаторов СУГ с емкостными или проточными грунтовыми испарителями, использующими теплоту окружающего грунта на глубинах 2,5...3,0 м.

Полученные для этих устройств решения в [3, 17] также не могут быть использованы в нашем случае в силу того, что температурное поле грунта на этих глубинах характеризуется значительными сезонными колебаниями вследствие близости к поверхности Земли. В зимний период температура грунта, контактирующего с теплообменными поверхностями перечисленных выше сооружений и устройств, недостаточна для обеспечения эффективного испарения органических жидкостей с высокой температурой кипения (испарения), например бутана.

Такие регазификаторы подробно описаны в [7]. Их использование в централизованных системах локального газоснабжения сжиженными газами потребителей различного назначения сопряжено со значительными расходами энергоносителей в холодное время года. В условиях высокой стоимости последних это отрицательно сказывается на экономической эффективности систем газоснабжения СУГ. Этому недостатку лишены предложенные автором геотермальные регазификаторы сква-

жинного типа [7], где испарение СУГ происходит круглосуточно за счет практически неисчерпаемой геотермальной энергии глубинных массивов пород.

Отличия конструкции геотермальных регазификаторов от традиционных устройств, предназначенных для естественного испарения СУГ, и особенности их расположения в массиве твердых пород позволяют сформулировать следующие положения физической модели теплового взаимодействия нового типа регазификаторов с грунтом:

1. Грунт представляет собой неограниченный однородный и изотропный массив, нарушенный искусственно созданной выработкой – вертикальной цилиндрической скважиной радиусом  $r_c$ , много меньше глубины  $H$ . В свою очередь глубина скважины существенно превышает глубину нейтрального слоя гелиотермозоны ( $H \gg H_{нс}$ ).
2. Рассматривается произвольное поперечное сечение скважины на глубине, достаточно удаленной от земной поверхности, но не настолько, чтобы учитывать влияние геотермального градиента. Температуру грунта здесь можно считать постоянной и существенно положительной. Расчеты и натурные измерения позволяют принять для центральных областей Украины значение естественной температуры невозмущенного массива грунта на глубинах ниже гелиотермозоны  $T_{\infty} = +14^{\circ}\text{C}$ .
3. Температура стенки скважины в нулевой момент времени теплового взаимодействия принимается равной естественной температуре невозмущенного массива грунта и независимой от глубины. Температура жидкой фазы в начальный момент принимается равной температуре ее кипения или заправки в зимний период, т.е. является заведомо отрицательной (для пропана  $t_s = -40^{\circ}\text{C}$ , для бутана, заправляемого в ГТР зимой,  $t_{зап} = -20^{\circ}\text{C}$ ).
4. Перенос теплоты в грунте и внутри жидкой фазы происходит в плоскости, перпендикулярной оси скважины. Вертикальные теплопритоки через затампированное цементом днище и верхнюю часть ГТР, занятую паровой фазой СУГ, пренебрежимо малы. Это позволяет рассматривать процессы теплопереноса в осесимметричной (полярной) одномерной постановке.
5. Перенос теплоты в грунте осуществляется молекулярной теплопроводностью. При этом теплофизические характеристики сухого, влажного (талого) и мерзлого грунта принимаются независимыми от температуры.

6. Процесс теплового взаимодействия жидкой фазы СУГ с массивом грунта в режиме хранения в ГТР сводится к ее нагреву, который сопровождается резким понижением температуры грунта в некоторой области с последующим ее восстановлением  $\epsilon$  за счет притока теплоты из массива.

Осесимметричная область теплового влияния скважины ГТР на грунт характеризуется радиусом  $r_r$ , на котором в течение всего времени коэффициент восстановления или относительная разность температур грунта не превышает наперед выбранной малой величины, например,  $\epsilon = (T_{\infty} - T_r)/T_{\infty} = 0,01$ .

7. Во влажном грунте понижение температуры на первом этапе теплового взаимодействия может на некотором радиусе достигать значений, при которых содержащаяся в грунте влага замерзает. При этом образуется льдопородный цилиндр соответствующей толщины, зависящей от влажности, температуропроводности влажного грунта и начальной температуры жидкой фазы СУГ.

8. На этапе восстановления исходного температурного поля в грунте льдопородный цилиндр будет таять, что сопровождается поглощением теплоты фазового перехода воды. Это тормозит процесс теплообмена жидкости с грунтом. На термограммах нагрева жидкой фазы СУГ появляется участок с практически неизменным в течение некоторого времени значением температуры фазового преобразования влаги  $t_{\phi}$  (область температурной депрессии).

Для определенности примем, что фазовые переходы содержащейся в грунте свободной и рыхлосвязанной влаги происходят в диапазоне температур от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $-1,5^{\circ}\text{C}$ .

При последующем решении задачи нестационарной теплопроводности с учетом фазовых переходов содержащейся в грунте влаги (задачи Стефана) это обстоятельство играет существенную роль.

Задачи о тепловом взаимодействии устройств различного типа с влажным грунтом, которое сопровождается изменением агрегатного состояния грунтовой влаги встречаются в различных технических приложениях. Это устройства для замораживания грунта при создании ледяных свай и гидрозавес, или наоборот, для размораживания массива мерзлого грунта при открытом или закрытом методе добычи полезных ископаемых или строительного материала в условиях Севера.

В полученных для этих условий решениях задачи Стефана не рассматривалось влияние изменения фаз грунтовой влаги на теплообмен грунта с жидкостью, находящейся внутри устройства. В связи с этим

указанные решения не могут быть использованы для задачи теплового взаимодействия жидкой фазы СУГ внутри ГТР с влажным грунтом с учетом фазовых переходов содержащейся в нем влаги.

Это определяет актуальность и новизну решения задачи о нестационарном температурном поле в жидкости находящейся внутри геотермального регазификатора и в окружающем ее сухом и влажном грунте, особенно в условиях фазовых превращений грунтовой влаги.

### Выводы

Рассмотрен механизм теплопереноса в сухом, влажном (талом) и мерзлом грунте, представляющем собой многофазную полидисперсную систему со сложной капиллярно-пористой структурой.

С существенными упрощающими допущениями принято, что перенос теплоты в такой системе осуществляется за счет молекулярной теплопроводности.

Особенное внимание уделено переносу теплоты во влажном грунте, где конвективной составляющей, обусловленной наличием напорного или безнапорного движения грунтовых вод, пренебрегают. Рассмотрен механизм теплопереноса, ограниченный только естественной влажностью грунта, которая зависит от пористости пород.

Отмечено, что влага, содержащаяся в грунте, подразделяется на свободную и связанную в капиллярно-пористых структурах пород поверхностными силами. Связанная влага замерзает при температурах, отличающихся от привычного  $0^{\circ}\text{C}$  (в диапазоне от  $0$  до  $-4,5^{\circ}\text{C}$ ). Это учитывалось при решении задачи Стефана для теплообмена во влажном грунте с учетом фазовых переходов содержащейся в грунте влаги.

Сформулированы положения упрощенной физической модели переноса теплоты в грунте, окружающем скважины геотермальных регазификаторов.

### Литература

1. *Васильев Л. Л., Вааз С. Л.* Замораживание грунта с помощью охлаждаемых устройств. – Минск: Наука и техника, 1986.
2. *Воропаев А. Ф.* Теория теплообмена рудничного воздуха и горных пород в глубоких шахтах. – М.: Недра, 1966.
3. *Гендлер С. Г.* Тепловой режим подземных сооружений. – Л.: Изд-во ЛГИ, 1987.
4. *Дуганов Г. В., Баратов Э. И.* Тепловой режим рудников. – М.: Госгортехиздат, 1963.

5. Дядькин Ю. Д. Основы горной теплофизики для шахт и рудников Севера. – М.: Недра, 1968.
6. Дядькин Ю. Д., Гендлер С. Г. Процессы тепломассопереноса при извлечении геотермальной энергии. – Л.: Изд-во ЛГИ, 1985.
7. Енин П. М. Централизованная система локального газоснабжения потребителей сжиженным углеводородным газом (СУГ) от геотермальных установок (ГТУ) // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. Вип. 3. – К.: КНУБА, 2001. – С. 85–98.
8. Ефимов С. С. Влага гигроскопических материалов. – Новосибирск: Недра, 1986.
9. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964.
10. Кремнев О. А., Журавленко В. Я. Тепло- и массообмен в горном массиве и подземных сооружениях. – К.: Наукова думка, 1986.
11. Лыков А. В. Явление переноса в капиллярно-пористых телах. – М.-Л.: Гостехиздат, 1954.
12. Лыков А. В., Михайлов Ю. А. Теория тепло- и массопереноса. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963.
13. Методика выбора параметров теплоаккумулирующих выработок сланцевых шахт. Руководящий документ. – Л.: Изд-во ЛГИ, 1989.
14. Сергеев Е. М., Голодковская Г. А., Зиангаров Р. С. Грунтоведение. – М.: Изд-во МГУ, 1971.
15. Стаскевич Н. Л., Вигдорчик Д. Я. Справочник по сжиженным углеводородным газам. – Л.: Недра, 1986.
16. Фролов Н. М. Температурный режим гелиотермозоны. – М.: Недра, 1966.
17. Черняк В. П., Киреев В. А., Полубинский А. С. Нестационарный тепломассоперенос в разрушаемых массивах горных пород. – К.: Наукова думка, 1992.
18. Чудновский А. Ф. Теплофизика почв. – М.: Наука, 1976.
19. Щербань А. Н., Кремнев О. А. Научные основы расчета и регулирования теплового режима глубоких шахт. – К.: Изд-во АН УССР. Т. 1 – 430 с.; Т. 2 – 347 с.
20. Щербань А. Н., Добрянский Ю. П., Травкин В. С. Нестационарный теплообмен с горным массивом, окружающим выработку // Физ.-техн. Проблемы разработки полезных ископаемых. – К.: Наукова думка, 1978. – С. 75–79.