

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ЖИДКОЙ ФАЗЕ СУГ ПРИ ТЕПЛОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РЕГАЗИФИКАТОРОВ С СУХИМ ГРУНТОМ

Целью исследования теплового взаимодействия геотермальных регазификаторов СУГ с грунтом методом математического моделирования является получение данных о нестационарном распределении температуры жидкой фазы СУГ по радиусу произвольного сечения скважины ГТР (внутренняя задача) и в окружающем грунте по радиусу ее теплового влияния в этом же сечении (внешняя задача). Данная статья посвящена анализу результатов, полученных при рассмотрении внутренней задачи.

Результаты выполненного математического моделирования теплового взаимодействия ГТР с грунтом могут быть представлены в численном или графическом виде.

Численное представление результатов исследования является более точным, но по сравнению с графическим проигрывает в наглядности, в связи с чем дальнейший анализ основан на рассмотрении графической интерпретации результатов математического моделирования.

На рис. 1 представлены графики нестационарного распределения температуры жидкой фазы СУГ различного состава по радиусу скважины с  $r_c = 0,5$  м для нескольких фиксированных моментов времени. Температура невозмущенного массива пород на глубине расположения теплообменной поверхности ГТР принята  $T_{H,\infty} = 14$  °С.

Предельное время теплового взаимодействия выбрано длительно — 30 суток = 2325600 с.

Анализ представленных графиков позволяет сделать следующие выводы о закономерностях температурного режима в жидкой фазе СУГ, находящейся внутри ГТР.

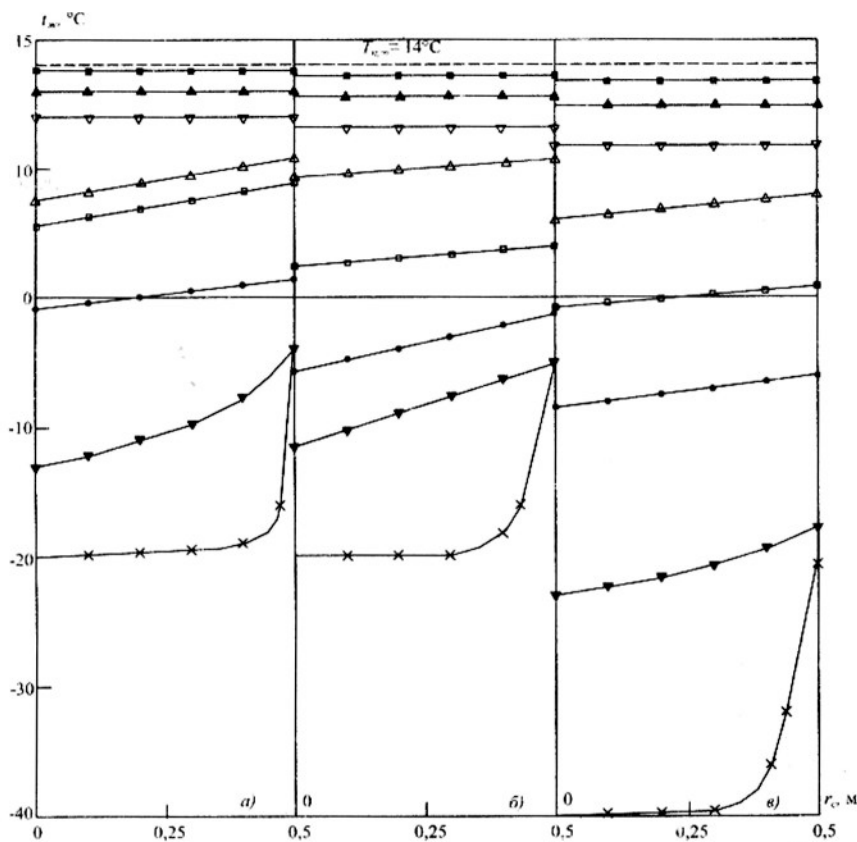


Рис. 1. Нестационарное распределение температуры жидкой фазы СУГ разного состава по радиусу скважины  $r_c = 0,5$  м, пробуренной в супеси.

Обозначения:

× - 60 с

▼ - 3600 с (1 ч)

● - 6 ч

□ - 12 ч

△ - 24 ч (1 сут.)

▽ - 5 сут.

▲ - 10 сут.

■ - 30 сут.

Примечания:

а) - Н-бутан с  $t_{w,0} = -20^\circ\text{C}$

б) - смесь 50% Н-бутана + 50% пропана с  $t_{w,0} = -20^\circ\text{C}$

в) - пропан с  $t_{w,0} = -40^\circ\text{C}$

В первые же секунды теплового контакта низкотемпературной жидкости и стенки скважины происходит резкое падение температуры теплообменной поверхности и столь же быстрый нагрев прилегающего к стенке слоя жидкости. На оси скважины жидкость в это время сохраняет начальную температуру.

Расслоение температуры жидкости по радиусу скважины в этот момент приводит к появлению различий в плотности отдельных ее слоев. В гравитационном поле более нагретые слои жидкости поднимаются вверх, менее нагретые – опускаются вниз. Возникают циркуляционные контуры, характерные для естественной конвекции, при которой быстро увеличивается теплоперенос в радиальном направлении вследствие перемешивания жидкости. Это приводит к сравнительно быстрому выравниванию температуры жидкости по радиусу скважины ГТР. Первая стадия теплообмена в жидкости, называемая неупорядоченной (иррегулярной), характеризуется сильным влиянием начальных условий и высокой интенсивностью теплопереноса. Этот режим относительно быстро переходит в упорядоченный, регулярный, который характеризуется тем, что температурные поля в жидкости становятся в последующие моменты времени подобными друг другу (автомодельными). Регулярная стадия теплообмена характеризуется экспоненциальным падением интенсивности радиального теплопереноса и замедлением нагрева жидкой фазы СУГ.

Для СУГ различного состава регулярный режим наступает через 3...4 часа с начала теплового взаимодействия с грунтом и длится до одних суток. Если отбора газа из ГТР не происходит, то через 3...4 суток нагрев жидкой фазы СУГ независимо от его состава и начальной температуры переходит в квазистационарный режим. Он характеризуется практически равномерным распределением температуры по сечению скважины и весьма слабой ее зависимостью от времени. Температура жидкости на этом этапе теплообмена асимптотически приближается к естественной температуре невозмущенного массива грунта.

Аналогичным образом распределена температура в стержне из высокотеплопроводного материала, помещенного в среду с низкой интенсивностью теплообмена на поверхности стержня, т.е. в системе с малым числом Био  $Bi = \frac{\alpha r}{\lambda}$ , когда внутреннее термическое сопротивление  $\frac{r}{\lambda}$  мало по сравнению с внешним  $\frac{1}{\alpha}$ .

На основании данных о нестационарном распределении температуры жидкой фазы СУГ можно оценить темп нагрева жидкости от на-

чальной отрицательной температуры до максимального значения, сколько угодно близкого к положительной температуре невозмущенного массива грунта, что чрезвычайно важно для выбора рационального режима эксплуатации ГТР.

Термограммы нагрева (графики изменения температуры во времени) жидкой фазы СУГ различного состава (н-бутана и пропана) с разной начальной температурой для одного радиуса скважины ГТР ( $r_c = 0,5$  м), пробуренной в суглинке, приведены на рис. 2.

На начальном этапе, при иррегулярном режиме теплообмена скорость нагрева жидкой фазы СУГ разного состава существенно различна, что объясняется влиянием различных начальных условий, а именно, резко отличающейся начальной температурой жидкой фазы.

При переходе к регулярному режиму расхождения термограмм нагрева СУГ разного состава постепенно уменьшается, а при переходе к квазистационарному режиму, различия в темпе нагрева СУГ разного состава практически полностью исчезают.

Графики на рис. 3 отражают влияние на скорость роста температуры жидкости теплофизических характеристик пород грунта, в частности, его температуропроводности.

Эта характеристика максимальна для кристаллических пород (для плотного песчаника  $a_n = 4,8 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>/ч) и минимальна для коллоидных пород (для суглинка  $a_n = 3,1 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>/ч).

Анализируя представленные графики, можно сделать вывод о том, что на стадии иррегулярного режима теплообмена влияние температуропроводности грунта сказывается на изменении температуры жидкой фазы незначительно. Здесь главным фактором являются начальные условия процесса.

С переходом к регулярному режиму наблюдается рост расхождения в темпе нагрева жидкости, обусловленный отличием теплофизических характеристик грунта, от которого жидкость получает приток теплоты.

Влияние теплофизических характеристик грунта на темп нагрева жидкости в ГТР постепенно уменьшается с приближением к квазистационарному режиму теплообмена.

Для выявления влияния на темп нагрева жидкой фазы СУГ радиуса скважины ГТР, что при одинаковой их глубине равнозначно определению влияния объема жидкости, или ее хладоемкости, проведено сопоставление данных двух серий вычислительных экспериментов.

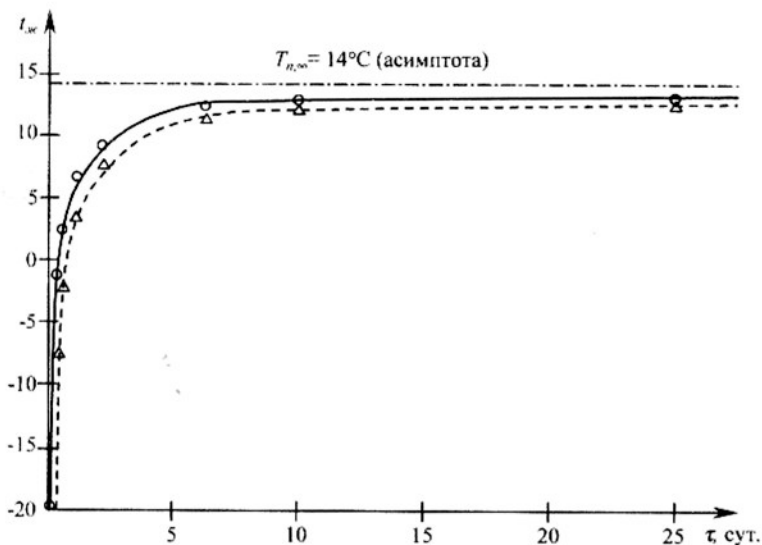


Рис. 2. Изменение температуры жидкой фазы СУГ различного состава во времени на оси скважины ГТР, пробуренной в суглинке

Обозначения:

○ – н-бутан

△ – пропан

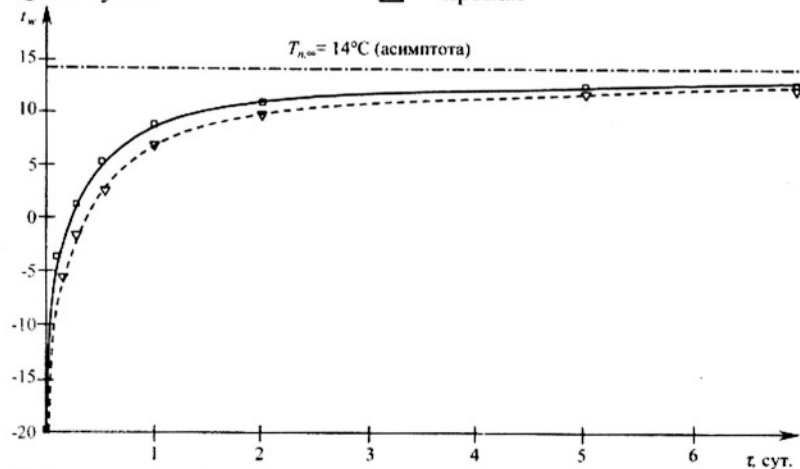


Рис. 3. Темп нагрева н-бутана при тепловом взаимодействии с грунтом разных пород

Обозначения:

□ – плотный песок с  $a_n = 4,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{ч}$

▽ – суглинок с  $a_n = 3,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{ч}$

В одной из них рассматривался нагрев н-бутана с начальной температурой  $t_{ж,0} = -20^\circ\text{C}$  в скважине с радиусом  $r_c = 0,5$  м, пробуренной в суглинке, в другой – нагрев его при прочих равных условиях в скважине с радиусом  $r_c = 0,25$  м.

Результаты сопоставления полученных термограмм представлены на рис. 4.

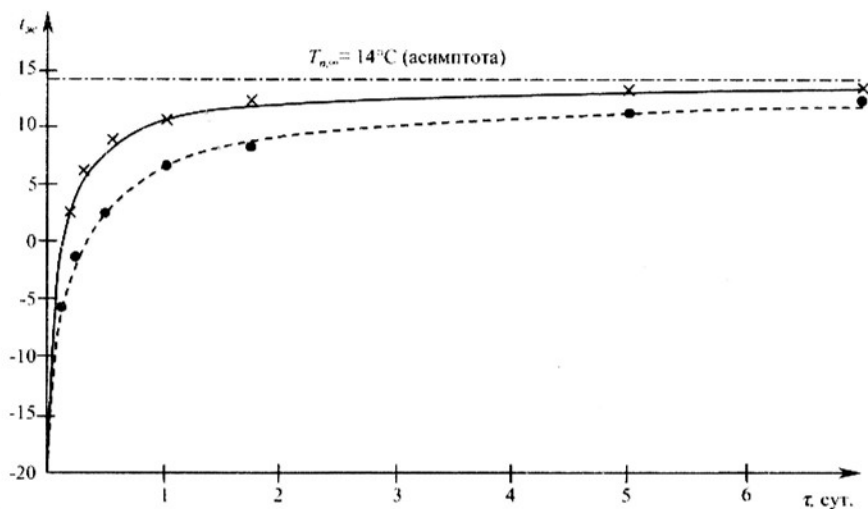


Рис. 4. Сопоставление термограмм нагрева н-бутана в скважинах с разным радиусом

Обозначения:

● – скважина с  $r_c = 0,5$  м

× – скважина с  $r_c = 0,25$  м

Анализ термограмм свидетельствует, что влияние на темп нагрева жидкости в ГТР радиуса скважины, как и ранее рассмотренных факторов, различен на разных режимах теплового взаимодействия с грунтом.

На стадии иррегулярного режима скорость нагрева жидкой фазы для скважин с разными радиусами практически одинакова.

С переходом к регулярному режиму скорость нагрева начинает в сильной степени зависеть от радиуса скважины (объема жидкой фазы или ее хладоемкости).

Нагрев СУГ в скважине с меньшим радиусом при прочих равных условиях протекает в этом режиме теплообмена значительно быстрее, чем в скважине с большим радиусом.

С выходом теплообменных процессов на квазистационарный режим отличия в скорости нагрева жидкости в скважинах с разными радиусами начинают быстро исчезать.

В результате интенсивного испарения и подачи паровой фазы в газовую сеть, температура жидкости будет падать вплоть до температуры насыщения при рабочем давлении в оголовке ГТР вследствие отбора теплоты фазового перехода СУГ.

Этот процесс определяется временем наибольшего расходования газа потребителями.

При сложившемся укладе быта населения в городах и населенных пунктах можно отметить два интервала максимального газопотребления за сутки: утром и вечером. Длительность их составляет в среднем 4...6 часов. Они отделены друг от друга периодами длительностью 8...10 часов, когда газопотребление в жилищно-коммунальном секторе минимально или полностью отсутствует.

Периоды простоя в системе локального газоснабжения СУГ целесообразно использовать для отключения от сети геотермальных регазификаторов и нагрева неиспользованной жидкой фазы в ГТР от низкой температуры насыщения (кипения) до близкой к естественной (невозмущенной) температуры массива грунта, являющейся положительной величиной. После этого можно повторить отбор паровой фазы в сеть. Он будет протекать в этом случае с максимальной эффективностью, благодаря значительному перегреву жидкости в ГТР.

Циклический характер работы ГТР, включенных в локальную систему централизованного газоснабжения объектов жилищно-коммунального назначения, особенно целесообразно использовать при сравнительно небольших радиусах скважины ГТР (при диаметрах обсадной колонны порядка  $\varnothing$  300...600 мм).

Такой вывод можно сделать из анализа влияния на темп нагрева жидкой фазы СУГ в ГТР радиуса скважины, основанного на приведенных данных рис. 4.

Представляет большой практический интерес определение скорости нагрева жидкой фазы наиболее часто используемого для газоснабжения объектов жилищно-коммунального назначения СУГ марки БТ (бутан технический), который фактически представляет собой 100% н-бутан и имеет относительно высокую температуру кипения при дав-

лении в паровой полости, несколько превышающем атмосферное. Так при давлении в оголовке ГТР 120 кПа являющимся минимальным по условию нормальной работы газовой автоматики, температура кипения СУГ марки БТ составляет, согласно кривой насыщения,  $t_s = +4^\circ\text{C}$ .

Для получения этих данных проведена дополнительная серия вычислительных экспериментов для ГТР с радиусом скважины  $r_c = 0,25$  м. В качестве окружающего скважину грунта выбрана наиболее распространенная в центральном регионе Украины порода – суглинок.

Результаты расчетов в этой серии вычислительных экспериментов в графической форме приведены на рис. 5.

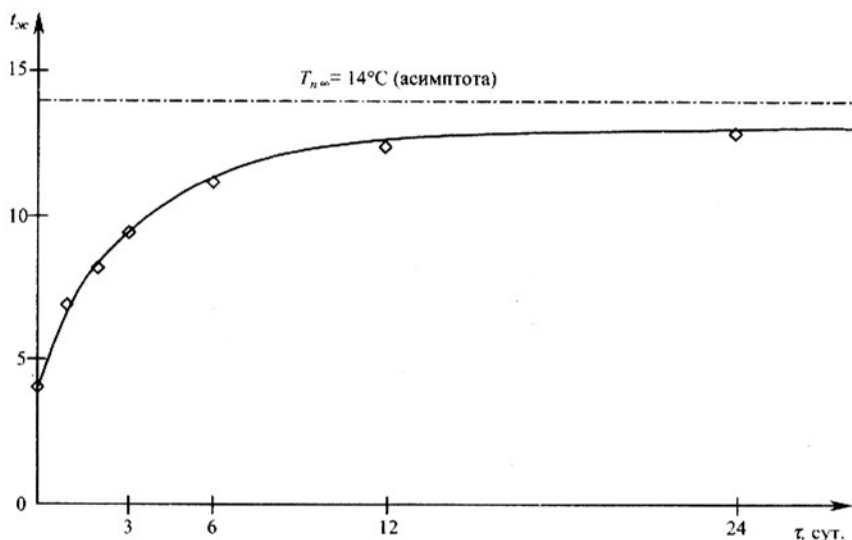


Рис. 5. Термограмма нагрева СУГ марки БТ в скважине с  $r_c = 0,25$  м, пробуренной в суглинке

Из рассмотрения полученного графика следует, что жидкая фаза СУГ марки БТ с начальной температурой  $t_{ж,0} = +4^\circ\text{C}$  под действием притока теплоты от массива суглинка с температурой  $T_{n,\infty} = 14^\circ\text{C}$  за 6...8 часов нагревается до вполне приемлемой для начала повторного эффективного испарения температуры порядка  $t_{ж,0} = 11...12^\circ\text{C}$ .



Это время близко к длительности перерыва между двумя пиками газопотребления СУГ в системе, где газ используется для бытовых нужд. В связи с этим можно заключить, что геотермальные регазификаторы могут обеспечивать эффективное и надежное испарение самых высококипящих углеводородов не только в летний, но и в зимний период, а также позволяют увеличить интенсивность испарения практически до максимума за счет рационального использования цикличности газоснабжения потребителей в жилищно-коммунальном секторе.

Другой вывод из анализа термограмм нагрева СУГ марки БТ в ГТР со скважиной относительно малого радиуса состоит в том, что спустя 12...14 часов после начала нагрева жидкости наступает квазистационарный режим теплообмена с грунтом.

Он характеризуется наличием наибольшего, но практически постоянного температурного напора между грунтом и жидкой фазой СУГ, что позволяет использовать ГТР для обеспечения газоснабжения объектов с постоянным расходом газа (потребителей с отопительной или технологической нагрузкой).

Длительность квазистационарного режима работы ГТР может составлять 3...4 недели, что вполне удовлетворяет таких потребителей. В зависимости от проектной тепловой мощности газоиспользующего оборудования, потребный объемный расход паровой фазы может быть обеспечен параллельной работой нескольких геотермальных регазификаторов в составе групповой установки.

Данные о нестационарных полях температур в грунте представляют собой исходный материал для непосредственной оценки изменения тепловых потоков на стенке скважины ГТР во времени. Зная их, можно определить интенсивность теплообмена при пузырьковом кипении углеводородов и, таким образом, определить количество теплоты, переданной жидкой фазе СУГ от грунта, и его изменение во времени. На этом основании можно оценить основную проектную характеристику геотермального регазификатора – его среднюю паропроизводительность в течение цикла газоснабжения.

Сведения о темпе нагрева жидкой фазы СУГ в режиме хранения в ГТР (без отбора паровой фазы в сеть) позволяют правильно выбрать время перерыва в газоснабжении от одиночного регазификатора, необходимое для восстановления в нем температурных условий, при которых его паропроизводительность при повторном отборе газа в сеть потребителей будет вновь максимальна. Это весьма важно для обеспечения эффективной работы геотермальных регазификаторов при циклическом характере газоснабжения потребителей.

## Выводы

В результате выполнения вычислительных экспериментов получены данные о нестационарном распределении температуры жидкой фазы СУГ по радиусу скважины ГТР в режиме ее хранения.

Отмечена зависимость указанного распределения от режимов теплообмена.

При неустановившемся (иррегулярном) режиме происходит весьма быстро прогрев тонкого слоя жидкости, прилегающего непосредственно к стенке скважины, и медленный нагрев в осевой области. Эта неравномерность нагрева жидкости приводит к возникновению естественной (свободной) конвекции, которая быстро развиваясь, приводит к выравниванию температуры по радиусу вследствие перемешивания. При регулярном режиме, при котором распределение температуры по сечению становится равномерным и слабо меняется во времени.

Достаточно быстро теплообмен в жидкости переходит в квазистационарный режим, при котором распределение температуры по сечению становится равномерным и слабо меняется во времени.

Установлено, что темп нагрева жидкости в ГТР сравнительно слабо зависит от изменения теплофизических характеристик жидкой фазы СУГ и грунта (т.е. от состава СУГ и пород массива).

Гораздо в большей степени темп нагрева жидкой фазы СУГ зависит от радиуса скважины (хладоемкости ГТР).

Данные о нестационарном распределении температуры жидкости в ГТР в режиме хранения СУГ позволяют рационально использовать цикличность газоснабжения потребителей в жилищно-коммунальном секторе для повышения эффективности испарения жидкой фазы при отборе газа в сеть.