

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В СУХОМ ГРУНТЕ ВОКРУГ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РЕГАЗИФИКАТОРОВ

Целью данного исследования является получение нестационарного распределения температуры грунта по радиальной координате в области теплового влияния скважины геотермального регазификатора (внешняя задача).

Результаты исследования нестационарных температурных полей в сухом грунте при его тепловом взаимодействии с жидкой фазой СУГ в скважине геотермального регазификатора (ГТР), полученные методом математического моделирования, представлены в графической форме.

На рис. 1 представлено нестационарное распределение температуры грунта по радиальной координате для нескольких фиксированных моментов времени, относящихся к случаю теплового взаимодействия 100% н-бутана в скважине ГТР с радиусом  $r_c = 0,5$  м, окруженной сухим грунтом, состоящим из суглинка.

На рис. 2 для этого же варианта сочетаний составов СУГ и грунта приведены данные об изменении температуры грунта во времени (термограммы грунта) для ряда характерных радиусов в области теплового влияния скважины.

Аналогичный характер носят закономерности нестационарного распределения температур в грунте для других вариантов сочетания СУГ и грунта. Это дает возможность сделать некоторые общие выводы из рассмотрения приведенных графиков.

В результате теплообмена с жидкой фазой СУГ, имеющей меньшую температуру, чем грунт, в первую очередь изменяется температура стенки скважины. Она быстро снижается от начального значения, равного температуре невозмущенного массива грунта ( $T_\infty = 14^\circ\text{C}$ ) до равновесной, которая определяется в каждом случае интенсивностью теплоотдачи к жидкости.

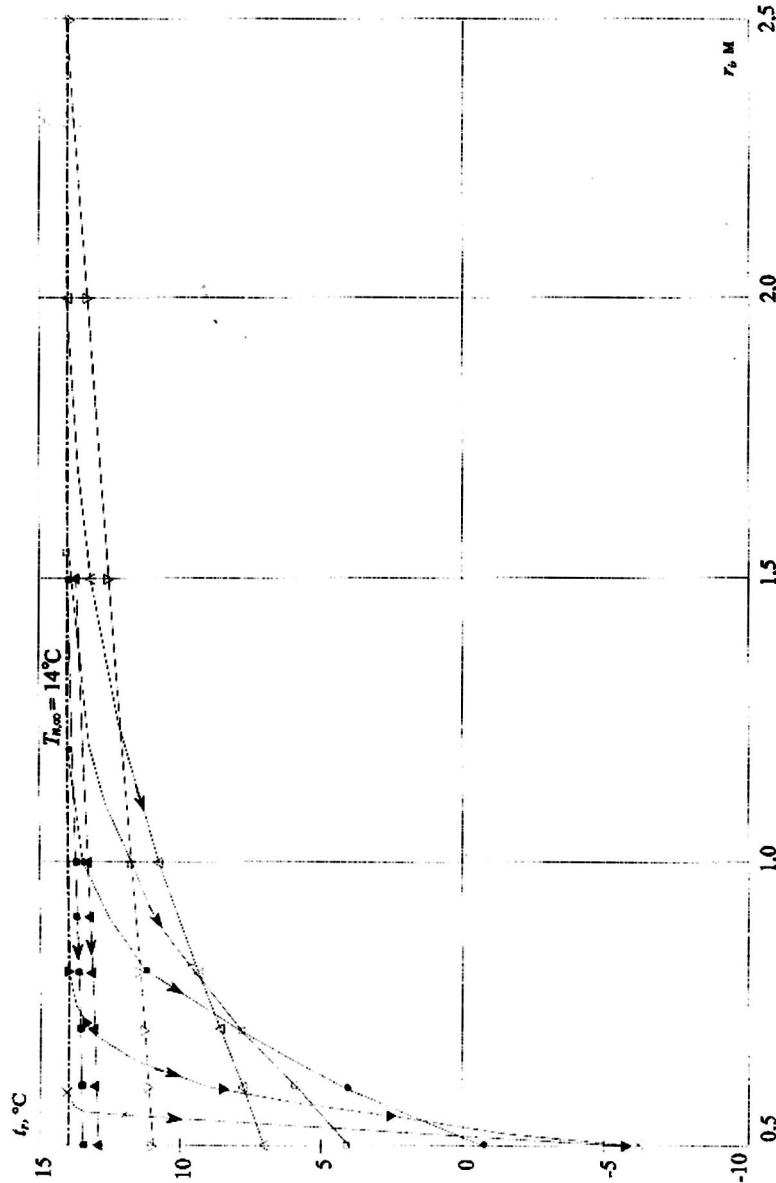


Рис. 1. Нестационарное распределение температуры грунта (суглинка) по радиусу в фиксированные моменты времени при нагреве н-бутана в скважине с  $r_c = 0,5$  м

Обозначения: X - 60 с;  $\Delta$  - 24 ч (1 сут);  $\nabla$  - 3600 с (1 сут);  $\triangledown$  - 5 сут;  $\bullet$  - 6 ч;  $\blacktriangle$  - 10 сут;  $\square$  - 12 ч;  $\blacksquare$  - 30 сут.

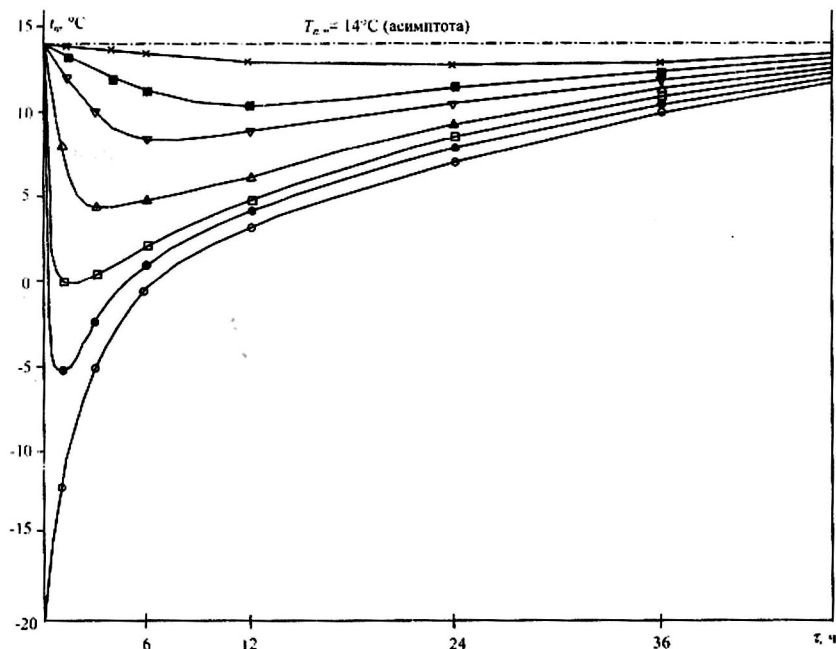


Рис. 2. Нестационарное температурное поле грунта (суглинка) на фиксированных относительных радиусах при нагреве н-бутана в скважине с  $r_i = 0,5$  м

Обозначения:

● —  $R_i = 1,0$ ; □ —  $R_i = 1,05$ ; △ —  $R_i = 1,2$ ;

▽ —  $R_i = 1,4$ ; ■ —  $R_i = 1,6$ ; × —  $R_i = 2,0$ ;

○ — температура нагрева жидкой фазы СУГ  $r_i = 0$  (на оси скважины)

С этого начинается нестационарный процесс деформации исходного однородного температурного поля грунта, окружающего скважину ГТР. Высокая интенсивность теплообмена является характерной особенностью начального, иррегулярного этапа теплового взаимодействия породного массива с жидкой фазой СУГ, находящейся в ГТР.

За счет теплопроводности грунта снижение температуры на стенке скважины распространяется на соседние, более отдаленные слои грунта. Их расположение относительно стенки скважины удобно характеризовать относительным радиусом  $R_i = \frac{r_i}{r_c}$ , где  $r_i$  — текущая радиальная координата слоя,  $r_c$  — радиус скважины ГТР.

Из графиков на рис. 1 следует, что существенное изменение температуры грунта и высокая скорость деформации его исходного температурного поля наблюдаются на стенке скважины и в слоях, непосредственно к ней примыкающих и характеризующихся относительными радиусами не более  $R_i = 1, 2$ .

С дальнейшим ростом  $R_i$  степень деформации исходного температурного поля грунта существенно уменьшается. Снижение температуры пород в этой области становится все более незначительным, а достигаемая минимальная температура с увеличением относительного радиуса достигается по истечении большего времени.

Существует также расстояние от стенки скважины (относительный радиус слоя грунта), где изменение исходного температурного поля грунта отсутствует.

Отсюда следует, что изменение температуры грунта в результате его теплового взаимодействия с жидкой фазой СУГ, находящейся в скважине ГТР ограничено областью, имеющей в плоской постановке вид концентричного со скважиной кругового кольца. Начальный радиус этой области равен радиусу скважины ГТР  $r_c$ , а за конечный принимают радиус, где во все моменты времени сохраняется исходная естественная температура невозмущенного массива. Этот радиус называют радиусом теплового влияния и обозначают  $r_i$  (соответственно относительный радиус обозначают  $R_i$ ).

Это вызвано тем, что со временем под действием притока теплоты из невозмущенного массива охлаждение грунта, окружающего скважину с низкотемпературной жидкой фазой СУГ, прекращается и наступает постепенное повышение его температуры. Процесс деформации температурного поля грунта во всех точках области теплового влияния сменяется его восстановлением.

Темп восстановления исходного температурного поля грунта определяется скоростью нагрева жидкости в скважине и расположением слоев грунта относительно стенки скважины. Чем ближе к стенке скважины располагается слой грунта, тем быстрее после снижения температуры протекает ее восстановление и тем раньше термограмма для соответствующего радиуса начинает приближаться к термограмме нагрева жидкости в скважине, также нанесенной на рис. 2.

Процесс охлаждения грунта протекает в режиме неустановившегося (иррегулярного) режима теплообмена.

С течением времени для всех радиусов в области влияния скважины процесс теплопереноса в грунте переходит в стадию регулярного режима.

Далее температура грунта во всех точках области теплового влияния асимптотически приближается к естественной температуре массива пород  $T_{n,\infty}$ , что характерно для квазистационарного режима теплообмена в грунте. Строго говоря, это произойдет на бесконечном радиусе за бесконечное время.

Принимают, что температурное поле грунта можно полагать полностью восстановленным, если на некотором конечном радиусе в некоторый конечный момент времени относительная разность температур  $\frac{T_{n,\infty} - T_{r,\tau}}{T_{n,\infty}} \leq \varepsilon_g$ , где  $\varepsilon_g$  — наперед заданная малая величина, которую на-

зывают коэффициентом восстановления. Ее целесообразно принять равной относительной погрешности современных технических средств измерения температуры, используемых для контроля производственных процессов в газоснабжении. Обычно принимают  $\varepsilon_g = 0,01$  или 1%.

Руководствуясь указанным значением  $\varepsilon_g$ , с помощью данных о распределении температуры грунта при квазистационарном режиме можно определить радиус теплового влияния скважин ГТР  $r_i$  при тепловом взаимодействии жидкой фазы СУГ с сухим грунтом.

После изложения общих положений, вытекающих из анализа полученных результатов математического моделирования теплового взаимодействия ГТР с сухим грунтом перейдем к исследованию влияния на этот процесс отдельных факторов.

На рис. 3 приведены данные об изменении во времени температуры грунта одной породы (суглинка) на стенке скважины (при  $r_i = r_c = 0,5$  м), заполненной СУГ разного состава с соответственно различной начальной температурой. В качестве примера рассмотрен случай когда в качестве грунта, окружающего скважину ГТР выбран суглинок, как наиболее типичная порода для центральных областей Украины. Рассмотрены два состава СУГ: 100% н-бутана и 100% пропана.

Из анализа термограмм грунта следует, что наибольшие различия между ними свойственны иррегулярному режиму теплообмена, где сильно влияние начальной температуры жидкой фазы СУГ (соответственно  $-20^\circ\text{C}$  и  $-40^\circ\text{C}$ ).

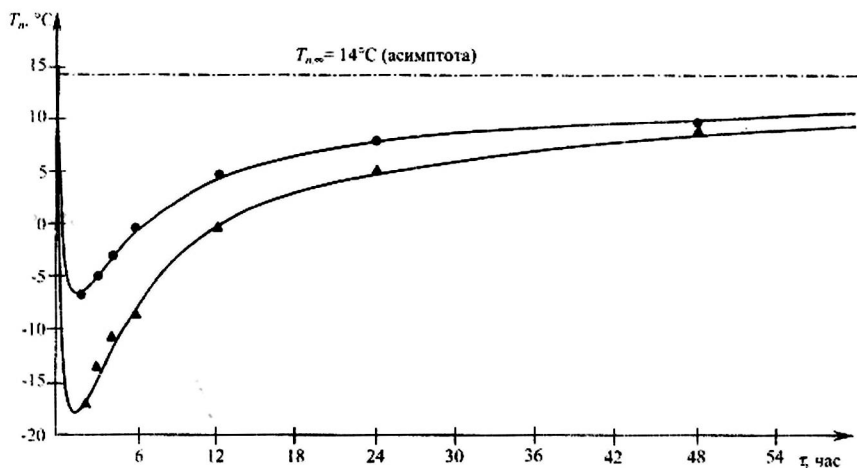


Рис. 3. Зависимости температуры стенки скважины с  $r_c = 0,5$  м от времени при тепловом взаимодействии н-бутана и пропана с суглинком  
Обозначения:

● — н-бутан с  $t_{ж,0} = -20^\circ\text{C}$

▲ — пропан с  $t_{ж,0} = -40^\circ\text{C}$

Превалирующее влияние начальной температуры жидкости на изменение температуры грунта во времени на этом этапе подтверждается также наблюдаемым уменьшением разности между термограммами на стадии восстановления температурного поля грунта, когда теплообмен переходит в регулярный режим. Особенно четко это проявляется при квазистационарном режиме. Здесь влияние состава СУГ на ход термограмм проявляется весьма слабо.

Следует отметить, что степень влияния начальной температуры СУГ на нестационарное распределение температуры грунта с увеличением относительного радиуса  $R_i$  рассматриваемого слоя существенно уменьшается.

Влияние породного состава грунта на изменение температуры стенки скважины во времени иллюстрируется на рис. 4. Здесь сопоставлены термограммы для стенки скважины с  $r_c = 0,5$  м при различных сочетаниях состава СУГ (н-бутан и пропан) и таких пород грунта как плотный песчаник (кристаллическая порода) и суглинок (коллаидная

порода), с существенно различными теплофизическими характеристиками. Третья рассматриваемая в вычислительных экспериментах порода – супесь по своим теплофизическим характеристикам занимает промежуточное положение, в связи с чем данные для варианта с ее использованием не приведены.

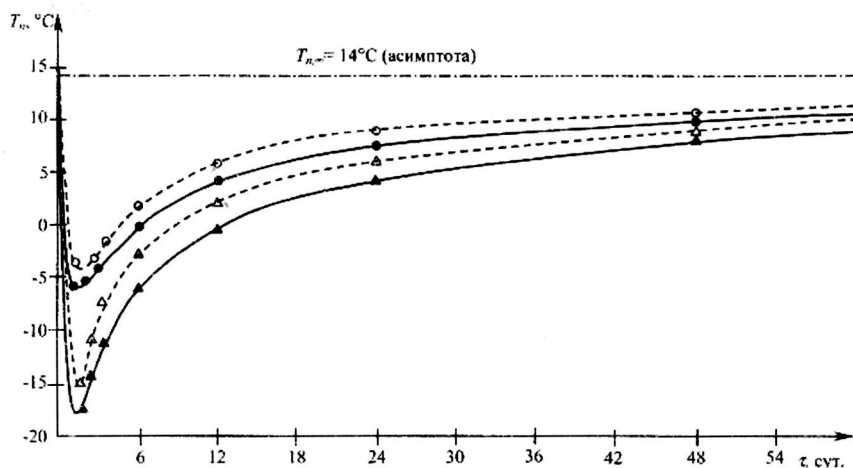


Рис. 4. Изменение температур стенки скважины с  $r_c = 0,5$  м во времени для различных составов СУГ и разных пород грунта  
Обозначения:

- – н-бутан + плотный песчаник
- – н-бутан + суглинок
- △ – пропан + плотный песчаник
- ▲ – пропан + суглинок

Согласно уравнению нестационарной теплопроводности, степень и темп изменения температуры однородного массива грунта определяются его температуропроводностью  $a_g$ . При планировании вычислительных экспериментов намеренно были выбраны породы, в наибольшей степени отличающиеся этим показателем.

Анализируя графики, приведенные на рис. 4, можно сделать вывод, что на начальном этапе теплового взаимодействия жидкой фазы СУГ с грунтом теплофизические свойства пород практически не оказывают влияния на изменение температуры стенки скважины во времени.

Лишь с переходом к экспоненциальному регулярному режиму, когда охлаждение стенки скважины и прилегающих к ней слоев грунта прекращается и начинается постепенное увеличение температуры под действием притоков теплоты из невозмущенного массива, можно наблюдать расслоение расчетных данных для одних и тех же моментов времени при различных породах грунта.

Это расслоение по мере перехода процесса теплопереноса в грунте к квазистационарному режиму сравнительно быстро уменьшается.

На рис. 5 приведены изменения температуры во времени для стенки скважин разных радиусов при нагреве н-бутана, находящегося в тепловом взаимодействии с грунтом одной породы: суглинка. Здесь выбран иной временной масштаб, дающий возможность более наглядно отобразить характер влияния ее радиуса на изменение температуры стенки скважины в области, в основном, иррегулярного и регулярного режимов теплообмена.

Из рассмотрения термограмм следует, что на стадии иррегулярного режима скорость охлаждения стенки слабо зависит от радиуса скважины (ее объема).

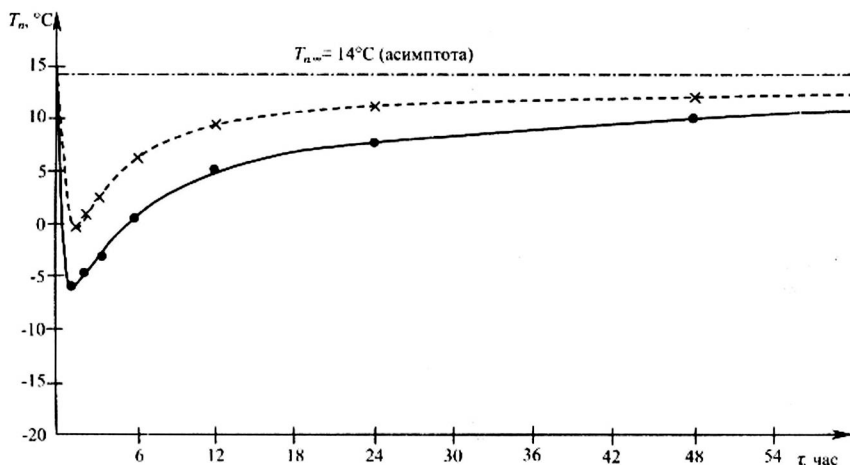


Рис. 5. Зависимости температур стенки скважины разного радиуса при нагреве н-бутана в суглинке

Обозначения:

× — скважина с  $r_c = 0,25$  м

● — скважина с  $r_c = 0,5$  м



На стадии регулярного режима степень охлаждения стенки скважины при прочих равных условиях существенно меняется в зависимости от радиуса скважины. В скважине меньшего радиуса интенсивность теплопереноса за счет естественной конвекции значительно меньше, чем в скважине большего радиуса. Это объясняется большей стесненностью движения жидкости, отрицательно влияющей на развитие турбулентного режима циркуляции в скважине.

Если учесть, что коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции определяется критерием Грасгофа  $Gr = \frac{gr^3\beta\Delta T}{\nu^2}$ , т.е. зависит от ра-

диуса скважины в кубе, то становится понятным значительное расхождение сопоставляемых термограмм при охлаждении стенки скважин с разными радиусами и прилегающих к ней слоев грунта на этом этапе.

Здесь основное влияние на изменение температуры жидкой фазы под действием притоков теплоты из массива грунта, и следовательно, на температуру омываемой ею стенки скважины оказывает величина удельной площади теплообмена, приходящейся на единицу объема жидкости  $f_{\text{уд}} = \frac{F_{\text{ГО}}}{V_{\text{ж}}}$ , 1/м. Она обратно пропорциональна радиусу сква-

жины. Поэтому жидкость и стенка скважины на этой стадии теплообмена прогреваются быстрее в скважине с меньшим радиусом.

В системе локального газоснабжения СУГ объектов жилищно-коммунального назначения отбор паровой фазы в сеть из одиночного ГТР производится циклично. В этих условиях для обеспечения рационального режима эксплуатации целесообразен максимально быстрый нагрев жидкой фазы до возможно большей температуры в периоды прекращения газоснабжения потребителей (в периоды «простоя» ГТР).

Из приведенных графиков следует, что преимущество в этом отношении принадлежит скважине с меньшим радиусом. Действительно уже через 10...12 часов после прекращения отбора газа в сеть жидкая фаза СУГ в скважине с  $r_c = 0,25$  м прогревается примерно до 10°C, чего достаточно, чтобы испарение при повторном включении ГТР в сеть происходило с высокой интенсивностью.

За это же время СУГ такого же состава в скважине с радиусом вдвое большим при прочих равных условиях нагревается всего на 3...4°C.

Представляет интерес рассмотрение влияния различных факторов теплового взаимодействия жидкой фазы СУГ и грунта на изменение

температур грунта во времени при квазистационарном режиме теплообмена.

На рис. 6 приведены расчетные данные о нестационарном распределении температуры грунта вокруг скважин с разными радиусами при расширенном временном масштабе (с длительностью нагрева жидкости до 27 сут., близкой к выбранному предельному времени теплового взаимодействия ГТР и грунта  $\tau_{пр} = 30$  сут.).

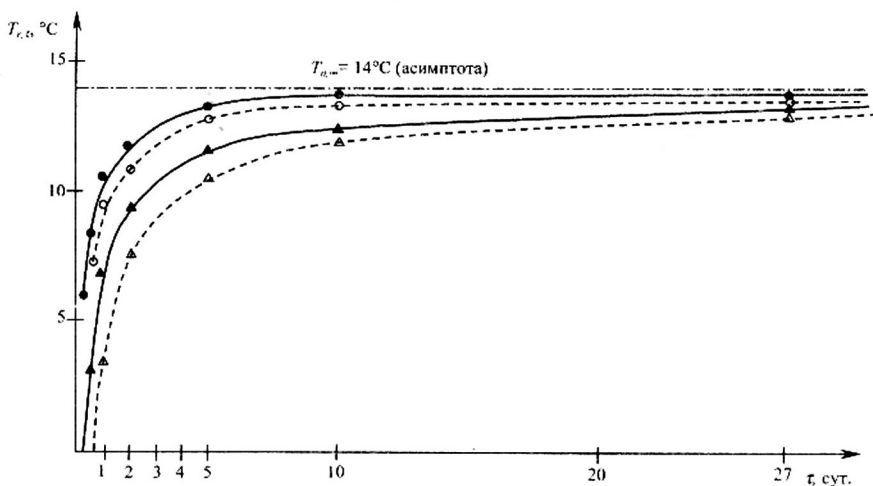


Рис. 6. Изменение температуры стенки скважин разного радиуса по времени для СУГ разного состава в области регулярного и квазистационарного режима

Обозначения:

- — н-бутан + суглинок
  - — пропан + суглинок
  - ▲ — н-бутан + суглинок
  - △ — пропан + суглинок
- } скважина с  $r_c = 0,25$  м  
 } скважина с  $r_c = 0,5$  м

На этих графиках более полно представлены расчетные данные о температуре грунта для регулярного и, в особенности, для квазистационарного режимов теплообмена массива пород с СУГ двух составов: н-бутана и пропана.

Анализируя их, можно прийти к выводу, что независимо от состава СУГ и его начальной температуры, породного состава грунта и радиуса скважин ГТР при большой длительности теплового взаимодействия

(более 10 сут.) температуры грунта вокруг скважины практически перестают зависеть от указанных факторов.

Температура грунта здесь асимптотически приближается к естественной температуре невозмущенного массива быстрее, чем температура жидкости, что обуславливает наличие небольшого по величине, но существующего весьма длительное время перепада температур между жидкой фазой СУГ и грунтом. Он в состоянии обеспечивать круглогодичное устойчивое испарение жидкой фазы СУГ при постоянном отборе газа в сеть с небольшим объемным расходом.

Такой режим работы геотермального регазификатора представляет значительный интерес в случае включения его в состав централизованной системы локального газоснабжения СУГ потребителей с постоянной газовой нагрузкой (отопительной или технологической).

Из анализа данных математического моделирования следует, что при этом предпочтительнее использовать ГТР со скважинами достаточно большого радиуса, т.к. для них перепад температур между грунтом и жидкостью в области квазистационарного режима оказывается больше и уменьшается он со временем медленнее, чем для скважины с относительно малым радиусом.

Данные о нестационарном изменении температуры грунта при квазистационарном режиме теплообмена позволяют определить абсолютное и относительное значение радиуса теплового влияния скважин ГТР  $r_i$  и  $R_i$ .

Установлено, что для всех рассмотренных случаев относительный радиус теплового влияния с точностью  $\pm 10\%$  можно принять одинаковым и равным  $R_i = 5,0$ .

Это означает, что абсолютное значение этого важного параметра теплового взаимодействия ГТР с грунтом для скважины с  $r_c = 0,5$  м составляет  $r_i = 2,5$  м, для скважины с  $r_c = 0,25$  м –  $r_i = 1,25$  м.

Размещение ГТР на производственной площадке под установку должно обеспечивать отсутствие их взаимного теплового влияния друг на друга (тепловой интерференции). Обычно скважины ГТР размещают в несколько рядов в плане, по несколько скважин в ряду. Обозначим расстояние между осями скважины в ряду  $L$ , м, а дистанцию между рядами  $B$ , м. Тогда отсутствие тепловой интерференции ГТР будет обеспечиваться при условии, что  $L = B$  и их значения принимаются больше диаметра области теплового влияния скважины ( $L \geq 2r_i$ ;  $B \geq 2r_i$ ).

С учетом установленных выше значений радиусов теплового влияния скважин для ГТР с обсадной колонной диаметром около 1000 мм расстояния между осями их скважин следует принять  $L = B \geq 2r_i \geq 5,0$ .

С запасом примем  $L = B = 6$  м.

Для ГТР с обсадной колонной диаметром порядка 500 мм  $L = B \geq 2r_i \geq 2,5$  м. С запасом можно принять  $L = B = 3$  м.

## Выводы

Исходя из представления о сухом грунте как однородном изотропном твердом теле, к которому в полной мере приложимо понятие молекулярной теплопроводности, в ходе вычислительных экспериментов получены и проанализированы расчетные данные, характеризующие нестационарное распределение температуры в нем.

Отмечаются существенные различия в изменении температуры грунта для слоев, находящихся на разном расстоянии от стенки скважины (текущей радиальной координаты). В слоях, непосредственно прилегающих к ней, происходит резкое падение температуры, зависящее от начальной температуры жидкости. Этот этап соответствует нерегулярному режиму теплообмена жидкой фазы СУГ с грунтом.

Вследствие теплопроводности деформация исходного однородного температурного поля постепенно охватывает все слои области теплового влияния скважины, причем степень деформации быстро падает с удалением от скважины.

По истечении определенного времени во всех точках указанной области деформация температурного поля сменяется его восстановлением за счет притока теплоты из невозмущенного массива грунта. Здесь теплообмен протекает в регулярном режиме.

Далее наступает квазистационарный режим теплообмена, когда во всех точках области теплового влияния скважины температура грунта асимптотически стремятся к естественной температуре глубинного массива.

Отсюда можно определить относительный радиус теплового влияния скважины с жидкой фазой СУГ, который, как показывают расчеты, равен  $R_i = 5,0$ .

На этом основании определяют расстояние между центрами скважин, обеспечивающих отсутствие тепловой интерференции.