

Н. Н. ВЕРИГИН, В. С. ГОЛУБЕВ
О ГЕНЕРИРОВАНИИ ПАРА В ПОДЗЕМНЫХ
ПЛАСТАХ-КОЛЛЕКТОРАХ

(Представлено академиком А. Н. Тихоновым 16 IV 1975)

В подземных пластах-коллекторах, содержащих нагретую воду, принципиально возможно создание парогенераторов: уже на глубине 5–8 км (а в областях современных термоаномалий на существенно меньших глубинах) температура воды достигает 150–250°С при давлении 500–800 атм. Бурение скважин до этих пластов и соответствующее понижение давления воды в них приведет к образованию в призабойной зоне пара низких параметров, который можно использовать для теплоснабжения, а также в паровых или паро-газовых турбинах геозлектростанций.

При действии скважин подземного парогенератора область пласта, занятая паром, с течением времени будет увеличиваться, оттесняя воду. Технико-экономическая эффективность таких парогенераторов зависит от притока и температуры пара при том или ином заданном его давлении на забое скважин. Для оценки этих параметров рассмотрим одномерную термодинамическую задачу о генерировании пара при действии в пласте прямолинейной галереи (ряда скважин) большой длины. Требуется определить распределение давления пара и воды $P_{1,2}(x, t)$, их температуру $T_{1,2}(x, t)$, а также температуру пород $\theta_{1,2}(x, t)$ в зоне пласта 1 ($0 < x < l(t)$), занятой паром, и в зоне 2 ($l(t) < x < \infty$), заполненной водой, пользуясь уравнениями нестационарной фильтрации и теплопроводности ⁽¹⁾, имеющими вид *

$$\frac{\partial P_{1,2}}{\partial t} = \alpha_{1,2} \frac{\partial^2 P_{1,2}}{\partial x^2}; \quad (1)$$

$$b_{1,2} \frac{\partial T_{1,2}}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa b_{1,2} u_{1,2} T_{1,2} - \kappa \lambda_{1,2} \frac{\partial T_{1,2}}{\partial x} \right) - \gamma_{1,2} S (T_{1,2} - \theta_{1,2}); \quad (2)$$

$$b_3 \frac{\partial \theta_{1,2}}{\partial t} = (1 - \kappa) \lambda_3 \frac{\partial^2 \theta_{1,2}}{\partial x^2} + \gamma_{1,2} S (T_{1,2} - \theta_{1,2}); \quad (3)$$

здесь $\alpha_{1,2}$ — пьезопроводность пара и воды, $\lambda_{1,2}$ — коэффициенты их теплопроводности, кал/(сек·см), $u_{1,2}$ — скорость фильтрации, $\gamma_{1,2}$ — коэффициент теплообмена между водой (паром) и породой, кал/(сек·см²), S — удельная поверхность породы, см⁻¹, κ — пористость, $b_{1,2} = \kappa \rho_{1,2} c_{1,2}$ — объемная теплоемкость пара и воды, кал/см³, $\rho_{1,2}$, $c_{1,2}$ — их плотности и массовые теплоемкости, $b_3 = (1 - \kappa) \rho_3 c_3$ — объемная теплоемкость породы, ρ_3 , c_3 , λ_3 — ее плотность, массовая теплоемкость и теплопроводность.

Обычно величина λ_3 мала ($\lambda_3 \ll \lambda_{1,2}$), а величины $\gamma_{1,2}$ велики. Поэтому, полагая, что в (3) $\lambda_3 \approx 0$, $\gamma_{1,2} \rightarrow \infty$, а производные $\partial \theta_{1,2} / \partial t$ конечны, найдем $T_{1,2} = \theta_{1,2}$ и тогда вместо (2), (3) будем иметь ^(2, 3)

$$(b_{1,2} + b_3) \frac{\partial T_{1,2}}{\partial t} = - \kappa \frac{\partial}{\partial x} \left(b_{1,2} u_{1,2} T_{1,2} - \lambda_{1,2} \frac{\partial T_{1,2}}{\partial x} \right). \quad (4)$$

* Буферным слоем пароводяной смеси между зонами 1 и 2 при малых $u_{1,2}$ пренебрегаем. Уравнения фильтрации и теплопроводности для пара и воды принимают в линеаризованном виде ^(1, 2).

Найдем решение уравнений (1), (4) при следующих начальных и граничных условиях:

$$P_2(x, 0) = P_2(\infty, t) = P_e, \quad T_2(x, 0) = T_2(\infty, t) = T_l; \quad (5)$$

$$P_{1,2}(l, t) = P_s, \quad P_1(0, t) = P_0, \quad u_1(l, t) = u_2(l, t), \quad (6)$$

$$T_{1,2}(l, t) = T_s = \varphi(P_s), \quad u_{1,2}(l, t) = \frac{k}{\mu_{1,2}} \frac{\partial P_{1,2}(l, t)}{\partial x};$$

здесь T_s — температура парообразования при давлении P_s , $\varphi(P_s)$ — уравнение равновесного состояния пар — жидкость, P_0 — заданное давление пара в галерее.

Условия сохранения тепла и массы на границе фазового перехода $l(t)$ будут

$$\rho_2 L \frac{dl}{dt} = \kappa \rho_{1s} c_{1s} T_s u_1(l, t) - \kappa \rho_{2s} c_{2s} T_s u_2(l, t) - \lambda_1 \frac{\partial T_1(l, t)}{\partial x} + \lambda_2 \frac{\partial T_2(l, t)}{\partial x}; \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \kappa \int_0^l \rho_1(x, t) dx = & - \frac{k}{\mu_1} \int_0^t \rho_1(0, t) \frac{\partial P_1(0, t)}{\partial x} dt + \\ & + \frac{k}{\mu_2} \int_0^t \rho_2(l, t) \frac{\partial P_2(l, t)}{\partial x} dt, \end{aligned} \quad (8)$$

где L — теплота парообразования, k — проницаемость пласта, $\mu_{1,2}$ — вязкость пара и воды, c_{2s} и c_{1s} — теплоемкость воды и равновесного с ней пара при температуре T_s , ρ_{2s} и ρ_{1s} — их плотности.

Так как $\mu_1 \ll \mu_2$, то можно принять $\mu_1 = 0$ и поэтому $\alpha_1 \rightarrow \infty$. Чтобы при этом расход пара был конечным и выполнялось третье условие в (6), а также равенство (8), необходимо принять $P_1(x, t) = P_s = P_0 = \text{const}$. Тогда температура в зоне 1, определяемая по кривой равновесия пар — жидкость (четвертое условие в (6)), также будет постоянной, т. е. $T_1(x, t) = T_s = \varphi(P_s)$. При этом равенства (7) и (8) после дифференцирования по t с учетом третьего условия в (6) (так что $u_1(0, t) = u_1(l, t) = u_2(l, t)$) примут вид

$$\rho_{2s} L \frac{dl}{dt} = \lambda_2 \frac{\partial T_2(l, t)}{\partial x} - \kappa u_2(l, t) T_s (\rho_{2s} c_{2s} - \rho_{1s} c_{1s}); \quad (9)$$

$$\kappa \rho_{1s} \frac{dl}{dt} = -(\rho_{2s} - \rho_{1s}) u_2(l, t). \quad (10)$$

Таким образом, необходимо определить величины P_s , $P_2(x, t)$, $T_2(x, t)$ из уравнений (1) и (4) при условиях (5), (6), (9), (10).

Решение уравнения (1) будем искать в виде

$$P_2 = A \operatorname{erfc} \eta + B, \quad \eta = 0,5 \frac{x}{\sqrt{\alpha_2 t}}. \quad (11)$$

Удовлетворяя в (11) первым условиям в (5) и (6), найдем постоянные интегрирования A и B . Подставляя эти значения в (11), получим

$$P_2 = P_e - (P_e - P_s) \operatorname{erfc} \eta / \operatorname{erfc} \beta, \quad (12)$$

причем координата границы раздела пар — вода будет

$$l = 2\beta \sqrt{\alpha_2 t}, \quad \beta = \text{const}. \quad (13)$$

$$u_2 = -\frac{k}{\mu_2} \frac{\partial P_2}{\partial x} = -\frac{k}{\mu_2} (P_e - P_s) \frac{\exp(-\eta^2)}{\sqrt{\tilde{n}\alpha_2 t} \operatorname{erfc} \beta} \approx -\frac{m}{\sqrt{t}}, \quad (14)$$

где

$$m = \frac{k(P_e - P_s)}{\mu_2 \sqrt{\tilde{n}\alpha_2} \operatorname{erfc} \beta}.$$

Приближенное равенство в (14) справедливо с точностью до 5% при $\alpha_2 t / x^2 > 5$.

Подставляя (14) в (4), получим

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} + \frac{n}{\sqrt{t}} \frac{\partial T_2}{\partial x} - a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0, \quad (15)$$

где

$$n = \frac{\kappa m b_2}{b_2 + b_3}, \quad a = \frac{\kappa \lambda_2}{b_2 + b_3}.$$

Решение уравнения (15) ищем в виде $(^2, ^4)$

$$T_2 = C \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{at}} + \frac{n}{\sqrt{a}} \right) + D. \quad (16)$$

Удовлетворяя в (16) условиям (5) и (6) для T_2 , получим постоянные интегрирования C и D . Вводя их в (16), будем иметь

$$T_2 = T_e - (T_e - T_s) \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{at}} + \frac{n}{\sqrt{a}} \right) \right] / \operatorname{erfc} \left(\beta \sqrt{\frac{\alpha_2}{a}} + \frac{n}{\sqrt{a}} \right). \quad (17)$$

Подставляя (14) и (17) в условия (9), (10), после несложных преобразований получим

$$N_1 = \frac{\exp(-r^2)}{\beta \operatorname{erfc} r} + N_2 \frac{\exp(-\beta^2)}{\operatorname{erfc} \beta}; \quad (18)$$

$$N_3 = e \exp(\beta^2) \operatorname{erfc} \beta, \quad (19)$$

где

$$N_1 = \frac{\sqrt{\tilde{n}\alpha_2} \rho_{2s} L}{\lambda_2 (T_e - T_s)}; \quad (20)$$

$$N_2 = \frac{k(\rho_{2s} c_{2s} - \rho_{1s} c_{1s}) T_s (P_e - P_s)}{\mu_2 \lambda_2 (T_e - T_s)} \sqrt{\frac{a}{\alpha_2}}; \quad (21)$$

$$N_3 = \frac{k(\rho_{2s} - \rho_{1s}) (P_e - P_s)}{\rho_{2s} \mu_2 \alpha_2}; \quad (22)$$

$$r = \beta \sqrt{\frac{\alpha_2}{a}} + \frac{n}{\sqrt{a}}. \quad (23)$$

Уравнения (18) и (19) (с учетом (20)–(23)) решаются относительно β и $T_s = \varphi(P_s)$ посредством итерации, а именно: принимается произвольно величина P_s , по таблицам или номограммам ⁽⁵⁾ находятся соответствующие P_s значения $T_s = \varphi(P_s)$, ρ_{1s} , ρ_{2s} ; на основе (19) определяется β ; подставляя β в (18), находят величину P_s в первом приближении. Этот итерационный процесс повторяется до требуемой сходимости.

Дебит пара на единицу длины галереи $q = u_2 M$ (M — мощность пласта). Таким образом, при известных параметрах α_2 , a_2 , P_e , T_e и $T_s = \varphi(P_s)$ находятся главные характеристики подземного парогенератора: дебит пара q и его температура T_s . При больших q в скважины вместо пара может поступать пароводяная смесь. Дебит пара (или смеси) со временем снижается.

Поступило
10 X 1974

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ Н. Н. Веригин, Тр. ВНИИ ВОДГЕО, в. 9 (1964). ² Развитие исследований по теории фильтрации в СССР, под ред. П. Я. Кочкиной, «Наука», 1969. ³ Н. Н. Веригин, В. С. Голубев, В. Н. Шарапов, ДАН, т. 211, № 2 (1973). ⁴ П. П. Золотарев, Изв. АН СССР, сер. хим., № 6 (1969). ⁵ И. П. Вукалович и др., Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара, Изд-во Стандартов, М., 1969.