

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО И ТЕРМОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КРЕПИ СКВАЖИН МУТНОВСКОГО ГЕОТЕРМАЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (КАМЧАТКА)

АНТИПИН А.В., канд. техн. наук, БУХМИРОВ В.В., д-р техн. наук, СОЗИНОВА Т.Е. канд. техн. наук

Представлены результаты исследований, выполненные сотрудниками кафедры ТОТ ИГЭУ в 1995–2005 гг., по изучению процессов теплообмена и термоупругости в крепи геотермальных скважин с целью прогнозирования их стойкости и увеличения сроков службы. Теоретические и эксплуатационные исследования выполнены для условий Мутновского геотермального месторождения Камчаткой обл.

Геотермальные источники тепла – один из видов энергии, который может сократить расход и, в перспективе, заменить органическое топливо. Извлечение геотермального флюида из высокотемпературных резервуаров осуществляется при помощи скважин, сооружение которых является наиболее капиталоемкой частью общих затрат на строительство ГеоТЭС и систем геотермального теплоснабжения. Поэтому повышение качества проектирования и сооружения геотермальных скважин и выбор рациональных режимов их эксплуатации – актуальная, в настоящее время, задача.

Стойкость крепи геотермальных скважин, под которой будем понимать систему обсадных труб и цементных колец, окруженную неограниченным горным массивом (рис.1), в значительной мере обусловлена ее тепловым и, как следствие, термонапряженным состоянием. Совершенствование методов оценки термонапряженного состояния обсадных труб и цементных оболочек крепи позволит обосновать выбор конструктивных параметров скважин, а также повысить надежность их эксплуатации за счет прогнозирования поведения крепи скважин в номинальных и нерасчетных режимах.

Полное экспериментальное исследование теплообмена и термоупругости в геотермальной скважине в настоящее время не представляется возможным в силу специфики объекта исследования, поэтому получение информации о термонапряженном состоянии крепи скважины с целью прогнозирования ее стойкости возможно только методами математического моделирования.

Изучение особенностей Мутновского геотермального месторождения проводилось в 1995, 1996 и 1997 гг. при непосредственном обследовании месторождения и в период натурных исследований во время опытных выпусков в августе-сентябре 1997 г., а также с помощью анализа данных в буровых журналах и отчетах Камчатской геологической экспедиции при ПГО «Сахалингеология» и собеседования со специалистами по бурению и эксплуатации геотермальных скважин Камчатки.

В результате обследования скважин Верхне-Мутновского геотермального участка получены данные о геометрии скважин и технологии их сооружения, параметрах геотермального теплоносителя на устье скважины, об авариях с обсадными трубами и о конструкции устьевого оборудования.

Во время опытных выпусков в августе-сентябре 1997 г. экспериментально определены:

— изменение давления и температуры по глубине в длительно неработающей скважине 024Н;

— параметры геотермального флюида на устье скважин 049Н и 055;

— удлинение кондуктора при изменении режима истечения геотермального флюида.

Глубинные измерения давления и температуры проводили с помощью автономного самопишущего прибора с записью показаний на металлическом бланке. Использовали манометр типа «Кастер» (предел измерения давления — $0\div 240$ кг/см²; класс точности — 0,6; диапазон рабочих температур — $180\div 399^\circ\text{C}$) и термометр типа «Кастер» (предел измерения рабочих температур давления — $199\div 399^\circ\text{C}$; класс точности — 0,6). При измерении температуры и давления по стволу скважины прибор через каждые 200 м останавливали и выдерживали 10–20 минут.

Для расчета расхода (G), энтальпии (h) и степени сухости (x) пароводяной смеси (ПВС) предварительно измеряли давление на устье (P_y), давление в сепараторе ($P_{\text{сеп}}$), который был смонтирован на модуле системы подготовки пара (СПП), перепады давления воды ($\Delta P'_{\text{сеп}}$) и пара ($\Delta P''_{\text{сеп}}$) на измерительных диафрагмах, установленных после разделения воды и пара.

Давление на устье скважины измеряли образцовым манометром типа МО (класс точности – 0,4). Давление в сепараторе — манометром МТИ (класс точности – 0,6), а перепады давления $\Delta P'_{\text{сеп}}$ и $\Delta P''_{\text{сеп}}$ измеряли дифманометром ДСП-160-М1 (класс точности – 1).

Перемещение кондуктора во время выпуска флюида находили методом геодезического нивелирования (нивелир НВ-1) нижних фланцев устьевых задвижек. Передача отметок на фланцы осуществлялась методом нивелирного хода от постоянных реперов.

Математическое моделирование термонапряженного состояния крепи геотермальной скважины основано на численном решении краевой задачи теории теплопроводности и использовании известного решения несвязанной квазистатической задачи термоупругости [2, 4]. Расчетная зона (рис.1) состоит из обсадных труб и цементных колец, вложенных в неограниченный горный массив. При моделировании теплопереноса принимали следующие допущения: перенос теплоты происходит только теплопроводностью; отсутствуют источники (стоки) теплоты внутри расчетной зоны; осесимметричное распределение температуры. С учетом переноса теплоты в радиальном и продольном направлениях и зависимости теплофизических свойств от температуры

дифференциальное уравнение теплопроводности в цилиндрической системе координат имеет вид

$$c'(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda(T) r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где T – температура; r, z – радиальная и продольная координаты; c' – удельная объемная теплоемкость; λ – коэффициент теплопроводности; t – время.

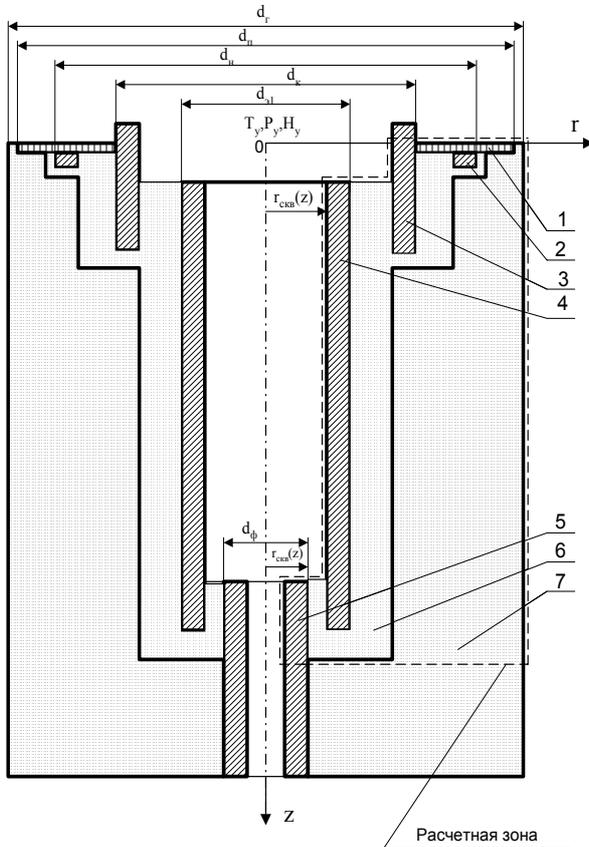


Рис. 1. Принципиальная схема крепи геотермальной скважины: 1 – площадка; 2 – направление; 3 – кондуктор; 4 – эксплуатационная колонна; 5 – фильтр; 6 – цементный камень; 7 – горная порода

За начальное условие для длительно не работающей скважины принимали геотермическое распределение температуры по ее глубине, а при расчете переходного режима из одного квазистационарного состояния в другое — температурное поле предыдущего квазистационарного состояния. На поверхности грунта задавали граничное условие I или III рода, на внешней границе расчетной зоны (на расстоянии, исключающем тепловое влияние флюида на температурное поле грунта) было задано либо геотермическое распределение температуры, либо условие адиабаты. В нижней части расчетной зоны скважины температура была принята равной температуре геотермального резервуара (коллектора), а на внутренней поверхности скважины задавали граничное условие I или III рода. При этом при задании граничных условий I рода принимали допущение равенства температуры флюида и стенки, а при граничных условиях III рода коэффициент теплоотдачи от флюида к стенке был рассчитан по известным критериальным зависимостям для средних скоростей флюида, найденных совместно с его температурой и степенью сухости по вычислительной программе NOLA [1]. Внутри расчетной области на границах контакта обсадных труб и цементных

колец, цементных колец и грунта предусмотрено задание граничных условий как при допущении идеального контакта (граничное условие IV рода), так и возможного отхода цементного камня от обсадных труб и горной породы (неидеальный контакт).

Дифференциальное уравнение (1) совместно с краевыми условиями решено методом конечных разностей — методом сеток. Особенностью расчетной области крепи геотермальной скважины является ее неоднородность (система коаксиальных тел с различными теплофизическими свойствами) и большие различия (на несколько порядков) радиальных и продольных размеров всей конструкции скважины и отдельных ее элементов. Для построения разностной сетки с «разумным» числом узлов были приняты переменные шаги по координатам O_r и O_z (построена неравномерная разностная сетка). Величину шага по времени (Δt) изменяли ступенчато в зависимости от периода работы скважины: малый Δt (доли секунды) при расчете температурного поля во время пуска и большой шаг (до нескольких часов) при расчете квазистационарного режима работы скважины.

Перед построением неравномерной разностной сетки была решена задача формального описания структуры расчетной зоны скважины при помощи двух групп полых цилиндров, различающихся по радиусу, ширине и высоте. Была построена равномерно-неравномерная разностная сетка по радиусу и высоте расчетной зоны. В области обсадных труб и цементных колец построена равномерная разностная сетка по радиусу, а в зоне грунта — неравномерная сетка. По высоте расчетной зоны сетка равномерная для цилиндров малой высоты (башмаки оболонн) и в зоне контакта соседних тел. Внутренняя область больших цилиндров покрыта неравномерной расходящейся - сходящейся сеткой, построенной по специальному алгоритму.

Аппроксимация дифференциального уравнения теплопроводности во внутренних узлах сетки выполнена методом разностной аппроксимации и методом контрольного объема. Например, по методу разностной аппроксимации неявная итерационная консервативная разностная схема дифференциального уравнения теплопроводности (1) имеет вид

$$c_{i,j}^{m+1,s} \frac{T_{i,j}^{m+1,s+1} - T_{i,j}^m}{\Delta t} = \frac{1}{r_i} \frac{1}{\Delta r_{i+\frac{1}{2}}} \left(\lambda_{i+\frac{1}{2},j}^{m+1,s} r_{i+\frac{1}{2}} \frac{T_{i+1,j}^{m+1,s} - T_{i,j}^{m+1,s+1}}{\Delta r_{i+1}} - \lambda_{i-\frac{1}{2},j}^{m+1,s} r_{i-\frac{1}{2}} \frac{T_{i,j}^{m+1,s+1} - T_{i-1,j}^{m+1,s+1}}{\Delta r_i} \right) + \frac{1}{\Delta z_{j+\frac{1}{2}}} \left(\lambda_{i,j+\frac{1}{2}}^{m+1,s} \frac{T_{i,j+1}^{m+1,s} - T_{i,j}^{m+1,s+1}}{\Delta z_{j+1}} - \lambda_{i,j-\frac{1}{2}}^{m+1,s} \frac{T_{i,j}^{m+1,s+1} - T_{i,j-1}^{m+1,s+1}}{\Delta z_j} \right), \quad (2)$$

где $\Delta t, \Delta r$ и Δz – шаги по времени и пространственным координатам; $T_{i,j}^m$ – сеточная функция температуры.

Для решения системы алгебраических разностных уравнений применен метод Либмана с использованием коэффициента верхней релаксации. Конечно-разностные аналоги граничных условий на внешней границе расчетной области получены по методу контрольного объема.

Тепловые потери от геотермального флюида в окружающую скважину среду предложено находить по величине аккумуляции теплоты приствольной зоной скважины, которую легко рассчитать по известному нестационарному температурному полю. Для сравнения выполнен расчет тепловых потерь и по приближенному методу, использующему понятие, так называемого, коэффициента нестационарного теплообмена (k_t). На рис. 2, а показано изменение тепловых потерь по высоте скважины, а на рис. 2, б зависимость $q_{i,пот}^t = \varphi(t)$ для скважины в режиме пуска. В начальные моменты времени ($t < 160$ с) приближенный метод ("метод k_t ") занижает (на $\sim 25 \div 30$ %), а затем (при $t > 160$ с) незначительно завышает величину тепловых потерь.

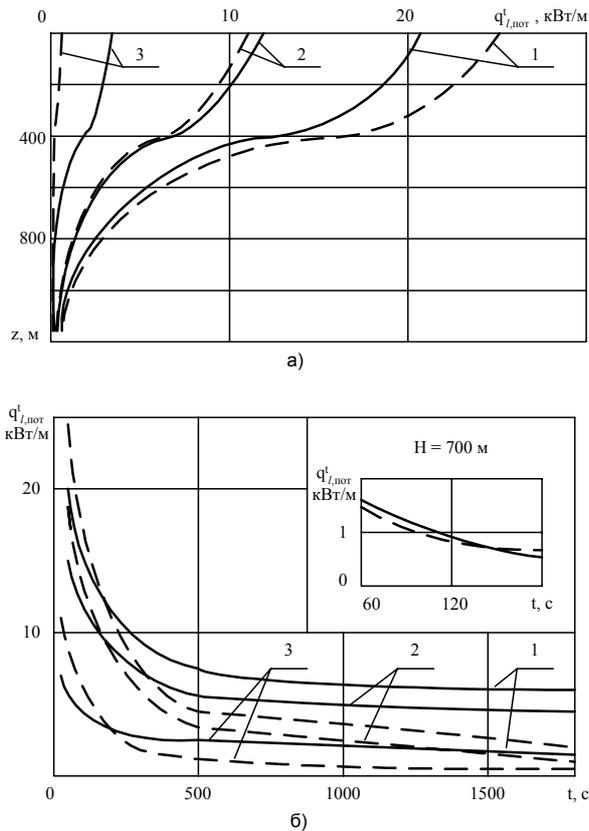


Рис.2. Тепловые потери:
а) по высоте скважины: 1 – $t = 60$ с; 2 – $t = 180$ с; 3 – $t = 3600$ с;
б) во время пуска: 1 – $H = 25$ м; 2 – $H = 300$ м; 3 – $H = 500$ м:
— метод k_t ; наш расчет

Метод расчета напряженного состояния крепи геотермальной скважины учитывает остаточные, механические и термические напряжения. Остаточные напряжения зависят от собственного веса колонны, способа ее установки и возможного натяжения колонны. Механические напряжения зависят от внутреннего давления флюида и рассчитаны по известным формулам Ляме [2, 3]. Для расчета термических напряжений использовано решение плоской осесимметричной задачи термоупругости с учетом напряженного контакта обсадной трубы и цементного кольца (идеальный контакт) и без взаимодействия обсадной трубы и цементного камня (неидеальный контакт). Осуществлен переход от сложного термонапряженного состояния к эквивалентным термическим напряжениям.

Для анализа прочности обсадных труб и кондуктора, находящегося в сложном напряженном состоянии, использовали первую, третью и четвертую (энергетическую) теории прочности, а для цементного камня – теорию прочности Мора.

Решение плоской задачи термоупругости для идеального и неидеального контакта обсадной трубы – 1 и цементного кольца – 2 имеет вид

$$\sigma_{r,1}^m = \frac{E_1 \alpha_{m1}}{1 - \nu_1} \left[\frac{1}{2} \bar{T}_1 \left(1 - \frac{R_o^2}{R^2} \right) (\mu_1 - 1) d - \frac{1}{R^2} \int_{R_{вн}}^R T_1 R dR \right]; \quad (3)$$

$$\sigma_{\theta,1}^T = \frac{E_1 \alpha_{T1}}{1 - \nu_1} \left[\frac{1}{2} \bar{T}_1 \left(1 + \frac{R_o^2}{R^2} \right) (\mu_1 - 1) d + \frac{1}{R^2} \int_{R_{вн}}^R T_1 R dR - T_1 \right]; \quad (4)$$

$$\sigma_{z,1}^T = \frac{E_1 \alpha_{T1}}{1 - \nu_1} \left[\bar{T}_1 \nu_1 (\mu_1 - 1) d - T_1 \right]; \quad (5)$$

$$\sigma_{r,2}^m = -\frac{1}{R^2} \left[\frac{E_2 \alpha_{m2}}{1 - \nu_2} \int_1^R T_2 R dR + d E_1 \alpha_{T1} \bar{T}_1 \right]; \quad (6)$$

$$\sigma_{z,2}^T = -\frac{E_2 \alpha_{T2}}{1 - \nu_2} T_2; \quad (7)$$

$$\sigma_{\theta,2}^T = -\sigma_{r,2}^T + \sigma_{z,2}^T, \quad (8)$$

где $\mu = \frac{\mu_1}{\mu_2}$; $\bar{T}_1 = \frac{2}{1 - R_o^2} \int_1^R T_1 R dR$; $d = \varphi(R_o, \nu_1, \mu)$;

σ_r^T , σ_{θ}^T , σ_z^T – радиальные, тангенциальные и продольные термические напряжения; $R = r/r_1$ – безразмерный радиус обсадной колонны; α_T – коэффициент термического расширения; ν – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости; μ_L – коэффициент Ляме; индексы 1 и 2 относятся к обсадной колонне и цементному кольцу соответственно.

При $(\mu - 1)d = 1$ формулы (3)÷(8) описывают изменение термических напряжений в свободном от боковых нагрузок полом цилиндра. Если торцевые поверхности цилиндрических оболочек свободны от напряжений, то в этом случае на расстоянии, достаточно удаленном (в смысле принципа Сен-Венана) от торцов, продольные напряжения равны:

$$\sigma_z^T = \sigma_r^T + \sigma_{\theta}^T, \quad (9)$$

а удлинение цилиндрической оболочки составит

$$u_z = \frac{2\alpha_T}{1 - R_o^2} \int_0^z \left[\int_{R_o}^1 (T - T_o) R dR \right] dz, \quad (10)$$

где z – длина незацементированной части обсадной трубы.

Интегралы в вышеприведенных формулах при расчете средних радиальных температур цилиндрической оболочки рассчитывали численно с использованием линейной интерполяции температуры на каждом шаге по радиусу Δr .

Адекватность численной математической модели теплообмена в элементах конструкции скважины была подтверждена экспериментально полученными значениями температуры на физической модели скважины. Расчет выполнен на равномерной и неравномерной сетках с одинаковым числом узлов (300×200). В области грунта расчеты с использованием неравномерной сетки имели погрешность по отношению к расчету на равномерной сетке, сопоставимую с погрешностью измерения температуры (< 6 %). Расчеты были выполнены при граничных условиях I и III рода. Получено удовлетворительное совпадение результатов расчета и эксперимента.

Точность расчета термических напряжений определяется точностью расчета температурного поля и точностью численного решения интегралов в формулах (3)-(10). Проверка точности численного расчета радиальных и тангенциальных термических напряжений проведена сопоставлением с аналитическим решением Г. Паркуса [4]. Сделан вывод о практической сходимости значений термических напряжений, найденных аналитически и численно.

По разработанной методике рассчитано перемещение кондуктора скважины 049Н в условиях опытных выпусков в августе-сентябре 1997 г. До открытия устьевого задвижки скважина 049Н длительное время находилась под избыточным давлением. Поэтому начальное температурное поле в расчетной зоне перед открытием устьевого задвижки находили предварительным расчетом прогрева скважины из начального геотермического состояния при граничных условиях I рода по известным температурам на устье и в коллекторе. При сравнении результатов расчета и натурного эксперимента наблюдается вполне удовлетворительное их совпадение.

Метод расчета теплового и термонапряженного состояния крепи скважин был применен для исследования скважин Верхне-Мутновского участка Мутновского геотермального месторождения. Расчетами определено численное значение радиуса теплового влияния скважины на окружающий ее горный массив в зависимости от времени ее работы. Данная информация необходима для достоверного определения размеров расчетной области при моделировании.

Расчеты термонапряженного состояния обсадной колонны показали, что наибольший вклад в действующие напряжения, равные сумме остаточных, механических и термических напряжений, вносят термические напряжения. Продольные, радиальные и тангенциальные остаточные и механические напряжения на порядок и в ряде случаев на несколько порядков меньше соответствующих термических напряжений. Поэтому для анализа термонапряженного состояния обсадной колонны были рассмотрены максимальные термические напряжения, которые возникают в приустьевой зоне скважины.

На рис. 3 и 4 изображены эквивалентные термические напряжения ($\sigma_{\text{ЭКВ}}^T$) в обсадной колонне, рассчитанные по теории наибольших касательных напряжений (третья теория прочности), в момент пуска ($t = 1$ с) и в приустьевой зоне скважины ($H = 10$ м) при идеальном и неидеальном контакте обсадной трубы и цементного кольца. Максимальные термические напряжения возникают в приустьевой зоне

скважины, а на глубинах более 600 м термические напряжения практически равны нулю. Сжимающие термические напряжения максимальны на внутренней поверхности обсадной трубы в первые секунды пуска скважины. В квазистационарном режиме работы скважины термические напряжения стабилизируются около некоторого среднего значения по радиусу обсадной трубы. При отсутствии прочной связи между обсадной трубой и цементным кольцом (неидеальный контакт) $\sigma_{\text{ЭКВ}}^T \approx 0$, а для напряженного контакта «обсадная труба – цементное кольцо» (идеальный контакт) для условий нашего расчета $\sigma_{\text{ЭКВ}}^T \approx 250$ МПа. Заметим, что величина эквивалентных термических напряжений в первые секунды пуска сопоставима с пределом текучести у сталей группы Д и на 25÷30 % меньше предела текучести у сталей группы К и Е, применяемых для изготовления обсадных труб геотермальных скважин.

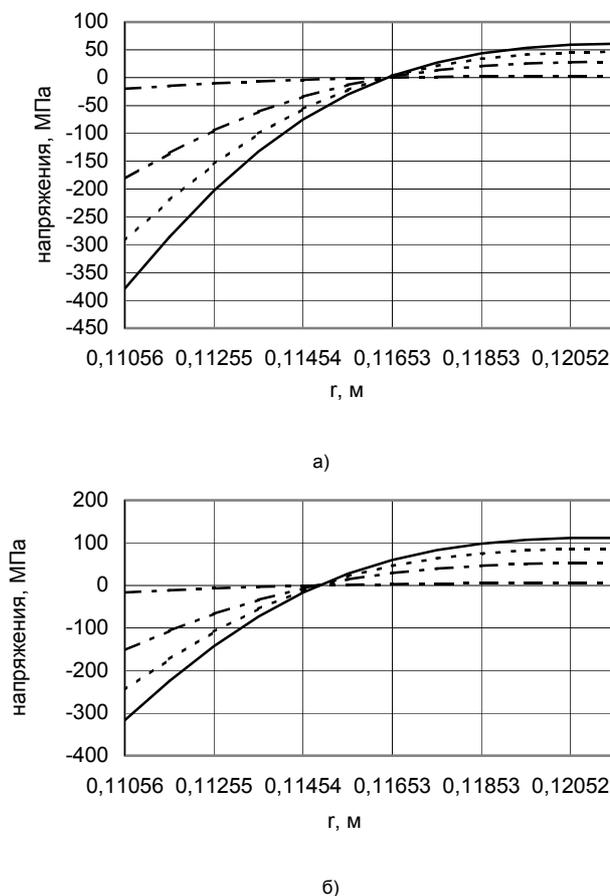


Рис.3. Эквивалентные термические напряжения в момент пуска ($t = 1$ с):

а) идеальный контакт; б) неидеальный контакт;
 ————— $H = 10$ м; $H = 200$ м;
 - - - - - $H = 400$ м; $H = 600$ м

Термические напряжения в цементном кольце зависят от условий его контакта на границах с обсадной трубой и грунтом. В данной работе рассмотрены три варианта взаимодействия цементного кольца с соседними телами:

- 1) неидеальный контакт с обсадной трубой и неидеальный контакт с грунтом;
- 2) идеальный контакт с обсадной трубой и идеальный контакт с грунтом;
- 3) вариант 3 – неидеальный контакт с обсадной трубой и идеальный контакт с грунтом.

Наиболее опасные условия работы для цементного камня наблюдаются при идеальном контакте с обсадными трубами и грунтом. В этом случае растягивающие напряжения в цементном камне достигают величины 6 МПа на глубине 250 м, что может привести к его разрушению.

Упругие свойства цементного камня, полученного во время затвердевания цемента с введением тампонажных материалов, замедляющих процесс твердения, для условий скважин Мутновского месторождения неизвестны.

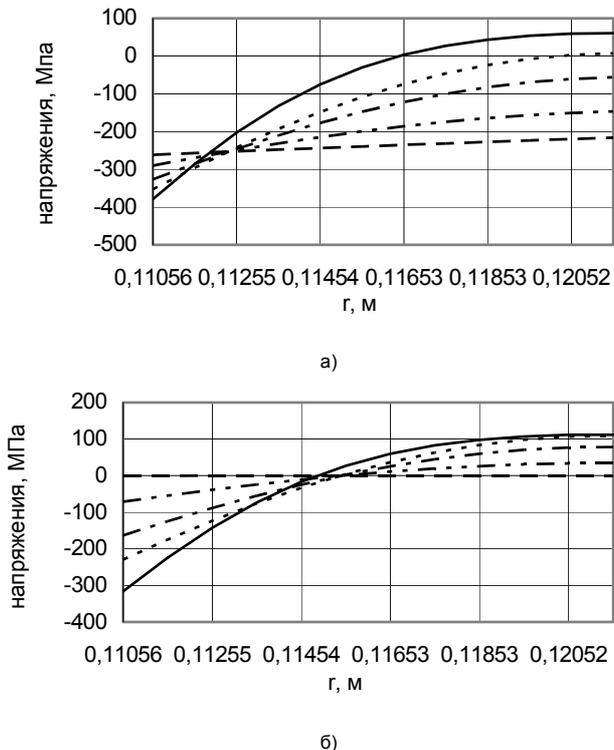


Рис.4. Эквивалентные термические напряжения в приустьевой зоне скважины (H = 10 м): а) идеальный контакт; б) неидеальный контакт;

— $t = 1$ с; $t = 3$ с;
 - - - - $t = 5$ с; - · - · $t = 10$ с; - - - - $t = 300$ с

При эксплуатации геотермальных скважин необходимо учитывать условия закрепления торцов колонны на величину продольных термических напряжений. Расчетным путем установлено, что фиксация торцов обсадной трубы значительно увеличивает (в среднем в 2 раза) сжимающие продольные термические напряжения.

Остаточные напряжения зависят от способа установки обсадной колонны при монтаже конструкции скважины. При вывешивании колонны обсадных труб в них возникают растягивающие напряжения от собственного веса, которые частично компенсируют продольные сжимающие напряжения при нагреве труб во время пуска. Дополнительное натяжение обсадных труб также увеличивает растягивающие напряжения. Например, натяжение в 100 тонн увеличивает продольные остаточные напряжения в 2 раза на глубине 10 м и в 16 раз на глубине 1000 м.

Для обсадки геотермальных скважин применяют трубы с толщиной стенки от 4,5 до 12 мм. Поэтому в работе определена величина термических напряжений в обсадных трубах с разной толщиной в расчетных и нерасчетных режимах работы скважины.

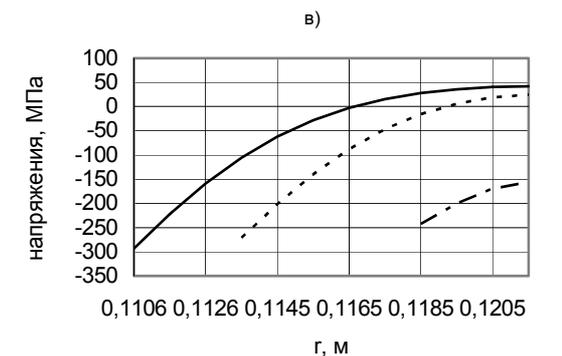
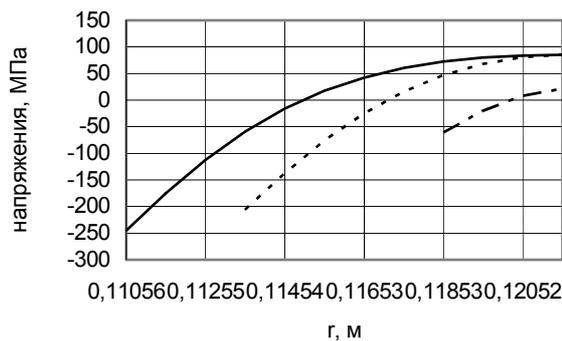
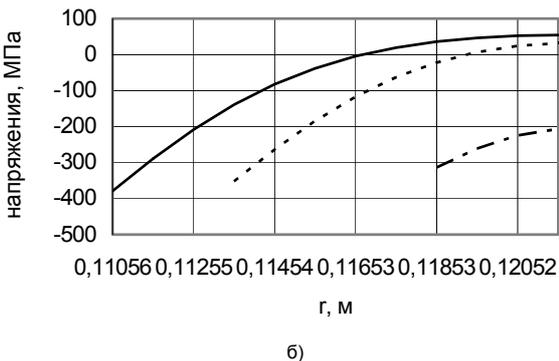
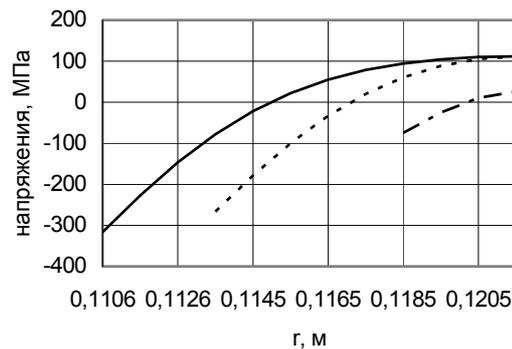


Рис.5. Тангенциальные термические напряжения в зависимости от толщины стенки обсадной колонны:

а) H = 10 м, неидеальный контакт; б) H = 10 м, идеальный контакт; в) H = 200 м, неидеальный контакт; г) H = 200 м, идеальный контакт;

— $\delta = 12$ мм; $\delta = 9,5$ мм; - - - - $\delta = 4,5$ мм

На рис. 5 изображены термические тангенциальные напряжения в стенках обсадных труб разной толщины в первую секунду после пуска скважины. В тонких трубах термические напряжения существенно меньше при неидеальном контакте на внутренней поверхности трубы. При идеальном контакте средние сжимающие термические напряжения в

трубах с толщиной стенки 4,5 мм приблизительно в 2 раза превышают соответствующие напряжения для толстых труб. Поэтому можно сделать вывод о том, что наблюдаемые обрывы обсадных труб на Мутновском геотермальном месторождении при использовании труб с толщиной стенки 4,5 мм происходили, очевидно, не только из-за возможных сдвигов горной породы в зоне скважины, но и из-за термических напряжений в зоне идеального контакта обсадной колонны и цементного камня.

Метод расчета напряженного состояния крепи скважин позволяет дать количественную оценку известных способов уменьшения термических напряжений.

В литературе [5, 6, 7, 8] приведены следующие способы уменьшения термических напряжений:

а) предварительное (перед цементацией) натяжение обсадных колонн;

б) создание зазора (неидеального контакта) между обсадной трубой и цементным кольцом в приустьевой зоне скважины;

в) предварительный подогрев приустьевой зоны скважины;

г) установка теплоизолирующего пакера внутри ствола скважины.

Предварительное натяжение колонны уменьшает максимальные сжимающие термические напряжения на внутренней поверхности обсадной трубы практически на величину натяга.

Создание зазора между обсадной колонной и цементным кольцом на 15÷20 % уменьшает термические напряжения при прочной связи обсадной трубы и цементного кольца. В цементном кольце продольные термические напряжения меньше по модулю при неидеальном контакте (с зазором) трубы и цементного камня. Однако на внешней стороне цементного кольца термические напряжения становятся растягивающими, что нежелательно, хотя и неопасно ($\sigma_z^I \leq 2,5$ МПа).

При подогреве устья скважины и идеальном контакте в обсадной колонне в первую секунду пуска тангенциальные и продольные напряжения по всей толщине колонны остаются сжимающими, а без предварительного подогрева эти напряжения меняют свой знак. Отметим, что перепад по толщине колонны продольных и тангенциальных напряжений значительно меньше при подогреве в первую секунду после пуска. Через 10 с после пуска термические напряжения с подогревом и без подогрева становятся одного порядка и в момент $t = 300$ с они сравниваются. Таким образом, предварительный подогрев существенно уменьшает термические напряжения в первые секунды пуска скважины в работу.

Предварительный подогрев в условиях неидеального контакта обсадной трубы и цементного кольца уменьшает радиальные, продольные и тангенциальные напряжения в обсадной колонне приблизительно в два раза. Предварительный подогрев устья скважины уменьшает растягивающие термические напряжения в цементном камне, которые для него очень опасны. В квазистационарном режиме термические напряжения с подогревом устья скважины и без него в цементном камне совпадают.

Для уменьшения термических напряжений многие ученые [6, 7, 9] рекомендуют устанавливать тепловую изоляцию (пакер) различной конструкции внутри ствола скважины. Температурное поле крепи скважины определено при установке пакера со следующими свойствами: толщина пакера $\delta = 1$ мм и 10 мм, коэф-

фициент теплопроводности $\lambda = 0,5$ Вт/(м·К), удельная теплоемкость $c_m = 0,88$ кДж/(кг·К) и плотность $\rho = 2800$ кг/м³. Так, по истечении 10 мин. после пуска скважины термические напряжения в скважине с пакером меньше в 5÷9 раз термических напряжений без пакера и неопасны для стали.

Численная математическая модель теплового и термонапряженного состояния реализована в виде программного комплекса (из двух программ "Well" и "Stress"). Ввод исходных величин (температура, теплофизические свойства) может быть выполнен в виде степенной функции или табличной форме. Результаты расчета выводятся в виде таблицы, графиков распределения температуры по радиусу или высоте расчетной зоны и значений остаточных, механических, термических, действующих и эквивалентных термических напряжений.

ВЫВОДЫ

1. Разработан метод расчета теплового и термонапряженного состояния крепи геотермальной скважины. Метод основан на численном решении дифференциального уравнения теплопроводности в цилиндрической системе координат для двумерной осесимметричной области, состоящей из системы обсадных труб и цементных колец, вложенных в неограниченный горный массив. Термические напряжения найдены в рамках несвязанной квазистатической задачи термоупругости при допущении плоской деформации с учетом идеального и неидеального контактов обсадных труб и цементного камня.

2. Исследовано влияние на распределение температуры, термических и действующих напряжений в крепи геотермальной скважины ряда параметров: давления на устье скважины, состояния контакта обсадная колонна - цементное кольцо, начального теплового состояния скважин, предварительного натяжения обсадных труб, наличия солеотложений и коррозионного износа труб, а также известных способов уменьшения термических напряжений.

Список литературы

1. Bjornsson G., Bodvarsson G. A multifeedzone wellbore simulator. – Geothermal Resources Council, Transactions, 1987. – P. 503–507.
2. Коваленко А.Д. Основы термоупругости. – Киев: Наук. думка, 1970. – 308 с.
3. Новацкий В. Вопросы термоупругости. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1962. – 364 с.
4. Паркус Г. Неустановившиеся температурные напряжения. – М.: Гос. издательство физико-математической литературы, 1963. – 251 с.
5. Магомедов К.М., Данюшевский В.С., Алиев Р.М. Геотермальная скважина. – М., 1992. – 152 с.
6. Павленко В.П., Чичеров Л.Г. Выбор конструкции скважин, предназначенных для нагнетания теплоносителя в пласт // Обзорная информация ВНИИОЭГ. Серия «Бурение». – П.-Камчатка, 1979. – 40 с.
7. Новиков Г.П., Гульянц Г.М., Агеев Ю.Н., Вареца А.И. Бурение скважин на термальные воды. – М.: Недра, 1986. – 229 с.
8. Краевой Ю.А. Обобщение материалов разведки месторождения парогидротерм, в том числе зарубежного опыта, и разработка рекомендаций по ведению поисково-разведочных работ на Мутновском и других месторождениях парогидротерм Камчатки. В 4 т. – Пос. Термальный Камчатской обл., 1990.
9. Геотермальное теплоснабжение / А.Г. Гаджиев, Ю.И. Султанов, П.Н. Ригер и др. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 120 с.