

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РЕГАЗИФИКАТОРОВ СУГ С ВЛАЖНЫМ ГРУНТОМ ПРИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ СОДЕРЖАЩЕЙСЯ В НЕМ ВЛАГИ

С необходимостью определения нестационарных температурных полей влажного грунта при изменении агрегатного состояния содержащейся в нем влаги приходится сталкиваться в случаях, когда с грунтом вступают в тепловое взаимодействие подземные сооружения, причем среда, находящаяся внутри них, имеет температуру, противоположную по знаку температуре породного массива. Именно такая задача возникает при исследованиях теплового режима геотермальных регазификаторов СУГ скважинного типа.

Жидкая фаза СУГ, состоящая из низкокипящих компонентов, может приобретать отрицательную температуру, вплоть до температуры насыщения, в любое время года в результате испарения при интенсивном отборе паровой фазы из геотермальных регазификаторов в газовую сеть.

Например, пропан при рабочих давлениях в ГТР имеет температуру испарения (кипения), близкую к -40°C .

Бутан относится к углеводородам со сравнительно высокой температурой насыщения (кипения), при атмосферном давлении равной $-0,5^{\circ}\text{C}$. Однако в зимний период начальная температура заливаемого в ГТР бутана может быть достаточно низкой за счет его охлаждения до температуры наружного воздуха при транспортировании от газонаполнительной станции до ГТР. В последующих расчетах ее можно принять равной температуре воздуха в самую холодную пятидневку зимнего периода для центральных областей Украины $t_{\text{ж},0} = -20^{\circ}\text{C}$.

При этом начальная температура массива влажного грунта в области теплообмена с СУГ, находящимся в ГТР, положительна. Следовательно, в зоне, прилегающей к скважине ГТР, температура может опускаться до значений, соответствующих фазовым переходам грунтовой влаги, вследствие чего в процессе охлаждения грунта происходит его промерзание.

Образующаяся вокруг скважины зона мерзлого грунта имеет форму кольцевого цилиндра с радиусом промерзания r_m .

Промерзание влажного грунта сопровождается выделением теплоты фазового преобразования грунтовой влаги. Ее количество определяется влагой, содержащейся в объеме образовавшейся мерзлой зоны.

В процессе последующего прогрева этой области под действием притока теплоты из массива, льдопородный цилиндр вокруг скважины ГТР оттаивает. Таяние льда протекает с поглощением теплоты фазового перехода содержащейся в грунте влаги.

Изменение агрегатного состояния грунтовой влаги в зоне теплового влияния скважины ГТР существенно сказывается на динамике формирования нестационарного температурного поля грунта вокруг нее. В течение времени, затрачиваемого на фазовый переход влаги грунта в этой зоне, его температура остается практически неизменной. Учитывая связанность грунтовой воды поверхностными силами пористой структуры грунта, примем, что она меняется в диапазоне от $-1,5^{\circ}\text{C}$ до 0°C .

Наряду с выделением и поглощением теплоты фазовых переходов содержащейся в грунте влаги на формирование нестационарного температурного поля влажного грунта в этом случае оказывают значительное влияние изменения теплофизических характеристик мерзлого и талого грунта.

Обзор литературы, посвященной проблеме учета фазовых переходов грунтовой влаги при тепловом взаимодействии подземных сооружений с влажным грунтом, позволяет сделать вывод о недостаточном исследовании особенностей теплообмена в указанных условиях.

Исследования нестационарных температурных полей в жидкой фазе СУГ внутри скважины ГТР и в окружающем ее влажном грунте при изменении агрегатного состояния грунтовой влаги представляет несомненный научный и практический интерес.

Математическое моделирование теплового взаимодействия ГТР и влажного грунта с учетом фазовых переходов грунтовой влаги предполагало проведение серий вычислительных экспериментов для тех же сочетаний параметров, что и при исследовании теплообмена ГТР с сухим грунтом. Это позволило сопоставить результаты вычислительных экспериментов для влажного и сухого грунта с целью выявления различий между ними.

Как и ранее для сухого грунта, математическое моделирование теплового взаимодействия ГТР с влажным грунтом проводилось отдельно для скважин с радиусами $r_c = 0,5$ м и $r_c = 0,25$ м.

Пример данных, полученных в вычислительных экспериментах для скважины с $r_c = 0,25$ м представлен на рис. 1. Здесь приведены графики нестационарного распределения температуры внутри скважины с жидким пропаном и во влажном грунте (суглинке) по радиальной координате для ряда фиксированных моментов времени.

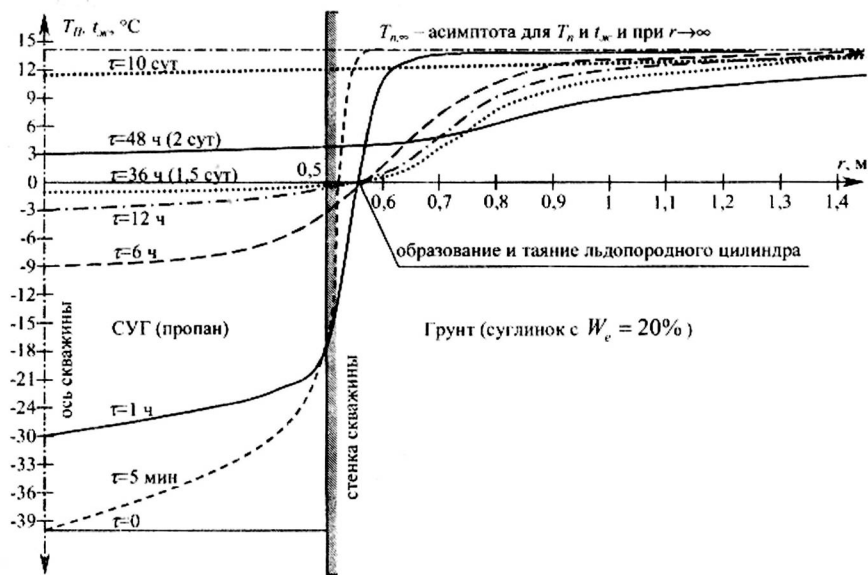


Рис. 1. Изменение температуры жидкого пропана и влажного суглинка с $W_c = 20\%$ по радиусу r , м в различные моменты времени τ , (мин, ч, сут.)

На рис. 2 приведено сопоставление графиков изменения температуры влажного грунта во времени (термограмм) для ряда фиксированных радиусов во влажном и сухом грунте для того же случая.

Из приведенных графиков следует, что при тепловом взаимодействии ГТР с сухим и влажным грунтом имеется ряд общих закономерностей. К ним относятся следующие:

- сопряжение температурных полей в жидкости и грунте для любых моментов времени происходит на стенке скважины;
- имеет место резкое падение температуры стенки скважины за счет высокой интенсивности теплоотдачи к жидкости на начальном этапе теплового взаимодействия, что приводит к деформации первоначально однородного температурного поля грунта, особенно значительной в слоях, прилегающих к стенке скважины;

– распространение деформации температурного поля сухого и влажного грунта вглубь массива происходит за счет теплопроводности, т.к. конвективной составляющей в случае влажного грунта можно пренебречь;

– изменения температуры влажного грунта вследствие теплового взаимодействия с жидкой фазой СУГ, находящейся в скважине ГТР, ограничены областью с конечным радиусом, называемым радиусом теплового влияния скважины r_i ;

– со временем температура грунта во всех точках области теплового влияния восстанавливается до значений, которые асимптотически стремятся к температуре невозмущенного массива, если отсутствует отбор паровой фазы в газовую сеть.

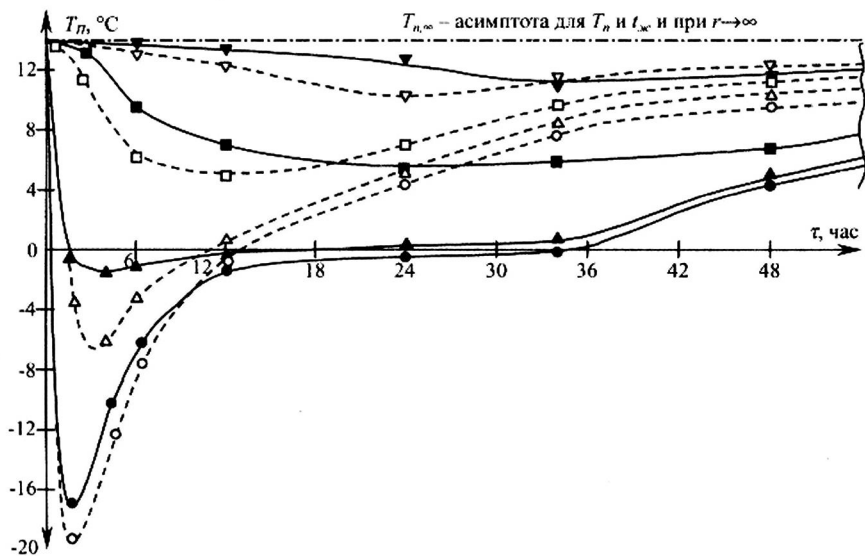


Рис. 2. Сопоставление термограмм сухого и влажного грунта (суглинка) на различных расстояниях от скважины с жидким пропаном при $t_{ж,0} = -40^\circ\text{C}$

Обозначения:

- , ○ – $R_i = 1,0$; $r_i = 0,5$ м;
- ▲, △ – $R_i = 1,1$; $r_i = 0,55$ м;
- , □ – $R_i = 1,4$; $r_i = 0,7$ м;
- ▼, ▽ – $R_i = 2,0$; $r_i = 1,0$ м.

Примечания: сплошные линии и темные значки – влажный грунт; пунктирные линии и светлые значки – сухой грунт; $R_i = r / r_c$ – относительный радиус слоя грунта.

Наряду с общими закономерностями, теплообмен жидкой фазы СУГ в геотермальном регазификаторе с влажным грунтом, обладает существенными особенностями.

Основное отличие состоит в том, что при низких начальных температурах жидкой фазы СУГ в скважине ГТР происходит промерзание грунта вокруг нее. В течение времени, необходимого для фазового преобразования грунтовой влаги, температура влажного грунта в зоне промерзания остается практически неизменной.

Длительность этого периода определяется балансом между выделением теплоты фазового перехода влаги в единице объема зоны, охваченной этим процессом, и теплоотводом от нее.

На начальном этапе теплового взаимодействия ГТР и влажного грунта, который характеризуется высокой интенсивностью теплообмена, интервал времени, в течение которого температура стенки остается постоянной, весьма мал. При выбранном на рис. 2 масштабе времени он практически незаметен. С ростом расстояния от стенки скважины этот временной интервал увеличивается.

Для большей наглядности целесообразно рассмотреть приведенные термограммы в увеличенном масштабе времени, как это представлено на рис. 3.

Темп охлаждения стенки скважины (слоя с $R_f = 1,0$) настолько высок, что в этом случае участок с практически неменяющейся за счет фазового перехода температурой, почти незаметен.

С переходом к более удаленным от стенки скважины слоям грунта этот участок на термограммах становится все более значительным.

Полученные в вычислительных экспериментах данные о нестационарном распределении температур во влажном грунте с учетом фазовых переходов содержащейся в нем влаги позволяют оценить толщину льдопородного цилиндра вокруг скважины ГТР.

Выделение значительных количеств теплоты при промерзании грунта вокруг скважины ГТР приводит к снижению степени охлаждения слоев мерзлой зоны по сравнению со случаем сухого грунта, расположенных на одинаковых расстояниях от стенки скважины.

В зоне, где в процессе деформации температурного поля грунта температуры не опускаются до отрицательных значений, и, следовательно, отсутствуют фазовые переходы влаги, расхождения между термограммами влажного и сухого грунта для одних и тех же радиусов становятся менее значительными. Это особенно ясно видно из сопоставления температур для слоев с $R_f \geq 2,0$. Здесь расхождения обусловлены различием в теплофизических характеристиках сухого и влажного грунта.

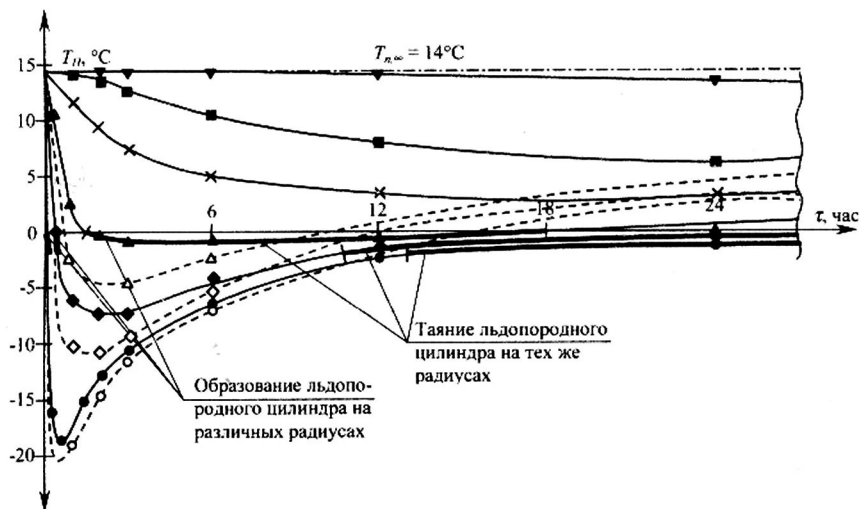


Рис. 3. Термограммы влажного грунта (супеси с $W_c = 15\%$) на различных расстояниях от скважины с $r_c = 0,5$ м, заполненной жидким пропаном при $t_{ж,0} = -40^\circ\text{C}$ (с большим масштабом временных интервалов)

Обозначения:

● – $R_i = 1,0$; ◆ – $R_i = 1,05$; ▲ – $R_i = 1,1$; × – $R_i = 1,2$;
 ■ – $R_i = 1,4$; ▼ – $R_i = 2,0$.

Примечание: светлые значки и пунктирные линии – сухой грунт

Наибольшие отличия в формировании нестационарного поля температуры влажного грунта свойственны стадии его восстановления под действием притока теплоты из массива пород. Нагрев мерзлого грунта в этой области существенно тормозится за счет поглощения значительных ее количеств при таянии льдопородного цилиндра.

Температура его здесь остается неизменной в течение достаточно длительного времени. Температура аналогичных слоев сухого грунта в этом же временном интервале монотонно возрастает.

Расхождение термограмм влажного и сухого грунта на этом этапе теплового взаимодействия с ГТР зависит от начальной температуры жидкой фазы СУГ и интенсивности теплоотвода от стенки к жидкости, определяемой теплофизическими характеристиками СУГ и радиусом скважины.

Этот вывод подтверждается графиками, приведенными на рис. 4 для чистого бутана с начальной температурой $t_{ж,0} = -20^\circ\text{C}$, которые

можно сопоставить с данными для пропана с $t_{ж,0} = -40^\circ\text{C}$, приведенными на рис. 2.

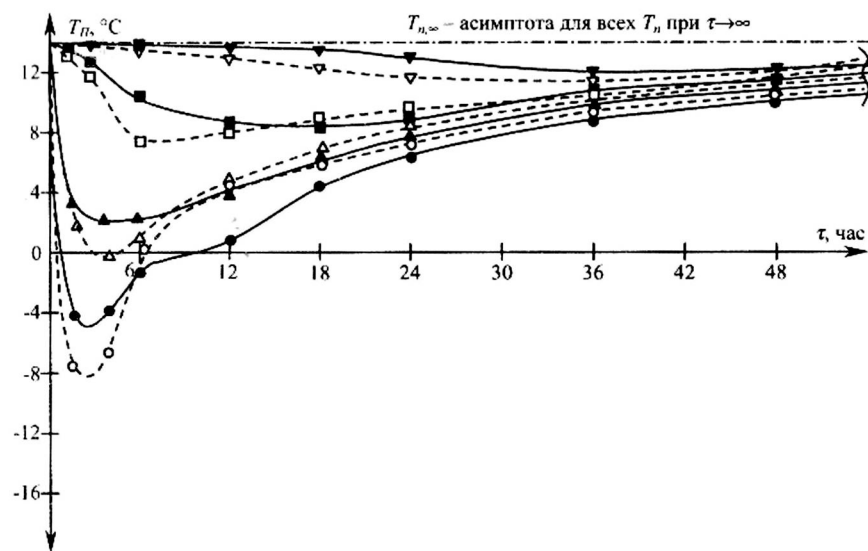


Рис. 4. Сопоставление термограмм сухого и влажного грунта (суглинка с $W_c = 20\%$) на различных расстояниях от скважины с жидким бутаном при $t_{ж,0} = -20^\circ\text{C}$. Обозначения те же, что на рис. 2

Существенные расхождения термограмм для сухого и влажного грунта свойственные лишь стадии регулярного теплообмена.

При переходе к квазистационарному режиму теплообмена СУГ любого состава и начальной температуры с влажным грунтом различия в ходе термограмм по сравнению с сухим практически исчезают.

Важным фактором, обуславливающим степень отличия в формировании нестационарного температурного поля в исследуемых условиях является влажность грунта W_c . Этот вывод следует из рассмотрения термограмм для стенки скважины с $r_c = 0,5$ м, окруженной грунтом разного породного состава с различной естественной влажностью, приведенных на рис. 5.

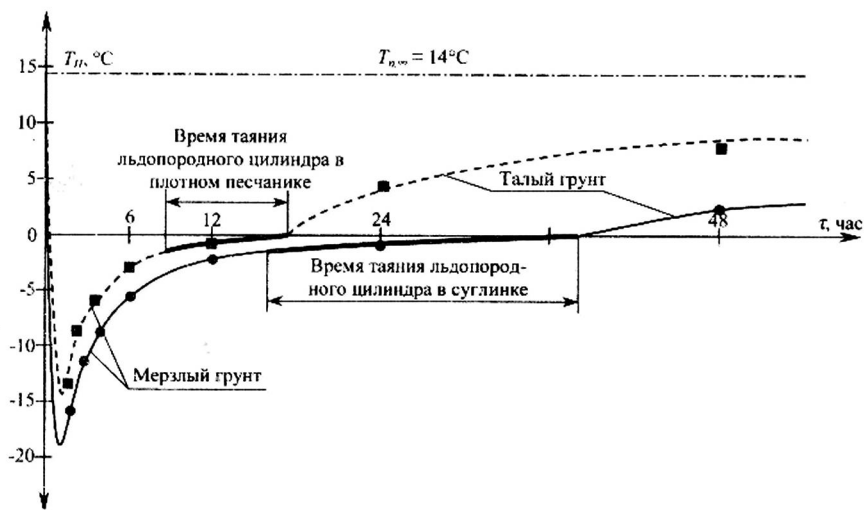


Рис. 5. Сопоставление термограмм стенки скважины с $r_c = 0,5$ м, пробуренной в грунте разной влажности W_e и заполненной жидким пропаном

Обозначения: ● – $W_e = 20\%$; ■ – $W_e = 6\%$

Как и рассмотренное ранее влияние состава СУГ и его начальной температуры на нестационарное распределение температуры во влажном грунте с учетом фазовых переходов грунтовой влаги, отличия, обусловленные разным породным составом грунта и его влажностью, проявляются сильнее всего на стадии регулярного режима теплообмена.

С выходом на квазистационарный режим теплообмена отличия в скорости нагрева грунта разных пород с различной влажностью постепенно исчезают.

На формирование нестационарного температурного поля грунта, как уже указывалось, оказывает значительное влияние интенсивность теплоотдачи от стенки скважины к жидкой фазе СУГ. При прочих равных условиях эти тепловые процессы зависят от радиуса скважины. Последний при одной и той же глубине скважины определяет ее объем, а, следовательно, и хладоемкость ГТР. От нее при прочих равных условиях зависит степень охлаждения влажного грунта и особенности изменения его температуры по радиальной координате во времени.

Для того, чтобы исследовать влияние радиуса скважины ГТР на формирование температурного поля во влажном грунте с учетом фазовых переходов грунтовой влаги были проведены вычислительные эксперименты. Получены данные, сопоставление которых приведено на рис. 6.

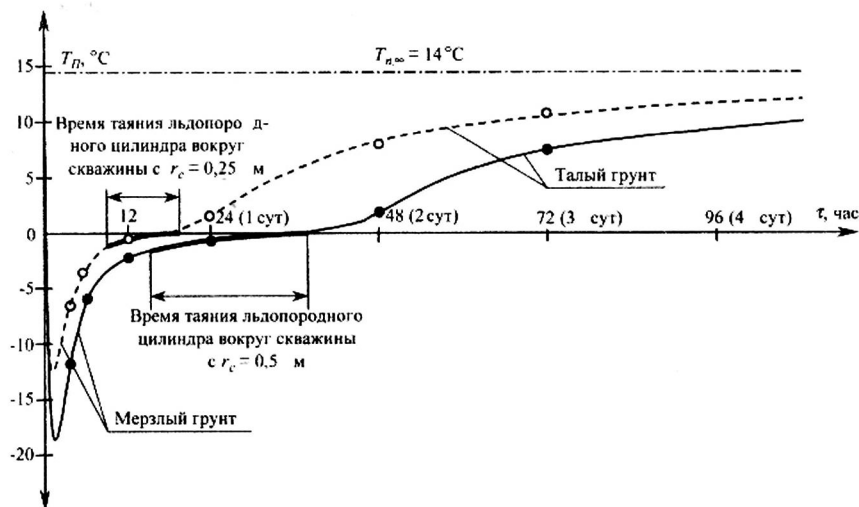


Рис. 6. Сопоставление термограмм стенки скважин с различными радиусами r_c м при тепловом взаимодействии жидкого пропана с влажным суглинком

Обозначения: ● — $r_c = 0,5$ м; ○ — $r_c = 0,25$ м

Особенности изменения температуры влажного грунта во времени с учетом фазовых переходов грунтовой влаги для скважин с разными радиусами аналогичны ранее полученным зависимостям от начальной температуры СУГ и влажности грунта.

Участок практического постоянства температуры грунта, обусловленный таянием льдопородной зоны для скважины с меньшим радиусом имеет меньшую протяженность. Это объясняется меньшей хладостойкостью такой скважины и меньшей интенсивностью теплоотдачи от стенки скважины к жидкости.

Наибольшие различия термограмм, относящихся к стенке скважин с разными радиусами, отмечаются на этапе регулярного режима тепло-

обмена. Здесь для скважины с относительно малым радиусом скорость восстановления температурного поля выше, чем при большом радиусе.

Это подтверждает вывод, что для увеличения эффективности использования геотермального регазификатора при циклическом газоснабжении потребителей целесообразно применять скважины с радиусом, не более 0,3 м (диаметром обсадной колонны не более $d_x = 600$ мм).

При достаточно длительном времени теплового взаимодействия ГТР и влажного грунта, когда теплообмен переходит в квазистационарный режим, расхождения термограмм, относящихся к скважинам с различными радиусами практически исчезают. То же можно утверждать из сопоставления данных о влиянии иных факторов на распределение температур в сухом и влажном грунте.

Отсюда следует, что радиус теплового влияния скважины ГТР во влажных грунтах, где происходит фазовые превращения содержащейся в них влаги, практически совпадает с радиусом теплового влияния для сухого грунта. В самых неблагоприятных условиях (большой радиус скважины, самая низкая температура кипения СУГ и наиболее высокая влажность грунта) относительный радиус теплового влияния не превышает значений $R_r = 5,2$, т.е. на 4% больше, чем для сухого грунта.

Указанные значения относительного радиуса теплового влияния следует учитывать при размещении скважин ГТР на площадке групповой регазификационной установки, чтобы избежать их взаимного теплового влияния.

Выполненные в ходе математического моделирования вычислительные эксперименты позволяют проанализировать влияние фазовых переходов грунтовой влаги на нагрев жидкой фазы СУГ при режиме ее хранения в геотермальном регазификаторе.

Их результаты представлены графиками на рис. 7 и 8. Здесь термограммы нагрева пропана и бутана в скважинах с радиусами $r_{c1} = 0,5$ м и $r_{c2} = 0,25$ м, пробуренных во влажном суглинке, сопоставлены с такими же графиками, полученными для сухого грунта. Из их рассмотрения можно сделать ряд выводов, имеющих большой научный и практический интерес.

Выделение теплоты при промерзании слоев влажного грунта вокруг скважин приводит к дополнительному прогреву жидкой фазы в первые моменты их теплового взаимодействия (при иррегулярном режиме теплообмена). Темп нагрева жидкости на этом этапе выше, чем в соответствующих скважинах, пробуренных в сухом грунте в те же моменты времени.

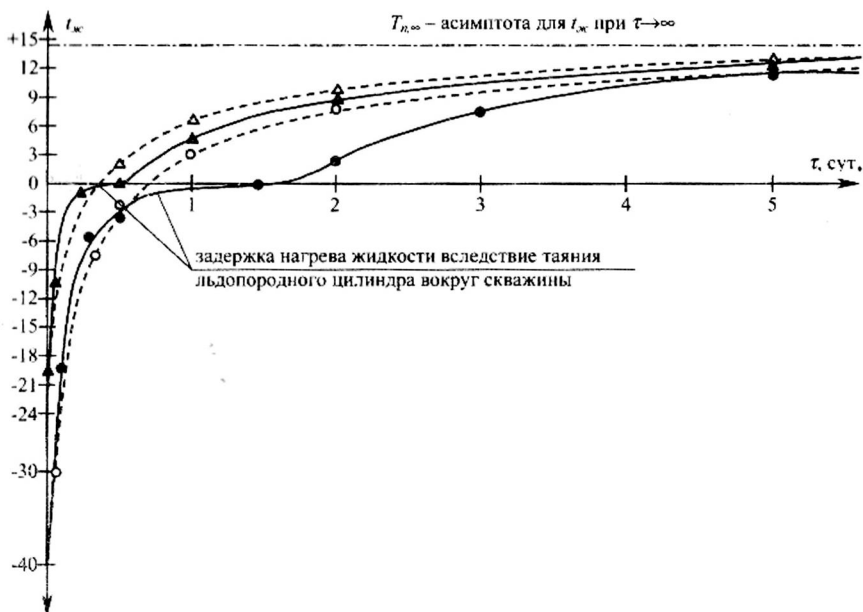


Рис. 7. Сопоставление термограмм нагрева жидкого пропана и бутана в скважине с $r_c = 0,5$ м, пробуренной в сухом и влажном грунте (суглинка с $W_c = 20\%$)

Обозначения: ●, ○ – пропан; ▲, △ – бутан; сплошные линии и темные значки – нагрев во влажном грунте; пунктирные линии и светлые значки – нагрев в сухом грунте

При переходе к оттаиванию образовавшегося льдопородного цилиндра под действием притока теплоты из массива грунта (при регулярном режиме теплообмена) за счет поглощения теплоты фазового перехода влаги нагрев жидкой фазы СУГ резко тормозится. Ее температура в течение определенного временного интервала остается практически неизменной.

В эти же моменты времени в сухом грунте температура жидкости, находящейся в скважине ГТР, монотонно возрастает.

Длительность интервала времени, когда температура жидкости практически не меняется зависит от ряда факторов: от состава и начальной температуры СУГ, породного состава грунта и его влажности. Чем ниже начальная температура СУГ и больше влажность грунта, тем длительнее этот интервал. Существенно влияет на длительность этого

интервала радиус скважины ГТР, что видно из сопоставления графиков, представленных соответственно на рис. 7 и 8 для двух радиусов $r_{c1} = 0,5$ м и $r_{c2} = 0,25$ м при прочих равных условиях.

Скважина малого радиуса обладает меньшей хладоемкостью, потому зона образовавшегося мерзлого грунта здесь тоньше, и влияние ее таяния на задержку нагрева жидкой фазы СУГ, вызванную расходом теплоты на фазовый переход влаги относительно невелико.

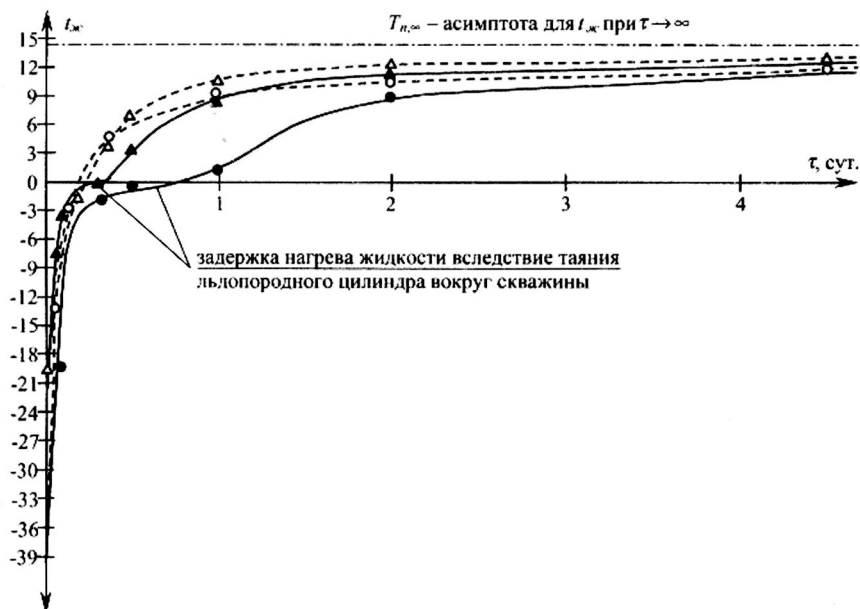


Рис. 8. Сопоставление термограмм нагрева жидкого пропана и бутана в скважине с $r_c = 0,25$ м, пробуренной в сухом и влажном грунте (суглинке $W_c = 20\%$).

Обозначения те же, что на рис. 7

Толщина льдопородного цилиндра вокруг скважин с низкотемпературной жидкостью зависит от радиуса скважин, состава СУГ и его начальной температуры, породного состава грунта и его естественной влажности.

Так, расчеты показывают, что для скважин ГТР с радиусом $r_c = 0,5$ м, пробуренной в суглинке с естественной влажностью

$W_c = 20\%$ и заполненной пропаном с самой низкой из рассмотренных начальной температурой $t_x = -40^\circ\text{C}$, толщина мерзлого слоя составляет 6,5...7,5 см.

При прочих равных условиях льдопородный цилиндр вокруг скважины ГТР с радиусом $r_c = 0,25$ м имеет толщину порядка 3 см.

Следовательно, для обеспечения эффективного нагрева жидкой фазы СУГ любого состава и начальной температуры в сухом и влажном грунте и последующего интенсивного испарения необходимо отдавать предпочтение ГТР с относительно небольшим радиусом скважины (с диаметром обсадной колонны не более 600 мм).

Этот вывод важен для выбора размеров геотермальных регазификационных установок, обеспечивающих газоснабжение потребителей с циклическим газопользованием, каковыми являются объекты жилищно-коммунального назначения, у которых длительность интервала между максимумами расхода газа в течение суток составляет 8...10 часов.

При большой продолжительности теплового взаимодействия грунта и ГТР, обеспечивающих снабжение сжиженным газом потребителей с постоянной нагрузкой, различия в скорости нагрева СУГ в скважинах, окруженных сухим или влажным грунтом, практически исчезают.

В таких случаях целесообразнее использовать ГТР с большим радиусом скважины (диаметром обсадной колонны порядка 1,0 м). При этом объем нагреваемой жидкости в ГТР будет достаточно большим, что обеспечит необходимую длительность работы геотермальных регазификаторов без дозаправки.

Выводы

Установлено, что при начальных низких температурах жидкой фазы СУГ и положительной начальной температуре массива влажного грунта в процессе деформации однородного температурного поля в зоне, прилегающей к стенке скважины, происходит фазовый переход содержащейся в грунте влаги.

Вокруг скважины образуется кольцеобразный льдопородный цилиндр, радиус которого определяется расстоянием, где в процессе охлаждения достигается температура фазового преобразования воды.

При восстановлении температурного поля льдопородный цилиндр тает, и этот процесс оказывает существенное влияние на теплообмен жидкой фазы СУГ с грунтом.

В течение достаточно продолжительного времени, несмотря на приток теплоты из грунта, температура жидкости остается практически неизменной. Принято, что часть грунтовой воды является связанной поверхностными силами капиллярных структур, поэтому замерзает при более низкой температуре, чем свободная вода (в диапазоне $-1,5 \dots 0^\circ\text{C}$).

Проанализировано влияние различных факторов на нагрев жидкой фазы СУГ с учетом фазовых переходов грунтовой влаги.

Особенно существенно ухудшение теплообмена жидкости с влажным грунтом зависит от радиуса скважины, что при одной и той же глубине равноценно объему скважины и, в конечном счете, определяет хладоемкость ГТР. В этом отношении предпочтительны ГТР с радиусом скважины порядка $r_c = 0,25 \dots 0,3$ м.