

УДК 550.3+532.5+551.21

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НЕУСТАНОВИВШИХСЯ ТЕЧЕНИЙ ГЕОФЛЮИДОВ ПРИ ГРЯЗЕВУЛКАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

© 2009 г. А. В. Доманский, В. В. Ершов, член-корреспондент РАН Б. В. Левин

Поступило 28.07.2008 г.

Грязевые вулканы достаточно широко распространены в мире, они встречаются, например, на Сахалине, в Краснодарском крае, в Азербайджане и т.д. В данной работе рассматривается математическая модель, описывающая движение и процесс извержения геофлюидов в грязевом вулкане. На основе этой модели впервые предложен метод получения единственного решения нестационарной обратной задачи по определению глубины залегания корня вулкана и источника газа. При этом считаются известными период времени между двумя извержениями вулкана и физико-механические свойства геофлюида, водоглинистой брекчии и проницаемость подводящего канала.

Всестороннее исследование грязевого вулканизма позволяет оценивать возможность наличия месторождений газа и его запасы в данном регионе, а также изучать динамику флюидного режима в земной коре. Кроме того, количественный и качественный анализ продуктов и периодичности извержений грязевых вулканов дают возможность изучить их влияние на соотношение парниковых газов в атмосфере. Важным также является определение связи между сейсмичностью и проявлениями грязевого вулканизма в данном регионе.

Работ по построению полных моделей грязевого вулканизма в настоящее время существует немного. Например, в работе [1] на основе известного решения для установившегося движения газа в скважине дана оценка глубины залегания источника газа для грязевого вулкана. В [2] подводящий канал грязевого вулкана представлен в виде вертикального цилиндрического канала, который заполнен движущейся в изотермических условиях грязевой смесью; решение прямой задачи дано на основе системы уравнений компакций. В работе [3] для оценки миграции газа в грязевулканических каналах используется ряд известных формул из механики жидкости и газа.

В настоящей работе считается, что причиной возникновения грязевого вулканизма является образование тектонических разломов. В области разломов по механизму нисходящей фильтрации из перекрывающих осадочных толщ образуется пробка водоглинистой брекчии, подпираемая снизу природным газом, исходящим из питающего грязевой вулкан источника газа. Подводящий канал вулкана считается трещиновато-пористой средой, заполненной брекчией и газом. Между водоглинистой пробкой и газом со временем устанавливается неустойчивое равновесие, которое нарушается с ростом давления вытесняющего брекчию газа. Из условия равновесия определяются глубины залегания корня вулкана и источника газа, т.е. находится решение обратной задачи. Процесс вытеснения газом водоглинистой брекчии рассматривается до момента его извержения, при котором происходит сброс давления газа. Затем снова происходит заполнение подводящего канала и перекрытие доступа глубинному газу. Таким образом подготавливается новое извержение грязевого вулкана. Газ, оставшийся в области смеси брекчии и газа, в течение длительного времени постепенно выходит на земную поверхность через систему грифонов грязевого вулкана.

Схема строения вулкана дана на рис. 1, где α – угол падения разломной зоны, L , L_1 – глубина залегания и длина подводящего канала, его начало соответствует началу координат; $L - H$, $L_1 - H_1$ – глубина залегания и длина слоя водоглинистой брекчии.

Фильтрационные процессы считаются неизотермическими, поэтому в уравнении состояния идеального газа вводится коэффициент сжимаемости; задачи решаются в одномерной постановке. Квадрат давления газа $p_g^2 \equiv u(x, t)$ удовлетворяет уравнению Лейбенсона [4], записанному в безразмерной форме, и начально-краевым условиям вида

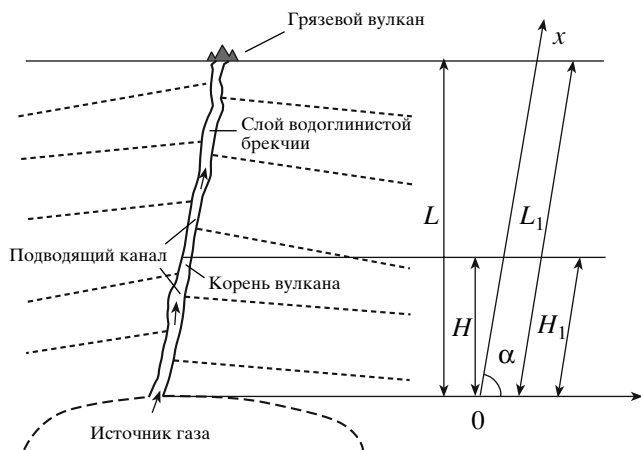


Рис. 1. Схематический разрез грязевого вулкана и основные обозначения.

$$\begin{aligned} \sigma u_t &= u_{xx} + 2\sigma u_x, \quad u(0, t) = u_0 = \text{const}, \\ u_x(1, t) + 2\sigma u(1, t) &= 0, \quad u(x, 0) = 0, \\ \sigma &= \frac{\rho_0 T_0 g H}{\rho_0 z T}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $u_0 = p_s^2$, p_s – давление в источнике газа; на границе $x = 1$ поток газа равен нулю; $T_0 = 273.15$ К, $p_0 = 101325$ Па, ρ_0 – плотность газа при нормальных условиях, z – коэффициент сжимаемости, T – температура, g – ускорение свободного падения. Характерные длина H_1 и время фильтрации газа $\frac{m\mu_g H_1^2}{k p_s \sigma} \equiv t_g$, где m, k – пористость и проницаемость подводющего канала, μ_g – вязкость газа.

Решение задачи (1) дает распределение давления газа в подводящем канале в виде

$$\begin{aligned} \frac{p_g(x, t)}{p_s} &= \\ &= e^{-\sigma x} \sqrt{1 - 2e^{-\sigma x - \sigma t} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\gamma_k}{\sigma + \sigma^2 + \gamma_k^2} e^{-\gamma_k^2 t / \sigma} \sin \gamma_k x} \\ &\equiv \Phi_0(\sigma, x, t), \quad \text{tg } \gamma_k = \frac{\gamma_k}{\sigma}. \end{aligned} \quad (2)$$

Формула (2) далее используется при решении обратной задачи.

Классическая модель двухфазной фильтрации имеет вид [5]

$$\begin{aligned} v_b &= -k\mu_b^{-1} f_b(s)(p_{b,x} + \rho_b g \sin \alpha), \\ v_g &= -k\mu_g^{-1} f_g(s)(p_{g,x} + \rho_g g \sin \alpha), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} m s_t + v_{g,x} &= 0, \quad -m s_t + v_{b,x} = 0, \\ p_g - p_b &= p_k(s) \equiv p_k^0 \Phi(s). \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь $s_0 \leq s \leq s^0$ – газонасыщенность, s_0, s^0 – остаточные газонасыщенности, p_b, μ_b – давление и вязкость брекчии, $v_b, v_g, f_b, f_g, \rho_b, \rho_g$ – скорости фильтрации, относительные фазовые проницаемости и плотности брекчии и газа соответственно, p_k – капиллярное давление, $p_k^0 = \gamma \cos \theta \sqrt{\frac{m}{k}}$, γ – коэффициент поверхностного натяжения, θ – краевой угол смачивания, Φ – функция Леверетта [5]. Равенства (3) называются обобщенными законами Дарси, а уравнения (4) – уравнениями неразрывности фаз и капиллярного скачка давлений на границе раздела фаз.

Начально-краевые условия для системы (3), (4) имеют вид

$$\begin{aligned} x = L_1: p_g &= p_b = p_0, \quad x = L_1 - H_1: v_b = 0, \\ p_g &= p_H, \quad t = 0: s = s_0. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь p_0 – давление на дневной поверхности, p_H – давление на границе между газом и водоглинистой брекчией; эти величины считаются известными.

Система уравнений (3), (4) сводится к одному безразмерному уравнению вида

$$\begin{aligned} s_t &= (a(s)s_x + b(s)V(t) + d(s)\beta)_x, \\ \Delta p - \int_0^{s(0,t)} b(s)\phi'_s ds + \beta \int_0^1 b(s) dx \\ V(t) &= \frac{\int_0^1 c(s) dx}{\int_0^1 c(s) dx}. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \phi'_s &= \frac{d\Phi}{ds}, \quad \mu = \frac{\mu_g}{\mu_b}, \quad c = (f_g + \mu f_b)^{-1}, \\ a &= \mu f_b f_g \phi'_s c, \quad b = \mu f_b c, \quad d = \mu f_b f_g c, \\ \beta &= \frac{(\rho_g - \rho_b)(L - H)g}{p_k^0}, \quad \Delta p = \frac{p_H - p_0 - \rho_g g(L - H)}{p_k^0}. \end{aligned}$$

Так как $a > 0$ для $s_0 < s < s^0$ и $a(s_0) = a(s^0) = 0$, то уравнение (6) имеет параболический тип и вырождается в гиперболическое уравнение при значениях искомого решения s_0 и s^0 . Характерные длина и время двухфазной фильтрации равны $L_1 - H_1$

$$\text{и } \frac{m\mu_g(L_1 - H_1)^2}{k p_k^0} \equiv t_f.$$

Начально-краевые условия (5) после преобразований примут следующий вид:

$$\begin{aligned} x = 0: a(s)s_x + b(s)V(t) + d(s)\beta &= 0, \\ x = 1: s &= s_0, \quad t = 0: s = s_0. \end{aligned} \quad (7)$$

Пусть задан интервал времени t_e между двумя последовательными извержениями грязевого вулкана. Из предположения о том, что длительности двухфазной фильтрации и фильтрации газа соответственно пропорциональны отношениям времен t_g и t_f к их сумме, следует, что безразмерное время фильтрации газа до начала вытеснения водоглинистой брекчии равно $\frac{t_e}{t_g(H) + t_f(L, H)} = t_*(L, H)$. Тогда из условия равенства давлений слоя водоглинистой брекчии и подпирающего его газа при $t = t_*$ с учетом (2) вытекает, что

$$\frac{\rho_b L - H}{\rho_s L} = \Phi_0(\sigma(H), 1, t_*(L, H)), \quad (8)$$

где ρ_s – средняя плотность горных пород. В уравнении (8) содержатся две неизвестные величины, и для однозначного определения L и H надо задать дополнительное условие.

Пусть $\Phi(\sigma, t) \equiv \sigma \Phi_0(\sigma, 1, t)$. Условие $\max_{\sigma} \Phi(\sigma, t) = \Phi(\sigma_*, t)$ однозначно определяет зависимость $\sigma_* = \sigma_*(t)$ и, соответственно, величину $H_*(t)$. С учетом (8) находим длину $L_*(t) = (1 - \rho \Phi_0(\sigma_*(t), 1, t))^{-1} H_*(t)$, $\rho = \frac{\rho_s}{\rho_b}$. Поэтому решение обратной задачи сводится к решению уравнения $t_*(L_*(t), H_*(t)) = t$. Анализ формулы (2) показывает, что решение этого уравнения существует и единственно в широком диапазоне изменения параметров.

На рис. 2 дан пример номограммы, отражающей связь L и H с проницаемостью подводящего канала в зависимости от величины времени установления равновесия $t_* = t$. Видна однозначная зависимость между указанными параметрами. Данные для расчета были выбраны такими: $\rho_0 = 1.46 \text{ кг/м}^3$, $\rho_b = 1800 \text{ кг/м}^3$, $\rho_s = 2500 \text{ кг/м}^3$, $zT = 1100 \text{ К}$, $\mu_g = 69 \times 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$, $t_e = 631152000 \text{ с}$ (20 лет), $\alpha = 60^\circ$, $\gamma \cos \theta = 50 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$.

Проведенные расчеты показывают, что проницаемость подводящего канала будет основным параметром, определяющим глубины залегания корня вулкана и источника газа. Кроме того, глубина залегания источника газа зависит от плотности газа: чем она меньше, тем больше глубина залегания источника. Вычисления также дают, что

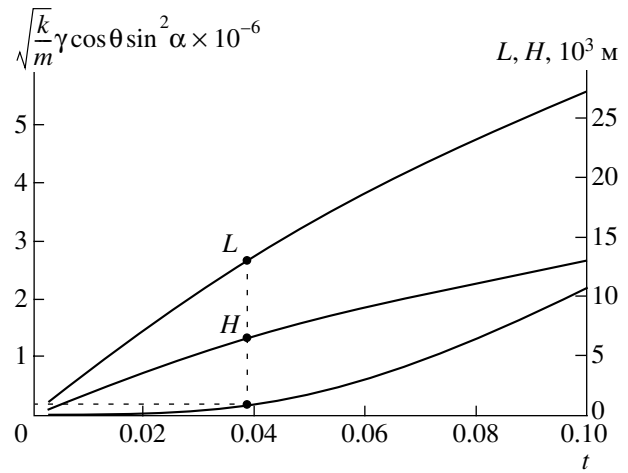


Рис. 2. Номограмма, отражающая связь L и H с проницаемостью подводящего канала.

функция $\Phi_0(\sigma_*(t), 1, t) \approx e^{-1}$ при любых $t > 0$ (в частности, при $t = t_*$). Поэтому в силу (8)

$$\frac{L_* - H_*}{H_*} \approx \frac{\rho}{e - \rho}. \quad (9)$$

Например, если $\rho_b = 1800 \text{ кг/м}^3$, $\rho_s = 2500 \text{ кг/м}^3$, то $\frac{L_* - H_*}{H_*} \approx 1.05$ и корень вулкана находится примерно посередине подводящего канала (что отмечено и в работе [2]) при любом периоде извержения вулкана.

Правая часть (9) отрицательна при $\rho > e$ и тогда не существует равновесия слоев брекчии и газа, грязевой вулкан не образуется, а газ непрерывно истекает в атмосферу.

Можно показать, что $\sigma_* = 1$ при $t = \infty$. Согласно (2) $p_g(1, \infty) = p_s e^{-1} = \rho_s g L e^{-1}$. Поэтому, если сила сопротивления, или давление p_c , оказываемая слоем брекчии, больше $\rho_s g L e^{-1}$, то равновесие между брекчией и газом невозможно и грязевой вулкан является погребенным. Отсюда вытекает, что $L \leq \frac{e p_c}{\rho_s g}$ и максимальная глубина залегания источника газа для погребенного грязевого вулкана равна $L_{\max} = \frac{e p_c}{\rho_s g}$.

Исследование вытеснения брекчии газом основывается на численном решении задачи (6), (7). Алгоритм расчета этой задачи повторяет используемый в [6], поэтому здесь не дается. Параметры расчета в дополнение к приведенным выше были, следующими:

$$\begin{aligned} \mu_b &= 33 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}, \quad \rho_g = 362 \text{ кг/м}^3, \\ k &= 0.217 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2, \quad m = 0.1, \end{aligned}$$

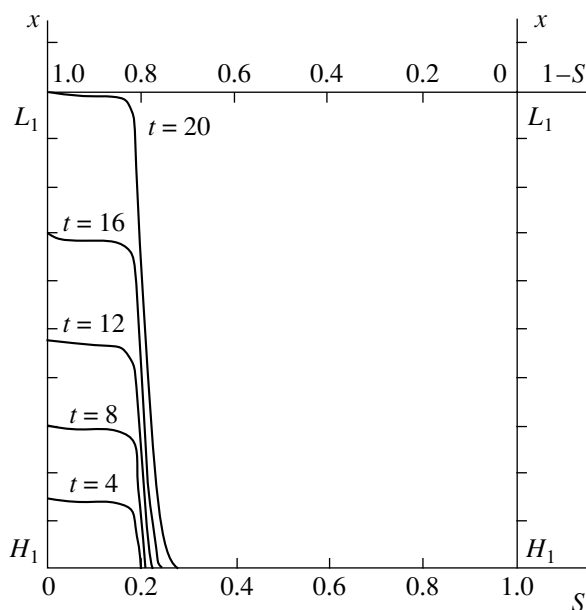


Рис. 3. Распределение газонасыщенности по длине подводящего канала при вытеснении газом водоглинистой брекчии (время указано в годах).

$$p_H - p_0 = 162.22 \text{ МПа}, \quad L = 7890 \text{ м}, \\ H = 3790 \text{ м}, \quad L - H = 4100 \text{ м}, \quad zT = 836 \text{ К}, \\ s_0 = 0.1, \quad s^0 = 0.9.$$

Функции Леверетта и относительных проницаемостей

$$\varphi(s) = \left(\frac{s - 0.1}{0.9 - s} \right)^3, \quad f_b = (0.9 - s)^3, \\ f_g = (s - 0.1)^3.$$

На рис. 3 приведен пример расчета задачи вытеснения брекчии газом в различные моменты времени. Видно, что после прорыва газа объем оставшейся в подводящем канале брекчии является значительным. Поэтому после извержения и сброса давления газа под действием гравитационных сил будет происходить достаточно быстрое заполнение водоглинистой брекчией той части подводящего канала вулкана, которую ранее занимал вышедший из канала газ. Это в конечном

итоге приведет к закупорке подводящего канала и подготовке нового извержения. Численные расчеты показывают, что отношение вязкостей брекчии и газа, а также перепад давления $p_H - p_0$ являются первостепенными параметрами, влияющими на длительность и полноту вытеснения брекчии. Например, увеличение вязкости водоглинистой брекчии снижает полноту ее вытеснения и повышает длительность этого процесса, а рост $p_H - p_0$ снижает продолжительность вытеснения.

Таким образом, единственность решения обратной задачи по нахождению глубин залегания корня и источника газа грязевого вулкана определяется из условия максимума давления газа у основания водоглинистой пробки. Основным параметром, определяющим глубины залегания корня и источника газа грязевого вулкана, является проницаемость подводящего канала. Независимо от периода извержения вулкана отношение высот слоев газа и водоглинистой брекчии на момент установления равновесия между ними будет почти постоянным. Полнота и продолжительность вытеснения газом водоглинистой брекчии до момента извержения грязевого вулкана зависят от соотношения их вязкостей и перепада давления. Определены условия, при которых грязевой вулкан не образуется или является погребенным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горкун В.Н., Сырык И.М. // Геология и геофизика. 1967. № 2. С. 30–42.
2. Каракин А.В., Каракин С.А. // ДАН. 2000. Т. 374. № 5. С. 684–687.
3. Иванов В.В., Гулиев И.С. Массообмен, углеводородообразование и фазовые переходы в осадочных бассейнах. Баку: Нафта-Пресс, 2002. 107 с.
4. Лейбензон Л.С. Движение жидкостей и газов в пористой среде. М.; Л.: Гостехиздат, 1947. 44 с.
5. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа. М.: Недра, 1984. 208 с.
6. Антонцев С.Н., Доманский А.В., Пеньковский В.И. Фильтрация в прискважинной зоне пласта и проблемы интенсификации притока. Новосибирск: Изд-во ИГиЛ СО АН СССР, 1989. 191 с.