

СУЩНОСТЬ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПЛАНИРОВАНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИЗУЧЕНИЮ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РЕГАЗИФИКАТОРОВ

Исследование физических и технико-технологических процессов может осуществляться экспериментально или аналитически.

Экспериментальные исследования проводятся как на реальных объектах (натурные эксперименты), так и на их лабораторных моделях (лабораторные исследования). Часто их проведение наталкивается на серьезные технические трудности и экономические проблемы.

Указанных недостатков лишены аналитические методы исследования. Однако их использование в явном виде возможно лишь при наличии адекватного математического описания процесса, которое имеет решение в замкнутой форме. Как правило, процессы, представляющие интерес для технического применения, чрезвычайно сложны. Даже в существенно упрощенном виде они, как правило, описываются незамкнутой системой дифференциальных уравнений с большим количеством независимых переменных при различных начальных и граничных условиях. Указанное обстоятельство редко позволяет решать подобные задачи чисто аналитическим способом [1].

В таких случаях обычно прибегают к численным решениям системы дифференциальных уравнений, которые дают хорошее приближение к истинному значению функции за счет использования искусственных математических приемов [6].

Численные решения системы дифференциальных уравнений связаны с чрезвычайно большим объемом вычислений. Их широкому применению при решении задач в различных областях науки и техники в значительной степени способствовал стремительный прогресс в увеличении быстродействия современных электронных вычислительных цифровых машин (ЭВЦМ), а также в разработке комплексов их программного обеспечения.

На основе численного решения задач с использованием ЭВЦМ в последнее время интенсивно развивается новое направление в исследовании сложных научно-технических проблем – математическое моделирование [2].

Сущность математического моделирования состоит в использовании возможностей быстродействующих ЭВМ при проведении вычислительных экспериментов, в результате которых получают численные решения задачи при варьировании основных независимых переменных. Таким образом получают данные, выявляющие влияние интересующего параметра на изучаемый процесс.

Для численного решения задачи о тепловом взаимодействии геотермальных регазификаторов СУГ с грунтом выбран метод конечных элементов как основной инструмент математического моделирования [3].

Задача вычислительных экспериментов состоит в получении данных о влиянии основных факторов на нестационарное распределение температуры как в жидкой фазе СУГ, находящейся в скважине ГТР, так и в окружающем ее грунте. Эти данные являются основой для определения тепловых потоков от массива грунта к жидкой фазе СУГ и дальнейшего исследования тепловых процессов в режиме хранения и испарения СУГ, которые необходимы для проектирования геотермальных установок и рационального выбора их эксплуатационных характеристик.

Для экономного использования машинного времени и получения при этом исчерпывающих данных о роли каждого из параметров теплового взаимодействия ГТР с грунтом вычислительные эксперименты необходимо рационально спланировать.

Представляется целесообразным провести вначале математическое моделирование теплового взаимодействия ГТР с сухим грунтом. Помимо того, что этот случай представляет самостоятельный научный и практический интерес, его можно рассматривать в качестве базового. С ним впоследствии можно сравнивать данные, полученные для теплообмена ГТР с влажным грунтом для изучения влияния на процесс грунтовой влаги и ее фазовых переходов (замораживания и оттаивания).

Чтобы получить сведения о влиянии радиуса скважины на процесс теплового взаимодействия жидкой фазы СУГ с грунтом, следует запланировать проведение вычислительных экспериментов со скважинами по меньшей мере двух радиусов: $r'_c = 0,5$ м и $r''_c = 0,25$ м.

Согласно рассмотренной ранее физической модели, основными независимыми факторами теплового взаимодействия с грунтом скважины ГТР с фиксированным радиусом являются:

- температура массива грунта $T_{n,\infty}$ на глубинах размещения активной теплообменной поверхности ГТР (ниже нейтрального слоя гелиотермозоны);

- начальная температура жидкости $t_{ж,0}$, характерная для жидкой фазы СУГ выбранного состава;
- состав СУГ и теплофизические характеристики его жидкой фазы;
- породный состав грунта и его теплофизические характеристики.

При планировании вычислительных экспериментов составлялись варианты с различными сочетаниями состава СУГ и породного состава грунта.

Для выявления влияния теплофизических свойств жидкой фазы СУГ на тепловое взаимодействие ГТР с грунтом планировалось рассмотреть три состава СУГ:

- 100% н-бутан;
- смесь из 50% н-бутана и 50% пропана;
- 100% пропан.

Теплофизические характеристики (ТФХ) жидкой фазы перечисленных индивидуальных сжиженных углеводородных газов определялись по справочнику [5], а для смеси их значения рассчитывались как средневзвешенные.

Начальные температуры жидкой фазы СУГ соответствующего состава, от которых начинается нагрев жидкости в ГТР за счет притоков теплоты из грунта, приняты при проведении вычислительных экспериментов из следующих соображений.

Эти температуры целесообразно выбирать максимально низкими, какие могут быть в процессе эксплуатации геотермальных регазификаторов СУГ.

Таковыми для пропана и рассматриваемой смеси н-бутана и пропана являются температуры насыщения (кипения), до которых эти СУГ могут охладиться за счет испарения при интенсивном отборе паровой фазы в газовую сеть (при давлениях на границе раздела фаз, близких к атмосферному). При этом чистый пропан имеет температуру насыщения, которую, округляя, можно принять $t_{ж,0} = -40\text{ }^\circ\text{C}$, а смесь – соответственно $t_{ж,0} = -20\text{ }^\circ\text{C}$ [5].

Чистый н-бутан за счет испарения при давлении, близком к атмосферному, может охладиться до температуры насыщения, имеющей сравнительно высокое значение ($t_s = -0,5\text{ }^\circ\text{C}$) [5].

Однако в условиях эксплуатации ГТР в зимний период н-бутан (СУГ марки “БТ”), заливаемый периодически в резервуар ГТР, может иметь достаточно низкую температуру за счет охлаждения при транспортировании на большие расстояния от газонаполнительной станции (ГНС) в автоцистернах (АЦЖГ). Температура н-бутана при этом будет

определяться температурой наружного воздуха, которая в зимний период на территории Украины может достигать низких значений. Для определенности примем, что вследствие указанных причин начальная температура н-бутана при тепловом взаимодействии с грунтом равна $t_{ж,0} = -20^\circ\text{C}$.

На изменении теплофизических характеристик жидкой фазы СУГ ее начальная температура не сказывается, т.к. при обсуждении ранее физической модели теплового взаимодействия ГТР и грунта принято упрощающее допущение о независимости их ТФХ от температуры.

С целью изучения влияния теплофизических характеристик грунта разного породного состава при планировании вычислительных экспериментов выбраны три наиболее распространенные в своем классе породы, характерные для территории Украины:

- плотный песчаник (кристаллическая порода);
- супесь (дисперсная порода);
- суглинок (коллоидная порода).

Теплофизические характеристики указанных пород сухого грунта берутся из руководящего документа [4].

Математическое моделирование теплового взаимодействия геотермальных регазификаторов СУГ с сухим грунтом проводилось при различных сочетаниях СУГ разного состава с присущей каждому из них начальной температурой жидкой фазы и различными породами, имеющими одинаковую для всех вариантов температуру $T_{n,\infty} = 14^\circ\text{C}$.

Результаты вычислительных экспериментов для соответствующим образом пронумерованных вариантов указанных сочетаний СУГ и пород грунта представлены в числовом (табличном) и графическом виде. Они представляют собой данные о нестационарном распределении температур в жидкой фазе СУГ (в области $0 \leq r \leq r_c$) и в массиве грунта (в области $r_c \leq r \leq r_l$). Здесь r_c – радиус скважины, r_l – радиус теплового влияния скважины на массив грунта, r – текущее значение радиуса.

Выводы

При исследованиях теплового взаимодействия жидкой фазы СУГ в геотермальных регазификаторах скважинного типа глубиной порядка 50 м с грунтом путем проведения натуральных и лабораторных экспериментов возникают серьезные технические и экономические трудности.

Использование аналитических методов исследования столь сложных процессов с большим числом независимых переменных наталкивается на значительные математические сложности.

В работе предложено для решения задачи о температурном режиме геотермального регазификатора СУГ и окружающего его грунта воспользоваться интенсивно развивающимся в последнее время методом математического моделирования изучаемого процесса.

Сущность его состоит в выполнении серии вычислительных экспериментов, для получения численных решений системы дифференциальных уравнений при варьировании основных независимых переменных.

В данной работе численные решения системы уравнений нестационарной теплопроводности выполнялись с использованием нового высокоэффективного и экономичного метода конечных элементов при помощи быстродействующей ЭВЦМ.

Результаты вычислительных экспериментов согласно вариантам сочетаний параметров, составленных в ходе их планирования, представлялись в табличной и графической форме.

Литература

1. *Гухман А. А.* Применение теории подобия к исследованию процессов тепло- массообмена. – М.: Высш. шк., 1976.
2. *Дмитриев М. Д.* Математическое моделирование. – М.: Высш. шк., 1985.
3. *Зенкевич О., Морган К.* Конечные элементы и аппроксимация. – М.: Мир, 1986.
4. Методика выбора параметров теплоаккумулирующих выработок. – Л.: Недра, 1975.
5. *Стаскевич Н. Л., Вигдорчик Д. Я.* Справочник по сжиженным углеводородным газам. – Л.: Недра, 1986.
6. *Тихонов А. Н., Самарский А. А.* Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1977.
7. *Ярышев Н. А.* Теоретические основы измерения нестационарных температур. – Л.: Энергия, 1987.