

## НАТУРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЙ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ И СОПОСТАВЛЕНИЕ ИХ РЕЗУЛЬТАТОВ С ДАННЫМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Цель натуральных экспериментов на опытно-промышленной геотермальной установке состояла в проверке правильности принятой физической модели теплового взаимодействия жидкой фазы СУГ и грунта, приемлемости введенных при ее теоретическом описании упрощающих допущений, адекватности математического описания процессов теплопереноса при выбранных начальных и граничных условиях и, наконец, в проверке правильности схемы численного решения задачи методом конечных элементов.

В результате проведения натуральных экспериментов оценивалось соответствие данных математического моделирования теплового взаимодействия ГТР с грунтом реальному тепловому режиму системы и правомерности использования полученного в ходе вычислительных экспериментов нестационарного распределения температур в жидкости и грунте для выполнения тепловых расчетов геотермальных регазификаторов при их проектировании.

Задачей натуральных экспериментов являлось прямое измерение температур жидкой фазы СУГ внутри ГТР и массиве грунта в области теплового влияния ГТР в различные моменты времени для точек, находящихся на различных расстояниях от оси ГТР и на разной глубине.

Опыты проводились на геотермальном регазификаторе с диаметром обсадной колонны  $\varnothing 518 \times 10$  мм, что при математическом моделировании соответствовало радиусу скважины ГТР  $r_c = 0,25$  м. В качестве СУГ был выбран бутан технический (БТ), близкий по свойствам рассмотренному при математическом моделировании н-бутану. Натурные эксперименты проводились на геотермальном регазификаторе, работающем в составе системы газоснабжения СУГ потребителя с циклическим газопользованием в г. Тульчин. Объектом газоснабжения выбрано производственно-бытовое здание местной ГНС.

Исходя из поставленных задач, при проведении натуральных экспериментов необходимо в различные моменты времени выполнять измерения температуры в различных точках по глубине, а именно:

- жидкого бутана на оси ГТР;
- стенки обсадной колонны ГТР;
- грунта, окружающего скважину ГТР, на различных расстояниях от ее стенки.

Для проведения натуральных экспериментов была создана и отлажена система контроля температур с автоматической записью результатов как функции времени, для большого количества точек измерения.

Система контроля температур должна обеспечивать:

- высокую точность измерения;
- непрерывность контроля и регистрации температуры во времени;
- малую инерционность первичных приборов (чувствительных элементов);
- высокую надежность и помехоустойчивость;
- технологичность монтажа.

Учитывая невысокие температуры, подлежащие измерению, в качестве первичных приборов следует применить контактные термометры, у которых чувствительный элемент непосредственно соприкасается с измеряемой средой.

Анализ известных методов измерения температуры контактным способом показал, что в условиях планируемых натуральных экспериментов перечисленным выше требованиям в наибольшей степени удовлетворяет термоэлектрический метод (с помощью термоэлектрических преобразователей или термопар).

Достоинством термоэлектрических преобразователей (термопар) является:

- высокая точность измерения температуры;
- возможность централизации контроля показаний большого числа термопар путем присоединения их через электропереключатель к одному отъюстированному измерительному прибору;
- возможность автоматического введения единой поправки на температуру свободных концов всех термопар;
- возможность регистрирования результатов измерения температуры с помощью самописца;
- возможность раздельной градуировки термопар и общего измерительного прибора;
- стабильность и воспроизводимость термоэлектрической характеристики термопар, как правило, близкой к линейной в выбранном диапазоне температур;

- малые размеры термопар и простота их размещения на измеряемом объекте, в жидкой и твердой среде;

- относительная простота монтажа измерительных цепей.

Для обеспечения надежности измерения температуры термоэлектрическим методом должны быть решены вопросы:

- уменьшения оттока теплоты по термоэлектродам в месте крепления к измеряемому объекту;

- электрической изоляции термоэлектродов;

- защиты термоэлектродов от соприкосновения с агрессивной средой;

- механической прочности всех составляющих измерительной цепи.

Измерение термо-ЭДС вторичными приборами осуществлялось компенсационным методом с помощью потенциометра. Его основное преимущество в том, что в момент измерения ток в цепи термопары равен нулю. При этом изменение сопротивления внешней цепи при измерениях не играет никакой роли. За этот счет отпадает необходимость учитывать влияние изменения температуры окружающей среды на полученные результаты.

Современные отечественные автоматические потенциометры входят в состав комплекса самописцев типа КС. Они обладают высокой точностью и быстродействием, позволяющим использовать их для исследования нестационарных температурных полей.

Чтобы измерять температуру термопарой необходимо произвести ее градуировку, т.е. предварительно получить значения возникающей на рабочем конце термо-ЭДС для различных температур. Свободный конец термопары должен при этом находиться при температуре  $0^{\circ}\text{C}$  (в термостатированном сосуде с тающим льдом).

Составив градуировочные таблицы или графики в координатах  $t$ -ЭДС, можно определять измеряемую температуру, не прибегая к термостатированию свободных концов термопары, а лишь вводя поправки на их известную температуру.

Включение измерительного прибора в сеть термопары производилось с помощью компенсационных проводников, предназначенных для вывода свободных концов термопары в зону с контролируемой температурой. К свободным концам компенсационных линий измерительный прибор подключался с помощью соединительных проводов.

Для измерения температуры в нескольких точках использовалась схема поочередного подключения термопар к одному измерительному

прибору. При этом компенсационные проводники от всех термопар доводили до общей сборки зажимов, каждая пара которых могла поочередно подключаться к прибору с помощью электропереключателя.

Подготовка к измерению температур жидкой фазы бутана внутри резервуара ГТР и грунта на различных глубинах и расстояниях от его стенки включала в себя подбор подходящего к рассматриваемым условиям натуральных экспериментов материала термопар, их изготовление и градуировку, а также монтаж термоэлектрических преобразователей на специальных устройствах для размещения их в измеряемой среде в нужных точках по глубине и радиусу.

Для температурных условий натуральных экспериментов в наибольшей степени подходят медь-константановые термопары. Ими удобно измерять температуру не только твердых тел, но и жидких неагрессивных сред, к которым относятся сжиженные углеводородные газы.

Изготавливаемые в промышленных условиях термоэлектрические преобразователи обычно помещаются в защитные оправы в виде металлических чехлов. Это обеспечивает длительную эксплуатацию термопар в промышленных установках, но увеличивает их инерционность.

Чтобы регистрировать быстро меняющиеся температуры в процессе теплового взаимодействия ГТР и грунта, было решено использовать нестандартные термопары, изготовленные в лабораторных условиях из медь-константановых термоэлектродов.

Рабочие концы термоэлектрических преобразователей изготавливались путем сварки электрической дугой предварительно скрученных концов термоэлектродов. Во избежание появления паразитной термо-ЭДС скрутку выполняли из 3...5 витков длиной порядка 10 мм. Электрическая дуга для сварки концов скрутки образовывалась за счет контакта с электропроводным порошковым графитом при приложении необходимого напряжения от лабораторного автотрансформатора.

Изготовленные термопары были подвергнуты индивидуальной градуировке. В качестве вторичного прибора для измерения термо-ЭДС применялся электронный автоматический потенциометр типа КСП-4 класса точности 0,5. Этот же прибор впоследствии использовался для измерения температуры в натуральных экспериментах, так что он в дополнительной градуировке не нуждался.

Температура лабораторного образца (медной болванки), на котором производилась тарировка термопар, замерялась жидкостным стеклянным ртутным термометром типа ТЛ-4 с ценой деления  $0,1^{\circ}\text{C}$ . Свободные концы термопар помещались в термостатированный сосуд (термос) с тающим льдом.

Для получения отрицательных температур лабораторный образец помещался в холодильник.

На рис. 1 приведен градуировочный график, изготовленных медь-константановых термопар, имеющий практически линейный характер в большей части диапазона исследуемых температур.

Для измерения температуры в различных точках по глубине скважины в жидкой фазе СУГ на стенке обсадной колонны и в грунте термопары были собраны в гирлянды по 4 штуки в каждой с расстоянием между ними в 6 м. Термоэлектроды перед монтажом были электроизолированы с помощью глифталиевого лака, который является хорошим электро- и гидроизолятором как при отрицательных температурах, так и при нагреве до  $+180^{\circ}\text{C}$ . Каждая из термопар помимо того была помещена в хлорвиниловую трубку («кембрик») диаметром 5 мм.

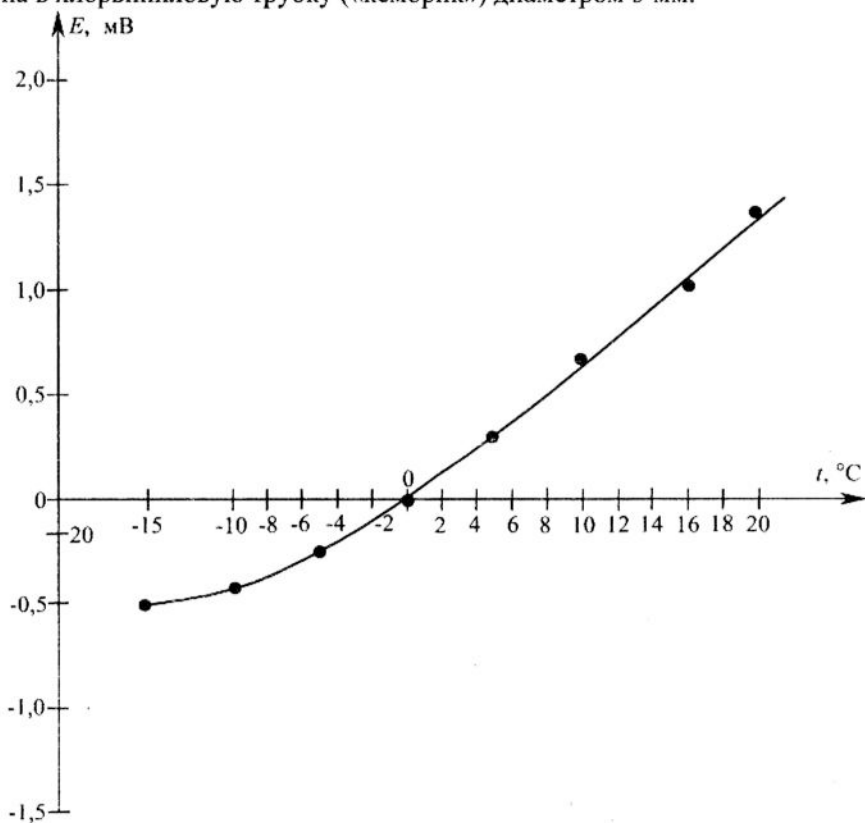


Рис. 1. Градуировочная кривая медь-константановой термопары

В процессе монтажа исправность термопар проверялась милливольтметром на обрыв, а качество электроизоляции термоэлектродов проверялось омметром.

Маркированные концы соединительных проводов термопар подключались к автоматическому потенциометру через переключатель точек измерения ПТИ-М-УЗ.

Для измерения температур жидкого бутана в скважине ГТР термопары устанавливались на штанге из стальной трубы  $\varnothing 28 \times 3$  мм длиной 50 м, которая крепилась по оси обсадной колонны.

Для измерения температуры стенки обсадной колонны рабочие концы термопар в соответствующих точках по ее длине заделывались путем зачеканивания под стружку на наружной поверхности. Во избежание механических повреждений при опускании обсадной колонны в скважину гирлянда термопар была защищена приваренным снаружи стальным уголком  $45 \times 45$  мм.

Термопары на зондах, с помощью которых измерялась температура грунта на различных глубинах, размещались в хлорвиниловой оболочке внутри стальной трубы  $\varnothing 28 \times 3$  мм длиной 40 м. После монтажа термопар такие зонды опускались в параметрические скважины, пробуренные на расстоянии 0,5 и 1,0 м от стенки ГТР.

Соединительные линии от всех термопар к вторичному прибору были проложены открытым способом по кратчайшему пути с обеспечением их надежной изоляции. В месте присоединения компенсационных проводов к соединительным был обеспечен контроль температуры жидкостным стеклянным спиртовым термометром с ценой деления  $0,5^{\circ}\text{C}$ . Его показания использовались для оценки поправки к показателям термопар.

Электроизмерительный прибор (потенциометр КСП-4) был установлен в сухом отапливаемом помещении и заземлен. Его питание производилось от осветительной сети напряжением 220 В. В этом же помещении располагался многоточечный переключатель термопар.

Результаты измерения температуры заносились в журнал наблюдений, куда записывались измеренные потенциометром значения термо-ЭДС  $E'$ , мВ. Действительное значение термо-ЭДС определялось по формуле:

$$E = E' + \Delta E_1 \pm \Delta E_2, \text{ мВ},$$

где  $E$  – действительное значение измеряемой термо-ЭДС, мВ;

$E'$  – значение термо-ЭДС, полученное в результате каждого измерения в ходе эксперимента, мВ;

$\Delta E_1$  – основная поправка потенциометра по паспорту, мВ, для КСП-4  $\Delta E_2 = 0,1$  мВ;

$\Delta E_2$  – поправка на температуру свободных концов термопар, определяемая по тарировочной характеристике термопар.

Температура измеряемой среды определялась по полученному действительному значению термо-ЭДС  $E$ , мВ с помощью градуировочного графика.

Истинное значение температуры в каждой исследуемой точке определялось как среднearифметическое значение  $\bar{T}$  не менее 3-х измерений.

Из результатов измерений следует, что температура жидкого бутана по глубине скважины практически постоянна. Средние температуры СУГ на глубинах 16, 28 и 34 м различаются на величины, находящиеся в пределах среднеквадратичной погрешности измерения, которая оценивается величиной  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Это подтверждает положение теоретического анализа о практическом отсутствии вертикального теплопереноса в системе ГТР – грунт.

Экспериментальные значения температур жидкого бутана на оси ГТР в различные моменты времени удовлетворительно совпадают со значениями, предсказанными для центра скважины при математическом моделировании.

Это положение иллюстрируется графиком на рис. 2. На нем в области температур фазового перехода грунтовой влаги прослеживается предсказанная теоретически задержка в нагреве жидкого бутана.

Совпадает по времени также предсказанный теоретически переход теплообменных процессов в стадию квазистационарного режима, когда температура жидкости асимптотически стремится к температуре невозмущенного массива грунта.

Сопоставление опытных и теоретических значений температур стенки скважины (обсадной колонны) для тех же фиксированных моментов времени проиллюстрировано графиком на рис. 3.

На этапе нагрева стенки ГТР опытные точки систематически располагаются ниже кривой, построенной по результатам математического моделирования. Очевидно, это объясняется тем, что значительно более теплопроводная, чем грунт, реальная стальная обсадная труба охлаждается сильнее, чем предсказывает теория для стенки скважины.

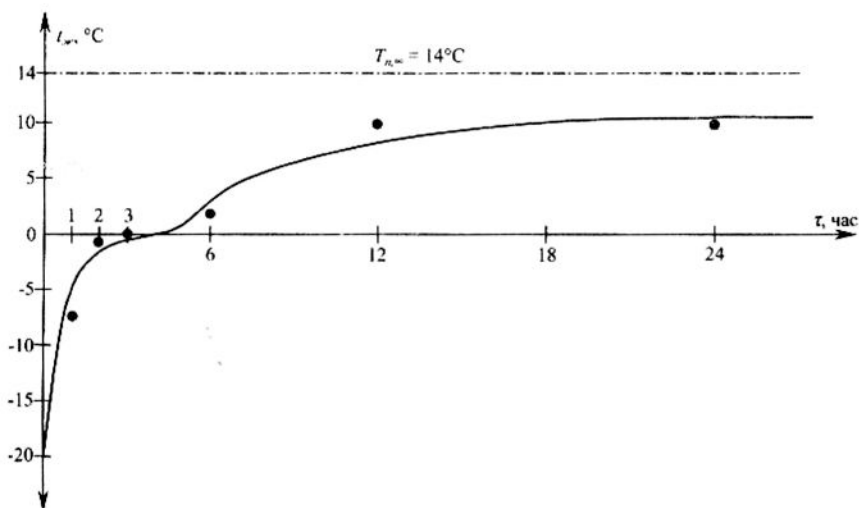


Рис. 2. Сопоставление результатов натуральных экспериментов и математического моделирования по изменению температуры бутана во времени на оси ГТР

Обозначения: — — зависимость  $t_{ж,r=0} = f(\tau)$  по результатам математического моделирования, • — результаты измерения температуры бутана на оси ГТР в натурном эксперименте,

В целом же изменение температуры стальной обсадной трубы во времени полностью подчиняется закономерностям, полученным при математическом моделировании теплового взаимодействия геотермального регазификатора с влажным грунтом при весьма низких значениях начальной температуры СУГ.

Образовавшийся в процессе резкого снижения температуры стенки ГТР и прилегающих к ней слоев грунта льдопородный цилиндр при восстановлении исходного температурного поля существенно ухудшает теплоперенос к жидкой фазе СУГ. Это происходит вследствие таяния и поглощения при данном процессе значительных количеств теплоты, которая притекает из невозмущенного массива грунта.

Различия между опытными и теоретическими значениями температуры стенки обсадной трубы скважины характеризуются величиной порядка 15...20%, что для условий натурального эксперимента является приемлемым.



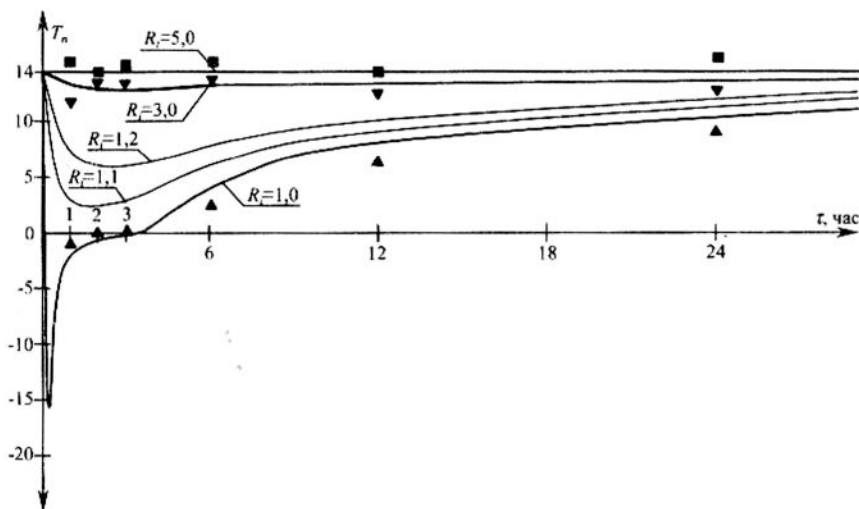


Рис. 3. Сопоставление результатов натуральных экспериментов и математического моделирования по изменению температуры влажного суглинка во времени на различных относительных радиусах  $R_i = r_i/r_c$

Обозначения: — — термограммы грунта по результатам математического моделирования,  $\blacktriangle$  — результаты натурального эксперимента для  $R_i = 1,0$  (стенка ГТР),  $\blacktriangledown$  — тоже для грунта при  $R_i = 3,0$  ( $r_i - r_c = 0,5$  м),  $\blacksquare$  — тоже для грунта при  $R_i = 5,0$  ( $r_i - r_c = 1,0$  м)

Данные прямых измерений температуры грунта с помощью зондов, которые размещаются в специальных скважинах на различных расстояниях от стенки ГТР, подтверждают результаты теоретического анализа изменения температуры влажного грунта во времени.

Экспериментальные точки с приемлемой точностью ложатся на кривые, построенные по результатам математического моделирования для соответствующих радиусов, что наглядно видно из рис. 3.

Полученные в натурном эксперименте данные подтвердили теоретический прогноз о том, что наиболее существенные изменения температуры грунта происходят в слоях, находящихся в непосредственной близости от стенки скважины, которые характеризуются относительными радиусами не более  $R_i = 1,2 \dots 1,3$ .

На расстоянии от стенки скважины с  $r_c = 0,25$  порядка 1,25 м и более (при  $R \geq 5$ ) тепловое воздействие на грунт жидкой фазы СУГ, ох-

лажденной до  $-20^{\circ}\text{C}$ , практически исчезает, что согласуется с теоретически предсказанным радиусом теплового влияния для ГТР указанного диаметра.

Натурные эксперименты показали, что принятая при теоретическом рассмотрении задачи физическая модель теплового взаимодействия ГТР с грунтом, в том числе и влажным, является достоверной.

Интенсивность теплообмена как в жидкости, так и в грунте оценена близко к действительной, так как полученные при математическом моделировании нестационарные температурные поля в этих средах практически совпали с измеренными в натурных экспериментах.

Принятые при математическом описании процесса нестационарной теплопроводности в двух средах начальные и граничные условия адекватно представляют реальную картину теплопереноса в рассматриваемых условиях.

Схема вычислений для получения нестационарных температурных полей при тепловом взаимодействии ГТР и грунта с использованием метода конечных элементов (МКЭ) доказала свою эффективность. В результате вычислительных экспериментов получен большой массив данных, отражающих влияние основных факторов процесса на формирование температурного режима СУГ в ГТР и окружающего грунта. Закономерности этого влияния, выведенные на основании математического моделирования подтверждены данными натурных экспериментов.

Дополнительным подтверждением правильности принятой физической модели теплового взаимодействия ГТР и грунта, а также адекватности ее математического описания и достоверности данных, полученных в результате вычислительных экспериментов с использованием метода конечных элементов (МКЭ), является хорошее совпадение теоретически предсказанной и измеренной в натурных опытах паропроизводительности геотермального регазификатора с диаметром порядка 500 мм.

Их сопоставление для случаев работы ГТР в циклическом режиме газоснабжения (в г. Тульчин) и постоянном газоиспользовании в котельной с газовыми котлами (в г. Немиров) приведено на рис. 4.

В обоих случаях определение паропроизводительности ГТР (объемного часового расхода газа) в натурных экспериментах выполнялось с помощью газовых счетчиков класса I с дистанционной передачей данных на центральный пункт для записи ее изменений во времени.

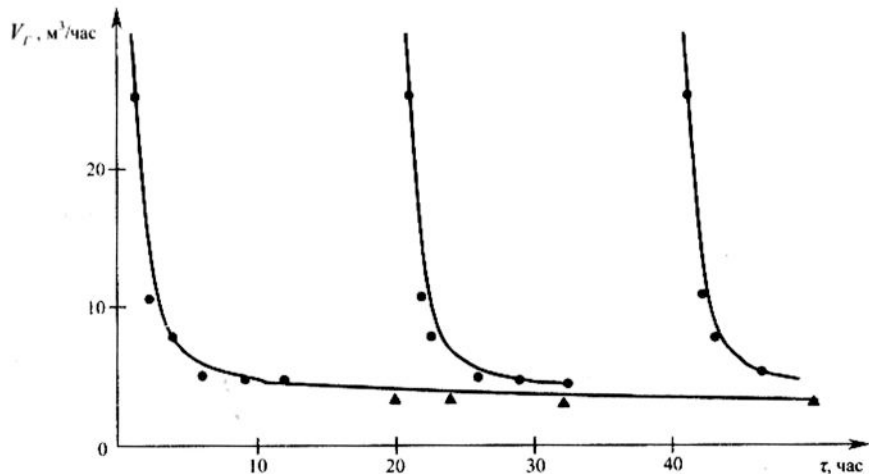


Рис. 4. Сопоставление расчетных и опытных значений паропроизводительности ГТР

Обозначения: — — расчетные значения; ● — опытные данные при циклическом режиме газоснабжения (г. Тульчин); ▲ — опытные данные при постоянном режиме газоснабжения (г. Немиров).

В качестве примера на рисунке приведены закономерности изменения паропроизводительности для 3 циклов газопотребления, между которыми газ практически не использовался. Жидкая фаза СУГ в этот период прогревалась до температуры, близкой к естественной температуре глубинного массива грунта, после чего цикл испарения повторялся.

Высокая интенсивность испарения СУГ на начальном этапе процесса обусловлена его протеканием в иррегулярном режиме, который быстро переходит в регулярную стадию. Она характеризуется экспоненциальным падением интенсивности теплообмена жидкости и грунта, что приводит к резкому падению паропроизводительности.

При постоянном газоиспользовании процесс теплообмена СУГ и грунта протекает в квазистационарном режиме, при котором паропроизводительность практически не изменяется во времени.

Результаты математического моделирования целесообразно использовать для разработки научно обоснованной методики теплового расчета геотермальных регазификаторов и прогнозирования их паропроизводительности при проектировании. Теоретические исследования

сложного процесса теплового взаимодействия ГТР с грунтом, подкрепленные данными натуральных экспериментов, позволяют осознанно выбирать рациональные режимы эксплуатации геотермальных регазификаторов как при цикличном, так и при постоянном газоснабжении потребителей СУГ.

### Выводы

Для проверки правильности принятой физической модели теплового взаимодействия СУГ и грунта, адекватности математического описания процессов теплопереноса при выбранных начальных и граничных условиях и эффективности схемы численного решения системы уравнений методом конечных элементов предпринято проведение натуральных экспериментов на опытно-промышленных геотермальных регазификаторах в городах Тульчин и Немиров Винницкой области.

В задачи натуральных экспериментов входило измерение температур жидкой фазы СУГ, стенки обсадной колонны и грунта на различных расстояниях от скважин ГТР в различные моменты времени на различных глубинах.

Опыты проводились при нагреве бутана, грунт состоял из влажного суглинка.

Измерения температур выполнялось с помощью медь-константовых нестандартных термодпар, подвергавшихся индивидуальной тарировке.

Сопоставление расчетных и опытных значений соответствующих температур свидетельствует об их хорошем совпадении.

Дополнительным подтверждением правильности теоретических предпосылок и полученных на их основе данных о нестационарном распределении температур в жидкости и грунте является хорошее совпадение расчетных и экспериментальных значений паропроизводительности ГТР при цикличном и постоянном газоснабжении объектов.