

тепловой и электрической энергии, было произведено более 1 000 000 кВт х ч тепловой энергии. Результаты испытаний топливных отопительных аппаратов позволяют назвать их «значительным достижением среди разработок данной технологии» и ожидается дальнейшая перспектива в их совершенствовании. Пробные образцы приборов уже установлены не только в Германии, но и в других европейских странах: Голландии, Австрии, Люксембурге, Франции, Испании и Португалии. Результаты этих испытаний также сыграют важную роль при разработке аппаратов следующего поколения и в г. Астрахани.

К настоящему времени это же направление разрабатывает американская фирма «Plug Power». Руководство фирмы считает, что к 2017 г. до 30 % жилого фонда будут иметь локальную теплоэлектростанцию на топливных элементах для подогрева воды, отопления и обеспечения электроэнергией. Пока отопительные аппараты на топливных элементах с тепловым управлением использует водород, получаемый из природного газа в специальной реформе. Водород и кислород, получаемые из воздуха, подводятся к пакету топливных элементов, где в процессе электрохимической реакции, с высоким КПД вырабатываются тепло- и электроэнергия. Производимая аппаратами электроэнергия покрывает базовую потребность многоквартирного дома, а тепловая энергия способна полностью обеспечить годовую потребность многоквартирного дома в тепле. Кроме того, благодаря этим установкам становится возможным горячее водоснабжение вне отопительного сезона.

Вывод: рассмотренные варианты можно рассмотреть как альтернативу централизованного теплоснабжения применительно к южным регионам, в частности Астраханской области.

Список литературы

1. Амерханов Р. А. Тепловые насосы. М. : Энергоатомиздат, 2005. 160 с.
2. Андрющенко А. И. Сравнительная эффективность применения тепловых насосов для централизованного теплоснабжения // Промышленная энергетика. 1997. № 6. С. 24.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ГРУНТА ПРИ МНОГОЛЕТНЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ СКВАЖИН

Н. Ю. Сапрыкина, П. В. Яковлев
*Астраханский государственный
архитектурно-строительный университет*

Более 90 % территорий страны на экономически доступных глубинах от 50 до 100 м ниже уровня поверхности земли круглогодично располагают зонами с температурой 15–18 °С, которые можно отнести к низкопотенциальным источникам тепла. Этот температурный диапазон не может быть реализован в большинстве технологических процессов, в том числе и

в системах отопления. Ввиду этого, наиболее перспективным считается отбор низкопотенциальной энергии с помощью тепловых насосов, позволяющих с относительно незначительными затратами получить требуемые температуры теплоносителей [1, 2].

Опыт эксплуатации существующих скважин показал:

- недостаток информации о работе скважин на длительных сроках эксплуатации;
- влияние нестационарности работы скважин на их технико-экономические показатели;
- отсутствие надежных методик расчета параметров работы геотермальных скважин при реверсных режимах работы;
- влияние фильтрующихся грунтовых вод на технико-экономические параметры геотермальных скважин.

Для построения расчетной модели выбраны следующие режимы работы системы отопления и кондиционирования:

- в нестационарном режиме (сезонные изменения нагрузки без изменения направления теплового потока);
- в знакопеременном режиме с регенерацией тепла (сезонные изменения нагрузки с изменением направления теплового потока за счет переключения теплоэнергетической установки с режима отопления на режим кондиционирования и наоборот).

Для построения модели [3, 4] выбрана цилиндрическая система координат с учетом фонового теплового потока Земли к ее поверхности (рис. 1).

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{q_v}{c}, \quad (1)$$

где: t – температура грунта, $^{\circ}\text{C}$; τ – время, с; a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; r – радиальная координата, м; q_v – источники и стоки тепла, обусловленные тепловыми потоками Земли и тепловыделения через поверхность, $\text{Вт}/\text{м}^3$; c – теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$.

Для количественного описания соотношения подведенного и отведенного количества тепла при знакопеременном технологическом режиме введено понятие коэффициента регенерации тепла k_p , определяемого отношением абсолютных значений отведенного и подведенного тепла:

$$k_p = Q_{\text{подв}} / Q_{\text{отв}}. \quad (2)$$

где $Q_{\text{подв}}$ – количество подведенного потока в холодный период года, Дж; $Q_{\text{отв}}$ – количество отведенного потока в теплый период года, Дж.

Особенностью решаемой задачи является нестационарный [5] теплообмен, осложненный граничными условиями, формируемыми многократными чередующимися циклами включения системы отопления / кондиционирования с сезонными реверсами потока тепла и периодами ее отключения.

Решение задачи моделирования температурного поля при многократном циклическом включении и выключении системы отопления получено методом конечных разностей с использованием неявной разностной схемы на смещенной сетке.

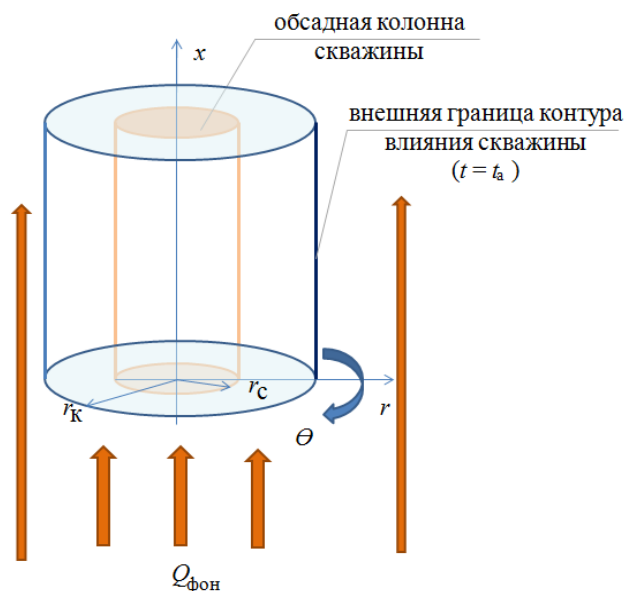


Рис. 1. Модель эксплуатируемого грунтового массива: r_k – радиус обсадной колонны, м; r_c – радиус скважины, м; $Q_{фон}$ – фоновый поток земли, Вт/м²

Численная модель базируется на дискретном представлении уравнения энергии, граничных и начальных условий, при различных плотностях теплового потока (100–500 Вт/м²) и реализована на базе прикладного пакета программ MathLab. Основные полученные закономерности иллюстрируют представленные на рис. 2–4 изменение температурного поля при циклическом подводе тепла в скважину в 100 Вт/м².

При заданных параметрах тепловой нагрузки, скважины и пласта, температура на забое скважины после сезонной эксплуатации в режиме подвода тепла возросла более, чем на 20°. В режиме «простоя» в течение полгода температура пласта выравнивалась и на забое скважины отклонение температуры от фоновой сохранилось в пределах 2 °С. Циклическое повторение режимов подвода тепла с простоями (т.е. когда тепловой насос не совершает никакой работы) приводит к эффекту аккумуляции тепла, компенсируемого фоновыми тепловыми потоками. Квазистационарное состояние, соответствующее циклическому режиму без дальнейшего роста температур, наступает на этапе – 2,5 года, в режиме «простоя» – 3 года (рис. 2).

Гипотеза малости тепловых потоков по высоте скважины подтверждается сопоставлением распределения температур по горизонтальным плоскостям на разных глубинах скважины (рис. 3).

На рис. 4 представлены результаты изменения температурного поля в условиях реверса тепловой нагрузки на пласт. При наличии регенерации квазистационарное состояние наступает через 1,5 года.

На рис. 5 представлены результаты влияния на температурное поле на этапе 1 года эксплуатации коэффициента регенерации (k_p) для величин активных нагрузок в диапазоне +100 ÷ -100 Вт и коэффициента регенерации (k_p) в диапазоне 0,25÷1.

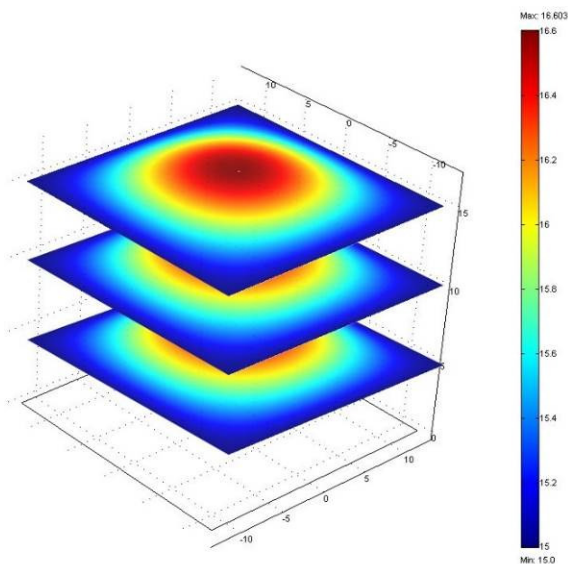


Рис. 2. Температурное поле по глубине скважины

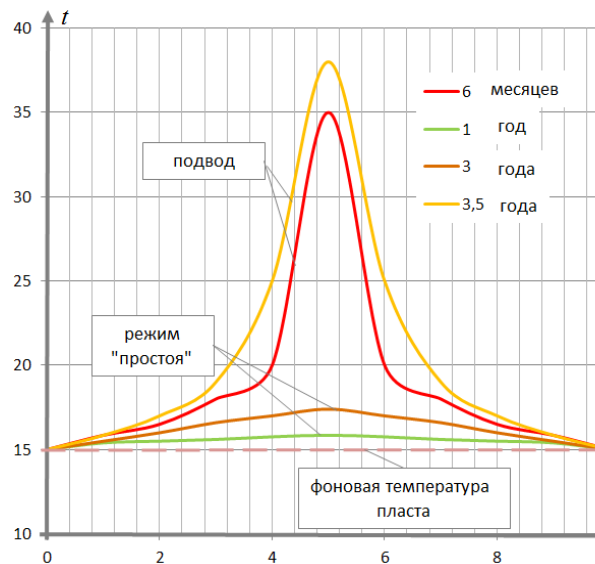


Рис. 3. Изменение температуры пласта при нестационарном подводе тепла с начала первого включения до установления квазистационарного режима

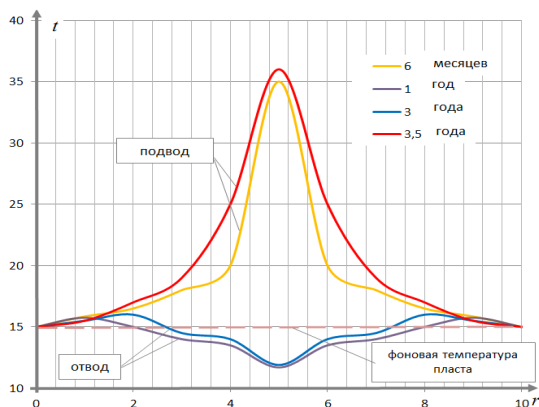


Рис. 4. Изменение температуры пласта при знакопеременном режиме

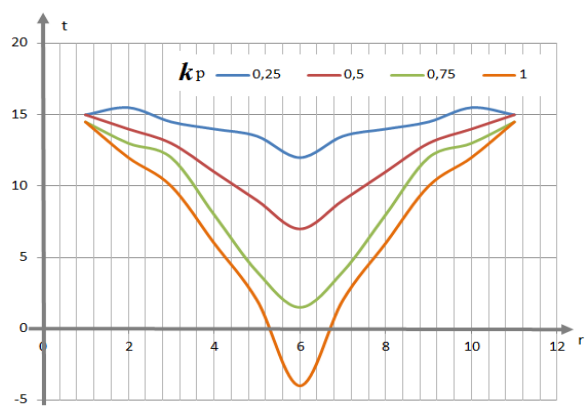


Рис. 5 Температурный график пласта при k_p : а) 0,25; б) 0,5; в) 0,75; г) 1

Анализируя влияние коэффициента регенерации, можно сделать вывод о сдвиге поля температур на этапе завершения отвода тепла в сторону снижения температур с ростом коэффициента регенерации. Так, при $k_p = 0,25$ температура на забое скважины составляла $+12\text{ }^\circ\text{C}$, а при $k_p = 1,0$ температура на забое понизилась до $-4\text{ }^\circ\text{C}$, а влияние предыдущего цикла подвода тепла в виде волны практически не наблюдается, что свидетельствует о стабилизации температурного поля относительно фоновой температуры пласта, а при $k_p = 1,0$ повышении эффективности скважины даже относительно однократного включения.

Проверка адекватности модели проводилась сопоставлением расчетных значений с результатами замеров рабочих параметров комплексной, полученных в условиях крестьянско-фермерского хозяйства (КФХ) по производству молочнокислой продукции в Астраханской области (рис. 6).

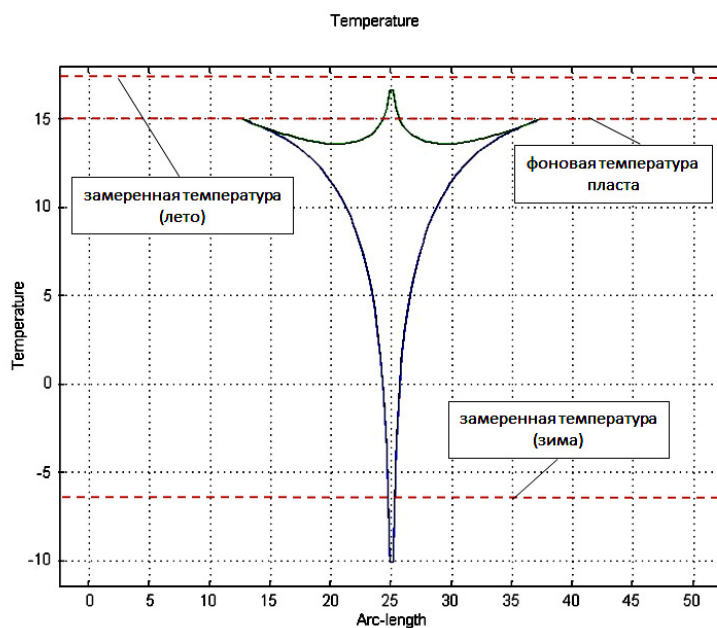


Рис. 6. Сопоставление результатов расчета с действующей установкой

Установленное оборудование работает в двух температурных режимах: на теплоснабжение и охлаждение (поддерживая круглогодично температуру воздуха в цехах $+12\text{ }^{\circ}\text{C}$ и на складе готовой продукции $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$). Источниками энергии для подогрева и охлаждения являются две вертикальные скважины глубиной по 75 метров. Структура грунта – суглинок, осложненный высоким уровнем грунтовых вод, ввиду близкого расположения реки. Аналогичные условия были заложены в расчетные уравнения. Отклонения замеренных и расчетных значений при работе установки в режиме отопления составили $3\div 4\text{ }^{\circ}\text{C}$, в режиме кондиционирования $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, что свидетельствует об удовлетворительной сходимости.

Список литературы

1. Кологривых А. С., Семиненко А. С. Обзор мирового и российского рынков теплонасосных установок // Студенческий научный форум : материалы V Международной студенческой электронной научной конференции. URL: www.scienceforum.ru/2013/43/5803.
2. Сапрыкина Н. Ю., Яковлев П. В. Энергосберегающие технологии портовых сооружений на основе применения геотермальных тепловых насосов // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. Астрахань, 2017. № 1. С. 116–124.
3. Сапрыкина Н. Ю., Яковлев П. В. Исследование естественного изменения температурного поля при многолетней эксплуатации теплового насоса // Вестник ТГТУ. Томск, 2016. № 4 (57). С. 117–125.
4. Сапрыкина Н. Ю. Исследование формирования температурного поля грунта при эксплуатации геотермальных тепловых насосов при условии влияния грунтовых вод // Вестник СГАСУ. Самара, 2016. № 3 (24). С. 25–30.
5. Лыков А. В. Теория теплопроводности : учеб. пособие. М. : Высшая школа, 1967. 600 с.