

7. Исаков Р. В.— В кн.: Горение и пожары в лесу.— Красноярск, 1984.
8. Исаков Р. В. Канд. дис. Красноярск: ИЛИД СО АН СССР, 1986.
9. Курбатский П. П.— В кн.: Вопросы лесоведения. Т. 1.— Красноярск, 1970.
10. Дубов А. С., Быкова Л. П., Марунич С. В. Турбулентность в растительном покрове.— Л.: Гидрометеониздат, 1978.
11. Шец Дж. Турбулентное течение. Процессы вдува и перемешивания.— М.: Мир, 1984.
12. Гришин А. М., Берцун В. Н., Зинченко В. И. Итерационно-интерполяционный метод и его приложения.— Томск: ТГУ, 1981.
13. Бузыкин А. М. Продуктивность сосновых лесов.— М.: Наука, 1978.

*Поступила в редакцию 22/XII 1986,
после доработки — 30/III 1987*

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОЧАГА ВНУТРИПЛАСТОВОГО ГОРЕНИЯ ПРИ ПОРЦИОННОЙ ПОДАЧЕ ВОДЫ И ВОЗДУХА В ПЛАСТ

*И. И. Богданов
(Москва)*

Внутрипластовое горение (ВГ) представляет собой совокупность взаимосвязанных процессов, каждому из которых в данных условиях соответствует свое характерное физическое время (при ВГ эти времена нередко отличаются на порядки для различных процессов и условий). Очаг горения поддерживается подводом окислителя через слой пористого пласта, освобожденного от углеводородной фазы¹, сопровождается теплообменом с окружающими пласт породами, фазовыми превращениями, конвективной и кондуктивной теплопередачей, фильтрационным переносом фаз, насыщающих пласт. Существенные различия в характерных временах приводят к тому, что относительно медленные процессы активно протекают лишь в узких зонах (например, кондуктивная теплопередача — в зонах сильных температурных градиентов) и слабо проявляются в других областях. Все это, однако, справедливо лишь при непрерывно поддерживаемом очаге реакции в пласте.

Ситуация принципиально меняется, если возникают достаточно длительные перерывы в подаче окислителя в пласт, когда тепловыделение и массообмен в реакции прекращаются. Обычно при ВГ в пласт подается смесь воды и воздуха [1]. Известно, однако, что при иницировании очага горения в прискважинной зоне воздухом за счет самовоспламенения топлива процесс может сопровождаться пульсациями с периодическим формированием обратного тока [2]. В [3] показано, что избежать пульсаций можно за счет попеременной подачи достаточно большими порциями отдельно пара и воздуха в зону иницирования. Пульсации появляются в результате взаимодействия фильтрации и горения при иницировании. Поскольку отношение характерных времен этих процессов сильно меняется с температурой, фаза притока окислителя сменяется резкой активизацией горения, формированием области повышенного давления и затем оттока окислителя в фазе релаксации давления и температуры [2]. Разделение во времени фильтрации и горения препятствует пульсационному распространению очага ВГ в прискважинной зоне. Рассмотрим подробнее эволюцию очага ВГ при временном прекращении подачи окислителя.

Постановка задачи. Система одномерных уравнений трехфазной пятикомпонентной фильтрации и баланса тепловой энергии записывается для тонкого однородного горизонтального пласта в пренебрежении капиллярным и диффузионным переносом при галерейной схеме размещения

¹ Рассматривается только проточный вариант горения.

скважин (плоскопараллельная симметрия) [2—4]:

$$\frac{m \partial (\rho_i s_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_i u_i)}{\partial x} = J_i, \quad (1)$$

$$\frac{m \partial (f_k \rho_3 s_3)}{\partial t} + \frac{\partial (f_k \rho_3 u_3)}{\partial x} = I_k, \quad (2)$$

$$\frac{\partial (C_0 T)}{\partial t} + \frac{\partial (UT)}{\partial x} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q_T, \quad (3)$$

$$s_1 + s_2 + s_3 = 1, \quad \rho_3 = \mu p / RT. \quad (4)$$

Здесь ρ_i , s_i , u_i — плотности, насыщенности, потоки углеводородной, водной и газовой фаз ($i = 1, 2, 3$ соответственно); $\rho_{1,2} = \text{const}$; f_k — массовая доля в газовой фазе водяного пара и кислорода (соответственно $k = 1, 2$); J_i , I_k — источниковые члены; T — температура; μ — молекулярная масса газа; R — универсальная газовая постоянная; p — давление²; λ — теплопроводность;

$$C_0 = (1 - m) \rho_0 c_0 + m (\rho_1 c_1 s_1 + \rho_2 c_2 s_2 + \rho_3 c_3 s_3);$$

$$U = \rho_1 c_1 u_1 + \rho_2 c_2 u_2 + \rho_3 c_3 u_3;$$

$$u_i = - \frac{k_i}{b_i} \frac{\partial p}{\partial x}; \quad k_i = k_0 \varphi_i(s_i); \quad b_i = b_i(T);$$

$$c_3 = (1 - f_1) c_3^0 + f_1 c_3^1;$$

c_i , c_3^1 , c_3^0 — теплоемкости фаз, водяного пара и «сухой» газовой смеси; m , k_0 , ρ_0 , c_0 — пористость, проницаемость, плотность, теплоемкость пористой среды; φ_i — относительные фазовые проницаемости; b_i — вязкость фаз.

Скорость реакции окисления записывается в виде

$$R_c = - J_1 = (m \rho_1 s_1)^{j_1} (m \rho_3 c_3 f_2)^{j_2} z \exp(-E/RT),$$

где $j_{1,2}$, z , E — порядки по топливу и окислителю, предэкспонент и энергия активизации реакции. Скорость фазового превращения воды полагалась пропорциональной разности парциального давления и давления насыщения водяного пара (p_s , $p_*(T)$): $V_s = - J_2 = \varepsilon (p_* - p_s)$, $\varepsilon = \text{const}$. Далее, $J_3 = -(J_1 + J_2)$, $I_1 = \mu_1 R_c + V_s$, $I_2 = -\mu_2 R_c$, $\mu_{1,2}$ — стехиометрические коэффициенты для водяного пара и кислорода в реакции горения; $Q_T = q R_c - r V_s - \alpha (T - T_0)$; q , r — тепловые эффекты реакции и фазового перехода; α — коэффициент теплоотвода; T_0 — начальная пластовая температура. Введем безразмерную координату $x' = x/L$, L — размер пласта, опуская в дальнейшем штрих над безразмерной переменной. На границе задавались:

$$x = 0 \text{ (нагнетательная граница пласта): } T = T^0(t),$$

$$f_k = f_k^0, \quad \rho_i u_i = G_i(t), \quad G_{1,2} = 0,$$

$$T^0(t) = \begin{cases} T^0 > T_0, & t < t_p, \\ T_0, & t \geq t_p, \end{cases} \quad (5)$$

$$G_3(t) = \begin{cases} G_3 > 0, & t < t_s, \quad t \geq t_s + t_r, \\ 0, & t_s \leq t < t_s + t_r; \end{cases}$$

$x = 1$ (эксплуатационная граница пласта): $p = p_0$, $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$. В начальный момент времени задавалось равномерное распределение исходных величин: $t = 0$, $T = T_0$, $p = p_0$, $s_i = s_{i0}$, $f_k = f_{k0}$.

При перерывах в подаче в пласте преобладают диффузионный перенос окислителя, кондуктивная теплопередача и теплоотвод в окружающую

² В крупномасштабном приближении [5] давление одинаково для всех фаз.

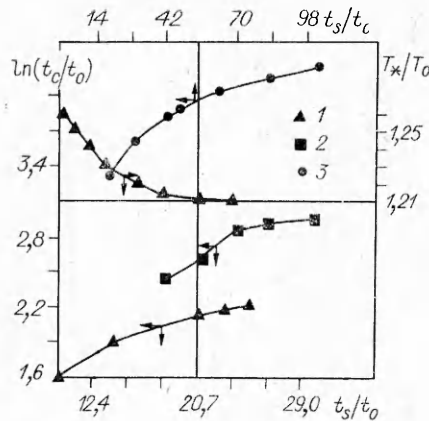


Рис. 1. Граница тепловой устойчивости очага ВГ по отношению к перерывам в подаче окислителя. $t_0 = 1,2 \cdot 10^5$ с; α : 1 — 0,03, 2 — 0,02, 3 — 0,01.

коэффициент диффузии; l_c — протяженность высокотемпературной зоны. При $D_0 \approx 10^{-6}$ м²/с, $f_2^0 = 0,22$, $T = 600$ К, $p = 10$ МПа ужесточим оценку, приняв $l_c \approx 10^{-2}$ м, и получим $u_D \approx 7 \cdot 10^{-7}$ м/с $\ll u_F$. При перерыве в подаче диффузионный перенос не дает заметного эффекта в силу незначительного количества окислителя в пласте: $(\rho_3 f_2^0 q) / (\mu_2 \rho_0 c_0 T) \ll 1$, поэтому пренебрежение диффузионным переносом несущественно.

Уравнение теплового баланса (3) записано для $\lambda = \text{const}$, поскольку теплопередача осуществляется в основном по пористой породе пласта. В диапазоне температур, представляющем интерес ($370 \leq T \leq 620$ К), теплопроводность материалов, из которых сложены нефтяные коллекторы, изменяется на несколько процентов. Система уравнений (1)–(5) решалась численно с использованием метода сеток [3]. В качестве функций φ_i брались зависимости, приведенные в [4]. В отличие от [3] полагалось $j_1 = 0$, $j_2 = 1$, $z' = z\rho_*$ (ρ_* — концентрация топлива в единице объема пласта). По результатам расчетов конкретных вариантов строились распределения величин и интегральные зависимости (на рис. 1 каждая выделенная точка есть результат нескольких вариантов расчета).

Результаты расчетов. Оценим характерные времена фильтрации воды ($b_2(T_0) = 1$ мПа · с) через пласт (масштаб $L = 100$ м, мощность $H = 10$ м, проницаемость $k_0 = 0,5$ дарси ($0,5 \cdot 10^{-12}$ м²), перепад давлений между границами нагнетания и эксплуатации $\bar{p}_0 = 1$ МПа, теплоемкость $C_0 = 2$ МДж/(м³ · К) и релаксации тепловой волны за счет теплоотвода в окружающие пласт породы ($\lambda = 1$ Вт/(м · К)):

$$\tau_f = \frac{L^2 b_2}{k_0 p_0} = 2 \cdot 10^7 \text{ с}, \quad \tau_r = \frac{H^2 C_0}{\lambda} = 2 \cdot 10^8 \text{ с}.$$

Таким образом, $\tau_f \ll \tau_r$, т. е. фильтрация по отношению к релаксации является лимитирующим процессом. Это означает, что очаг ВГ длительное физическое время может существовать без подвода окислителя, в частности в условиях полного отсутствия фильтрационных перетоков. Детальное исследование тепловой устойчивости очага ВГ по отношению к перерывам в подаче окислителя показало, что возобновление подачи воздуха после некоторого перерыва в этих условиях приводит к практически моментальной активизации горения. Критическое время перерыва в подаче $t_c = t_r^*$ и критическая температура в зоне повторного возгорания T_* определяются уровнем теплоотвода. Зависимости $t_c(t_s)$ и $T_*(t_s)$ представлены на рис. 1. Величина t_c находилась из условия отсутствия проскока окислителя через зону тепловыделения в эксплуатационной границе пористой среды. Восстановление очага ВГ в критических

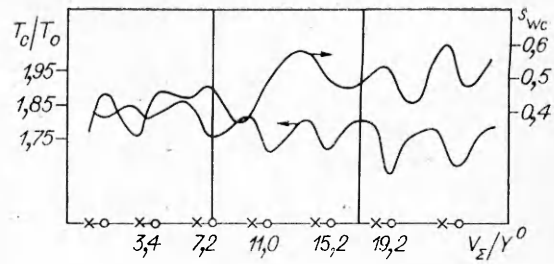


Рис. 2. Температура и насыщенность воды в высокотемпературной зоне при порционной подаче; $s_w = 1$.

условиях скорость фильтрации газа $u_F \approx 10^{-(3+4)}$ м/с существенно выше эффективной скорости диффузии $u_D \approx D f_2^0 / l_c$; $D = D_0 \cdot (T/T_1)^{3/2} \cdot p_1/p$; $T_1 = 273$ К; $p_1 = 0,1$ МПа; $D_0 = D(T_1, p_1)$ — коэф-

условиях происходит за счет тепла, накопленного в зоне прогрева волны ВГ, т. е. там, где значительна доля теплоемких жидких фаз в порах и повышенное содержание топлива для реакции.

Из сказанного следует, что тепловую волну, образовавшуюся в результате процесса ВГ, можно длительное время продвигать по пласту тем или иным инертным агентом, не обеспечивая транспорт кислорода к высокотемпературной зоне. В качестве такого агента при ВГ используется вода, что позволяет говорить об осуществлении порционной подачи воздуха и воды. Поддержание ВГ посредством такой подачи интересно благодаря возможности использования различия в величинах характерных времен таких, как τ_f и τ_r .

Будем подавать воздух и воду попеременно большими порциями. Тогда условия (5) преобразуются:

$$\begin{aligned}
 G_1 = 0, \quad G_2(t) &= \begin{cases} 0, & t_{s,j} + t_{r,j} \leq t < t_{s,j+1}, \\ G_2, & t_{s,j+1} \leq t < t_{s,j+1} + t_{r,j+1}, \end{cases} \\
 G_3(t) &= \begin{cases} G_3, & t_{s,j} + t_{r,j} \leq t < t_{s,j+1}, \\ 0, & t_{s,j+1} \leq t < t_{s,j+1} + t_{r,j+1}, \end{cases} \\
 X_j^0 &= \int_{t_{s,j}}^{t_{s,j}+t_{r,j}} G_2 dt, \quad Y^0 = \int_{t_{s,j}+t_{r,j}}^{t_{s,j+1}} G_3 dt,
 \end{aligned} \tag{5a}$$

где Y^0 , X_j^0 — задаваемые порции воздуха и воды; j — номер порции.

Отличие условий порционной подачи (тепловых и фильтрационных) от непрерывного нагнетания сказывается в том, что очаг ВГ вынужден постоянно «подстраиваться» в периодически изменяющихся условиях за и перед зоной горения, и в том, что на процесс существенно влияет состояние пласта за зоной горения. Вследствие этого эволюция очага горения усложняется.

Активизация горения, подъем температуры, увеличение высокотемпературной зоны сопровождаются поступлением порции воздуха в зону реакции. Интенсивная тепловая релаксация, связанная с появлением теплоемкого ненагретого балласта, сокращением поступления окислителя и падением интенсивности горения, происходит в те моменты, когда в зону реакции внедряется вал очередной порции воды. Таким образом, при порционной подаче волна ВГ, непрерывно перестраиваясь, переходит от одного состояния к другому. Этот факт отражают изменения температуры T_c и водонасыщенности s_{wc} в зоне реакции (рис. 2) $V_{\Sigma} =$

$= \int_{t_{s,1}}^t \sum_i G_i d\tau$ — объем поданных в пласт извне компонентов, крестиком

и кружком помечены отрезки, обозначающие порции воды и воздуха; порция воздуха не изменялась по величине). Амплитуда колебаний состояния волны ВГ определяется величиной, а промежуточные состояния — соотношением порций воды и воздуха. По мере распространения очага ВГ и амплитуда, и промежуточные состояния изменяются.

Анализ результатов расчетов (характерные результаты некоторых вариантов представлены на рис. 3 в виде распределений температуры, насыщенности нефти s_1 и воды s_2 для различных моментов времени) показал, что очаг ВГ неустойчив по отношению к циклу подачи. Если порция воды недостаточно велика, тепловая волна опережает валы нагнетаемых водных порций, и ВГ протекает практически в условиях сухого режима независимо от величины водовоздушного отношения [6], среднего по циклу для подаваемого в пласт потока. Более того, волна ВГ асимптотически выходит на такой режим всегда, когда порция воды увеличивается недостаточно быстро.

Попробуем путем простых рассуждений найти условие регенерации тепловой волны после цикла подачи. Отвлечемся от влияния границ пласта (выбранный масштаб модели L позволяет сделать это). Очаг ВГ

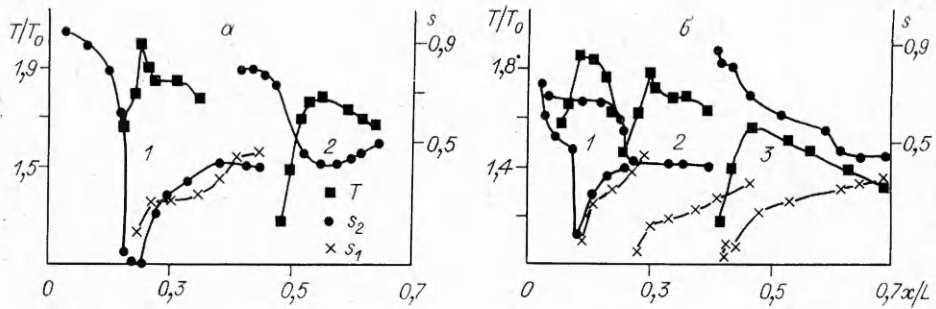


Рис. 3. Распределения температуры, насыщенностей нефти s_1 и воды s_2 при порционной подаче для различных моментов времени.

1, 3 — в пласт подается вода; 2 — подается воздух, $s_w = 0,8$ (а) и 1,0 (б).

развивается в условиях сиутной подачи, порция воздуха остается постоянной. Естественно считать, что регенерации тепловой волны отвечает регенерация состояния пласта за зоной горения, и наоборот. В качестве характеристики состояния за зоной горения рассматриваем величину средней водонасыщенности \bar{s}_w . Объем освобожденного от нефти очагом ВГ пространства $V_F = Q_a^j / A_r$, где $Q_a^j = Q_a^0 + jY^0$, Q_a^0 — количество воздуха, потраченного на иницирование очага; j — номер порции; Y^0 — порция воздуха; A_r — удельная потребность в воздухе на «выжигание» 1 м³ пласта. Количество воды в объеме V_F пропорционально \bar{s}_w^j и сразу после нагнетания j -й порции воды

$$Q_w^j = m \bar{s}_w^j Q_a^j / A_r. \quad (6)$$

Отсюда, полагая $\bar{s}_w^j = \bar{s}_w^{j-1} = \dots = \bar{s}_w$ (что означает регенерацию состояния порогового пространства за зоной горения после каждого цикла подачи), находим

$$\Delta X^0 = \Delta X_j^0 = Q_w^j - Q_w^{j-1} = m \bar{s}_w Y^0 / A_r. \quad (7)$$

Таким образом, условие регенерации требует, чтобы

$$X_{j+1}^0 = X_j^0 + \Delta X^0. \quad (8)$$

Здесь X_j^0 — объем j -й порции воды; ΔX^0 определяется условием (7). При $\Delta \bar{X}^0 > \Delta X^0$ вода постепенно гасит очаг горения (на рис. 2 показан именно этот случай, когда от цикла к циклу растет s_{wc}). При $\Delta \bar{X}^0 < \Delta X^0$ зона горения постепенно опережает валы порций воды, и процесс (постепенно) выходит на сухой режим. Следовательно, только условия (7) и (8) при порционной подаче обеспечивают устойчивое воспроизведение тепловой волны после цикла подачи.

Интересно, что при выполнении (7) и (8) состояние зоны горения в некотором смысле запаздывает на половину условного цикла по отношению к состоянию границы нагнетания. Когда через эту границу начинается подача порции воды, в зону горения только начинает поступать воздух предыдущей порции. Наоборот, с поступлением воздуха в пласт предыдущая порция воды как раз достигает зоны горения (см. рис. 3).

Циклический режим распространения очага ВГ в пласте характерен набором периодически повторяющихся состояний тепловой и фильтрационных волн. Вследствие этого говорить строго о том или ином режиме по водовоздушному отношению не всегда возможно. Тем не менее режимы ВГ, близкие к сверхвлажному [6], наблюдаются при $\bar{s}_w = 0,6 \div 0,9$. Конкретное значение \bar{s}_w в этом случае зависит от количества остаточного топлива, уровня теплоотвода и величины первой порции воды после иницирования горения в прискважинной зоне. При указанных \bar{s}_w в пласте за зоной горения наблюдаются, в частности, чередующиеся области чистой породы и содержащей недогоревшее топливо. Здесь, как правило,

вода постоянно присутствует в зоне горения (в жидком виде) и в (7) следует подставлять $s_w = \bar{s}_w(1 - s_{wc})$.

Волны ВГ в режимах, близких к сверхвлажному, обладают пониженной тепловой устойчивостью, поскольку интенсивность тепловыделения с переходом к режиму с недогоранием топлива падает. Это происходит и в силу уменьшения количества потребляемого в реакции топлива, и как результат увеличения размера самой зоны горения, перерастающей иногда в довольно обширную область. В условиях порционной подачи, удовлетворяющей (7), (8), минимальное тепловыделение происходит в период от середины времени подачи порции воздуха до середины времени подачи порции воды (см. рис. 2).

Очаг горения при порционной подаче обладает практически такой же устойчивостью по отношению к усилению теплоотвода, как и при непрерывной подаче. Естественной границей такой устойчивости является величина порции воды. Ограничения сверху связаны с существованием для каждого уровня теплотерь критического времени t_c , в течение которого в зону горения не поступает окислитель (см. рис. 1). При переходе через эту границу окислитель очередной порции воздуха будет использоваться в зоне реакции не полностью.

Основные константы, используемые в расчетах: пластовое давление $p_0 = 16,0$ МПа; пористость пласта $m = 0,2$; проницаемость $k_0 = 0,5$ дарси; начальная нефтенасыщенность $s_{10} = 0,6$; масштаб $L = 50$ м; пластовая температура $T_0 = 300$ К.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dietz D., Weijdema J. JPT, 1968, 20, 4, 411.
2. Богданов И. И. Хим. физика, 1984, 3, 5, 760.
3. Богданов И. И., Чудов Л. А. Численное исследование начальной стадии и развитых режимов внутрипластового горения.— Препринт № 227, ИПМ АН СССР, 1983.
4. Gofffried B. S. SPEJ, 1965, 5, 3, 196.
5. Баренблатт Г. И., Еитов В. М., Рыжик В. М. Движение жидкостей и газов в природных средах.— М.: Недра, 1984.
6. Важневский А. Е., Степанов В. П.— В кн.: Исследование методов повышения нефтеотдачи. Вып. 69.— М., 1979.

Поступила в редакцию 19/XI 1986,
после доработки — 28/IX 1987

О ВЛИЯНИИ ВИБРАЦИЙ НА ПРОЦЕСС ГОРЕНИЯ НЕКОТОРЫХ УГЛЕГРАФИТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. Н. Голованов
(Томск)

Малые энергетические возмущения — вибрации поверхностей, акустические колебания, аэродинамические шумы — почти всегда сопровождают процессы горения и газификации углеграфитовых материалов [1, 2].

В данной работе экспериментально исследуется горение электрографита ЭГ-0 и углепластика П5-13 в струе воздушной низкотемпературной плазмы при наличии поперечных гармонических вибраций поверхности. Струя плазмы, генерируемая электродуговым плазмотроном ЭДП-104А/50, обтекала торцевую поверхность цилиндрических образцов из углеграфитовых материалов. Параметры струи: числа Рейнольдса $Re = 630$, Маха $M = 0,02$, среднемассовая температура $T_\infty = 3700$ К [3, 4]. При проведении экспериментов яркостная температура поверхности T измерялась быстродействующим фотоэлектрическим пирометром. Скорость горения $(\rho v)_w = dm/S(t)dt$ (m, S — текущие значения массы и площади поверхности) контролировалась взвешиванием образцов и непрерывно — с помощью тензодатчиков типа 2ПКБ. Вибрации поверхности образцов в на-