

ИЗМЕРЕНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ЩЕЛИ ПРИ АБЛЯЦИИ ЕЕ СТЕНОК

Г.В. Беляков¹, А.А. Таирова^{1,2}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки ИДГ РАН

²Московский физико-технический институт

Экспериментальной моделью сланцевого пласта выбран углеводородный материал – полиметилметакрилат (оргстекло). В экспериментальной модели разрыв сланцевого пласта имитировался щелью, организованной в оргстекле. Щель продувалась потоком газа. Скорость потока измерялась опытным путем. Зафиксированы значения скоростей потока, испарение и унос массы материала с поверхности щели.

Введение

Рассматривается задача в проблеме добычи и переработки сланцевых твердых ископаемых на больших глубинах, когда добыча открытым способом является нерентабельной. Известно, что сланцевые твердые углеводороды под действием высокой температуры ($>100\text{ }^{\circ}\text{C}$) переходят в газовую и жидкую фазу [Schlumberger, 2011], которые могут быть извлечены скважинным способом. Одним из методов теплового воздействия на углеводородные сланцы могут быть или экзотермическая реакция горения самих сланцев, или горение подводимого к ним с дневной поверхности горючего газа [Martins, 2004]. В обоих случаях для горения необходима

доставка кислорода воздуха через входную скважину. Для осуществления продувки и нагрева материала сланца горячими продуктами горения возможно использовать применяемую на практике нефтедобычи технологию разрыва пласта. В результате разрыва пласта образуется трещина, соединяющая входную и выходную скважины. Выходная или добывающая скважина – это та, через которую выходят продукты горения и углеводородные агенты разложения нагреваемой массы сланца.

Для оптимизации технологического процесса разложения материала сланцевого пласта необходимо знать, как в предварительно организованной трещине пласта происходят процессы взаимодействия разогретых газовых потоков и углеводородных фаз пластового материала. Возникает важная в практическом плане задача: определить величину потока углеводородного материала, уносимого воздействующим на него спутным течением горячего газа.

Эксперимент

В предлагаемой экспериментальной работе исследуется воздействие теплового потока на газодинамические параметры течения в щели, моделирующей трещину в сланцевом углеводородном пласте (рис. 1).

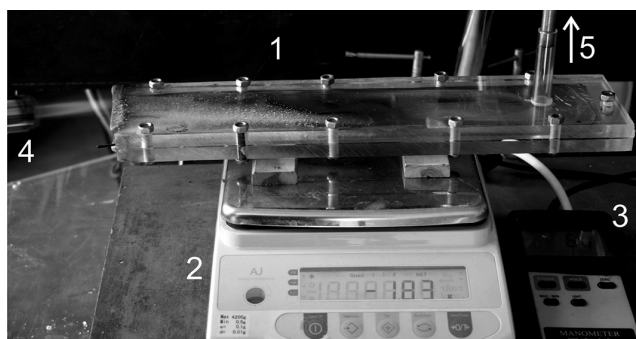


Рис. 1. Фотография экспериментальной установки: 1 – ячейка, 2 – весы, 3 – манометр, 4 – газовая горелка, 5 – турбонасос

Моделью углеводородного сланцевого пласта служило оргстекло или полиметилметакрилат толщиной 10 мм. Физические параметры оргстекла были следующие:

- плотность – 1.18 г/см^3
- температурный коэффициент расширения – $6 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
- теплоемкость – $1270 \text{ Дж/(г} \cdot \text{K)}$
- температура плавления – $160 \text{ }^\circ\text{C}$
- температура кипения – $200 \text{ }^\circ\text{C}$ (разлагается на метилметакрилат и эфиры метилакрилата)
- теплопроводность – $0.2\text{--}0.3 \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}$.

Плоская щель (1) с постоянным вдоль ее длины $l = 30 \text{ см}$ раскрытием $h = 0.15 \text{ см}$ имела начальный просвет площадью $S = 0.9 \text{ см}^2$. Перепад воздушного давления от работы турбонасоса (5) на длине щели l составлял величину

$$\Delta p = p_0 - p = 40 \cdot 10^3 \text{ г/(см} \cdot \text{с}^2)$$

и измерялся манометром (3).

Поток, создаваемый перепадом давления, входил в щель, затем подвергался тепловому воздействию газовой горелки, заполненной пропан-бутановой смесью (4), проходил вдоль щели и выходил в трубку независимо соединенную с турбонасосом. В процессе эксперимента изменение массы измерялось высокоточными прецизионными весами (2).

Результаты и обсуждение

Если принять, что скорость газа в щели для небольших перепадов давления $(p_0 - p) \ll p_0$ на длине щели подчиняется закону Дарси, то скорость газа в щели

$$v_1 = \frac{k}{\mu} \frac{\Delta p}{l} = 1,38 \cdot 10^{-4} \text{ см/с}$$

где $k = h^2/12$, $\mu = 1.8 \cdot 10^{-4}$ г/(см·с), а число Рейнольдса $R \sim 10^{-4}$. При таких больших числах Re вязкостным членом в уравнении Навье-Стокса можно пренебречь, а уравнением, описывающим течение газа, станет уравнение Эйлера для идеальной безвязкостной среды. Используя закон сохранения массы вдоль трубки тока для установившегося адиабатического течения идеального газа [Ландау, Лифшиц, 1986; Седов, 1984], получим, что

$$v_2^2 = \frac{2\gamma}{\gamma - 1} \frac{p_0}{\rho_0} \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right], \quad (1)$$

здесь p – текущее давление в трубке, где скорость течения равна v , p , и p_0 – начальные параметры на входе в щель. Из уравнения (1) при значениях давлений на входе и выходе из ячейки $p_0 = 10^6$ г/(см²) и $p = 0.96 \cdot 10^6$ г/(см²) следует значение ламинарной скорости в ячейке $v_2 = 82 \cdot 10^2$ см/с.

По схеме эксперимента (рис. 2) ячейка горизонтально размещается на весах. Результат предварительного взвешивания ячейки принимается за начало отсчета всех сил, возникающих в направлении оси Z , от действия газового потока при включении турбонасоса. Сумма поверхностных сил, действующих на ячейку в направлении оси Z , сбалансирована, кроме силы у выходного отверстия $(p - p_0) \cdot S$, где p_0 – внешнее атмосферное давление, p – давление в выходной трубке, измеряемое манометром, S – сечение трубки. У выходной трубки в направлении оси Z действует еще одна сила, сила тяги $-pv^2S$. Реакция опоры $-mg$ от действия сборки на весы фиксируется весами как масса $-m$. Таким образом, уравнение для суммы всех сил, действующих на весы

$$-mg = -(p_0 - p)S + pv^2S. \quad (2)$$

Используя уравнение адиабаты Пуассона

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{p}{p_0} \right)^{1/\gamma}$$

вычисляем скорость газового потока v_3 и его плотность $j = pv_3$, $v_3 = 65 \cdot 10^2$ см/с, $j = 7.71$ г/(см²·с). Запись регистрации показаний весов и разности давлений на выходе из ячейки показана на рис. 3.

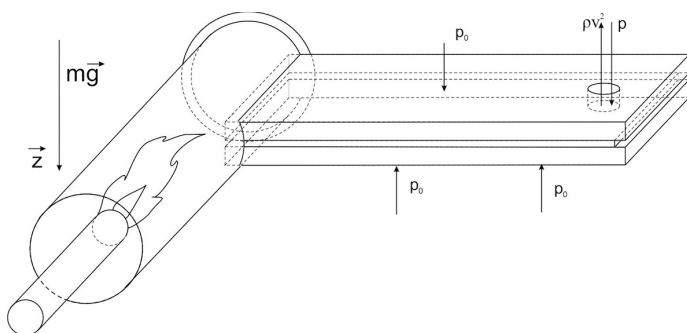


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Уменьшение скорости потока v_3 по сравнению с расчетной ламинарной скоростью v_2 обусловлено увеличенным газодинамическим сопротивлением, возникающим из-за турбулизации течения газа в щели.

После зарегистрированного воздействия на весы основного газового потока (рис. 3, т. А) включалась газовая горелка (рис. 3, т. В), в которой сгорала пропан-бутановая смесь с удельной теплотой сгорания $Q = 4 \cdot 10^{11}$ эрг/г. Расход топлива в горелке был постоянен и составлял величину $m = 5 \cdot 10^{-2}$ г/с. Воздушно-пропановая смесь образовывалась и сгорала в специальном патрубке горелки диаметром ~ 2 . Патрубок вставлялся на небольшую глубину в кварцевый стакан диаметром ~ 4 см. Боковая поверхность стакана имела вырез под торцевой размер собранной ячейки (рис. 2). Массовому расходу газа горелки соответствовала скорость выделения тепла

$$q = \frac{Q \cdot \dot{m}}{S^*} = \frac{2 \cdot 10^{10}}{S^*}$$

где S^* – площадь эффективного выделения тепла. Приращение скорости потока в ячейке при выделении тепла в камере сгорания с эффективной площадью сечения S^* можно найти, исходя из уравнений потоков массы, импульса и энергии через контрольные поверхности [Ландау, Лифшиц, 1986; Седов, 1984]:

$$\begin{cases} j = const \\ \Delta p = -j \Delta v \\ \Delta w = v_j \Delta v + \frac{\gamma}{\gamma - 1} (p \Delta v - j v_3 \Delta v) = q \end{cases} \rightarrow \Delta v = \frac{(\gamma - 1)q}{\rho(c^2 - v^2)}$$

В результате действия тепла скорость потока

$$v = -\frac{\frac{m \cdot g}{S} + (p_0 - p)}{j} \approx 94 \cdot 10^2 \text{ см/с}$$

выросла в сравнении с невозмущенной скоростью на $29 \cdot 10^2$ см/с. После прекращения подачи горючего газа (рис. 3, т. С) нагретая поверхность щели, обдуваемая хо-

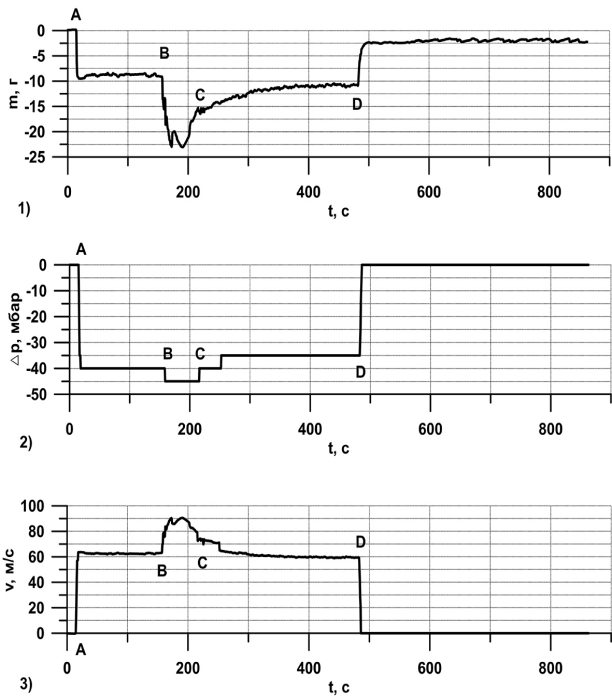


Рис. 3. Записи весов (1) и манометра (2), полученные в ходе эксперимента; скорость, вычисленная по полученным данным (3). Точкой D показан момент выключения турбонасоса

лодным воздушным потоком, постепенно остывала. Скорость потока стремилась к начальной скорости $v = 65 \cdot 10^2$ см/с. На рис. 3 точкой D показан момент выключения турбонасоса.

Выводы

В результате действия горячих газов материал поверхности щели испарялся и уносился потоком. Измеренная унесенная масса составляла величину ~ 2.3 г. В течение времени горения ($r \sim 50$ г) масса сгоревшей пропан-бутановой смеси $m = m \cdot r = 5 \cdot 10^{-2} \cdot 50 = 2.5$ г. Если принять, что материал стенок щели ячейки «соответствует» нефтяному сланцевому материалу, то эффективность «добычи» при горении его или пропан-бутановой смеси близко к 50%, то есть на каждые 100 частей сланца будет приходиться 50 частей испаренного вещества и 50 частей сгоревшего и выделившего, необходимое для возгонки, тепло.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-05-00605).

Литература

- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М. : Наука. 1986.
 Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т.2. М. : Наука. 1984.
 Coaxing oil from shale // Oilfield review winter 2010/11: 22, № 4, Schlumberger 2011, р. 7–8.
 Martins M.F. et al. Co-current combustion of oil shale part 1-2 // Fuel. Volume 89, Issue 1, р. 133-151. B. Jackson and T. Pitman, U.S. Patent № 6.345.224(8 July 2004).