

УДК 622.278

О.В. Тайлаков, Е.А. Уткаев, А.И. Смыслов, А.Н. Кормин

## ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

По мере увеличения темпов разработки угольных месторождений возникает необходимость в повышении эффективности дегазации угольных пластов [1]. При этом основной проблемой в процессе сооружения и эксплуатации дегазационных скважин является снижение их продуктивности, связанное с изменением фильтрационных характеристик углепородного массива. Наиболее существенные преобразования проницаемости, оказывающие влияние на гидродинамику пласта в результате возникновения дополнительного гидравлического сопротивления (скин-эффекта), происходят в непосредственной близости от скважины – в ее призабойной зоне.

Для определения степени нарушения проницаемости в призабойной зоне скважины принято использовать скин-фактор, который характеризует состояние этой зоны с нарушенными фильтрационными свойствами вследствие кольматации пласта промывочными растворами, разбуренными частицами породы и другими веществами во время первичного вскрытия, цементирования колонны, вторичного вскрытия перфорацией и при различных ремонтах скважины. Оценка фильтрационных свойств ее призабойной зоны в полевых и лабораторных геофизических исследованиях имеет определяющее значение для последующего выбора способа стимуляции угольного пласта. При полевых исследованиях фильтрационных свойств угольных пластов в прискважинной зоне можно получить общую информацию о состоянии призабойной и удаленной зон пласта (проницаемость, скин-фактор, емкостной коэффициент и др.). Однако процессы проникновения твердых частиц в прискважинную зону пласта и образование областей с измененной проницаемостью при фильтрации промывочной жидкости остаются малоизученными. Поэтому актуальным является использование физического моделирования на основе эквивалентных материалов для уточнения фильтрационных свойств призабойной зоны скважины.

Термин скин-эффекта введен в 1953 году Ван Эвердингом и Хер-стом, позже Хоукинс расширил его понятием отрицательного скин-фактора [2-4]. Скин-эффект заключается в возникновении дополнительного фильтрационного сопротивления, вызванного изменением проницаемости породы в призабойной и удаленной зонах скважины, и определяется как

Таким образом, в массиве горных пород, вмещающем трещину с сомкнутыми берегами в виде математической щели, ещё до ведения горных

работ помимо исходного гравитационного поля напряжений существуют и дополнительные касательные напряжения, возникающие в результате взаимного

$$S = \left( \frac{k}{k_s} - 1 \right) \ln \frac{r_s}{r_c}, \quad (1)$$

где  $r_s$  – радиус призабойной зоны скважины с измененной проницаемостью;  $r_c$  – радиус ствола скважины в продуктивном интервале;  $k, k_s$  – коэффициент проницаемости удаленной и призабойной зоны.

При положительных значениях скин-фактора проницаемость призабойной зоны скважины в результате ее кольматации хуже в сравнении с удаленной зоной, а при отрицательных значениях – выше, вследствие, например, стимуляции гидроразрывом. Скин-фактор изменяется в пределах  $-12 \div \infty$  в зависимости от степени нарушения призабойной зоны скважины [5-7].

Наиболее полная информация о состоянии призабойной зоны может быть получена на основе применения полевых методов, которые включают в себя геофизические, гидродинамические, отбор и исследование кернов, глубинное фотографирование и другие. Расширяющееся применение среди таких методов имеют гидродинамические исследования, основанные на наблюдениях за снижением или подъемом уровня жидкости до статического после ее долива или отбора из скважины и кратковременных установившихся отборах или нагнетаниях флюида в поглощающий пласт при его герметизации [8-10]. Для оценки радиуса скин-эффекта необходимо учитывать воздействие отдельных горно-геологических (водопроницаемость, пористость, суммарная мощность пласта) и технологических (вязкость рабочей жидкости, скорость и объем закачки жидкости) факторов на изменения фильтрационных характеристик призабойной зоны скважины, что весьма сложно обеспечить в натурных условиях. В связи с этим поставлена задача разработки физической модели, основанной на использовании эквивалентного материала, для изучения фильтрационных процессов в прискважинной зоне угольного пласта в лабораторных условиях. Для исследования процессов изменения фильтрационных свойств в призабойной зоне скважины разработана и изготовлена оригинальная лабораторная установка, применение которой заключается в нагнетании жидкости в образец, размещенный в механизме для его за-

крепления, и ожидании спада давления после прекращения подачи флюида. Расход подаваемой жидкости, время ее нагнетания и время ожидания падения давления рассчитываются предварительно в зависимости от характеристик образца. По окончании ожидания спада давления образец извлекается из установки для дальнейших исследований. Изменение давления при проведении теста регистрируется с использованием электронного автономного манометра. Для подачи жидкости под давлением применяется масляный пресс с обратным клапаном, технические параметры которого определены в калибровочных измерениях по нагнетанию жидкости с заданными параметрами. Установлено, что расход флюида 0,91 мл/с достаточен для лабораторных исследований

Для выбора эквивалентного материала определен режим фильтрации жидкости в натуральных условиях с использованием критерия Рейнольдса [11]

$$Re = \frac{W\sqrt{k\rho}}{m^{1,5}\mu}, \quad (2)$$

где  $W$  – скорость фильтрации;  $k$  – коэффициент проницаемости пласта;  $\rho$  – плотность жидкости;  $m$  – коэффициент пористости;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости жидкости.

Критические значения числа  $Re$  лежат в интервале  $0,022 \leq Re_{кр} \leq 0,29$ . В соответствии с принятыми условиями  $Re = 0,0028 < Re_{кр} = 0,022$ . Поэтому для оценки скин-эффекта в призабойной зоне скважины с радиусом  $r_s$  применен закон Дюпюи, который может быть представлен в виде

$$r_s = r_c \cdot \exp\left(\frac{\Delta p_s 2\pi h k_s}{Q\mu}\right), \quad (3)$$

где  $r_c$  – радиус скважины;  $Q$  – расход жидкости при нагнетании;  $k_s$  – коэффициент проницаемости пласта в зоне влияния скин-эффекта;  $h$  – мощность пласта;  $\Delta p_s$  – спад давления в течение рабочего периода.

Моделирование проводилось на образцах из эквивалентного материала (обожженной глины и газонаполненных пластмасс), выбор типа и параметров которых основывался на условиях гидродинамического подобия при физическом моделировании будет с соблюдением равенства чисел Рейнольдса для модели  $Re_m$  и натуре  $Re_n$

$$Re_n = Re_m. \quad (4)$$

Или после подстановки формулы (2) в (4)

$$\frac{W_n \sqrt{k_n \rho_n}}{m_n^{1,5} \mu_n} = \frac{W_m \sqrt{k_m \rho_m}}{m_m^{1,5} \mu_m} = Re. \quad (5)$$

С использованием выбранных материалов и геометрических параметров проведены лабораторные эксперименты для оценки фильтрационных свойств искусственных материалов, модели-

рующих угольные пласты. При этом коэффициент проницаемости угольного массива, известный по результатам измерений в натуральных условиях на Талдинском месторождении Кузбасса, составил 3,6 мДа, а полученный в лабораторных условиях для образцах из обожженной глины и газонаполненных пластмасс – 28,8 и 3,8 мДа.

Лабораторные исследования изменений фильтрационных свойств в призабойной зоне скважины на образцах из эквивалентных материалов включали тестирование чистого образца, кольматацию призабойной зоны скважины, тестирования образца с измененной проницаемостью, оценку нарушения методом прямых измерений и на основе вычислений с учетом полученных экспериментальных данных. Затем проводилось тестирование исходного, незагрязненного образца. Для этого он закреплялся в лабораторную установку, подключался электронный манометр и нагнетатель, заполненный подкрашенной водой, после чего флюид нагнетался в образец с расходом  $q_{inj}$ , рассчитанным по формуле

$$q_{inj} = \frac{k_w h P_{max}^{Surf}}{70,65 \mu B_w \ln(2,25 t_D e^{2s})}, \quad (6)$$

где  $k_w$  – коэффициент водопроницаемости;  $h$  – суммарная мощность пласта;  $P_{max}^{Surf}$  – максимальное давление, подаваемое на устье скважины;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости воды;  $B_w$  – фактор сжимаемости;  $t_D$  – безразмерное время нагнетания.

Время нагнетание флюида определялось по формуле

$$t_{inj} = 5,2 t_{Dws}, \quad (7)$$

где  $t_{Dws} = \frac{17 \cdot 10^4 C e^{0,14S}}{\left(\frac{kh}{\mu}\right)}$  – безразмерное время

конечного периода ожидания падения давления в скважине;  $C$  – коэффициент накопления;  $S$  – скин-фактор;  $k$  – коэффициент проницаемости.

После прекращения подачи жидкости модельная скважина герметизировалась для регистрации падения давления в течение расчетного времени  $t_{exp}$ , которое определялось по формуле

$$t_{exp} = 2 t_{inj}. \quad (8)$$

По окончании периода ожидания падения давления манометр отключался от установки и проводился анализ зарегистрированного изменения давления (рис. 1). На основании обработки результатов измерений оценивались фильтрационные свойства образца с ненарушенной проницаемостью.

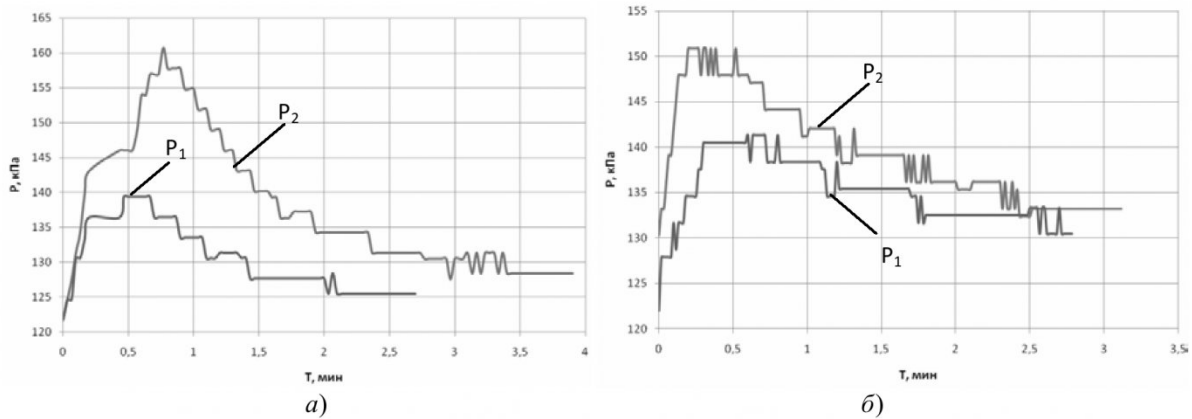


Рис. 1 – Изменения давления флюида  $P$  во времени  $T$  в образцах с естественной ( $P_1$ ) и искусственно измененной проницаемостью ( $P_2$ ):

а) – образец № 1; б) – образец № 2

При кольматации призабойной зоны модельной скважины в образец из эквивалентных материалов при помощи нагнетателя закачивался глинистый раствор, после чего проводилось тестирование образца с измененной проницаемостью. Для этого удалялись излишки глины, осевшей в забое модельной скважины, и образовавшейся на ее стенках глинистой массы, чтобы исключить их влияние. Затем присоединялись электронный манометр и нагнетатель для повторного тестирования, в результате которого регистрировалось изменение давления во времени.

Для оценки радиуса влияния скин-эффекта методом прямых измерений по окончании исследований образец извлекался из установки и проводилась его декомпозиция. Измерения геометрических размеров зоны проникновения флюида и дисперсной фазы кольматанта в призабойную зону скважины образца проводились с применением оптических систем.

На основе полученных данных рассчитывался радиус зоны с измененной проницаемостью в призабойной зоне скважины с использованием формулы (3). Выполненный анализ полученных экспериментальных данных показал, что радиус зоны

с измененными значениями проницаемости в эквивалентных материалах более точно описывается выражением

$$r_s = r_c \cdot \exp\left(\frac{(p_c - p_s)}{i} \cdot \frac{2\pi h k_s}{Q\mu}\right). \quad (9)$$

Здесь  $p_c, p_s$  – забойное давление и давление на границе влияния скин-эффекта,  $i$  – безразмерный коэффициент, который определяется с учетом скорости изменения давления в начальный момент времени после прекращения подачи жидкости при проведении гидродинамических исследований. Расхождение между результатами измерений и вычислений, выполненных по формуле (9), радиуса скин-эффекта на образце из эквивалентного материала составило 4%.

Полученные результаты будут использованы в дальнейшем для оценки фильтрационных свойств и определения геометрических размеров призабойной зоны углепородного массива при проведении инъекционных тестов с целью повышения эффективности мероприятий по стимулированию газоотдачи скважин, применяемых для заблаговременной дегазации угольных пластов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полевщиков, Г.Я. Повышение эффективности комплексного управления газовыделением на выемочном участке шахты / Г.Я. Полевщиков, Е.Н. Козырева, М.В. Шинкевич // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. Научно-технический журнал.- Кемерово, 2012. – № 2. – С.20-27.
2. Hurst W. Establishment of the skin effect and its impediment to fluid flow into a well bore. «The petroleum Engineer». Vol. XXV. №11. Okt. 1953. P. B6 – B16.
3. Van Everdingen A. F. The Skin Effect and its Influence on the Productive Capacity of a Well. // Petroleum Transactions AIME. 1953. Vol. 198. P. 171–176.
4. Coalbed Methane Reservoir Engineering: Published by Gas Research Institute, Chicago, Illinois, U.S.A., 1996 - 520 pp.
5. Михайлов Н.Н. Изменение физических свойств горных пород в околоскважинных зонах. – М.: Недра, 1987. – 152 с.

6. *Шагиев Р.Г.* Исследование скважин по КВД. – М.: Наука, 1998. – 304 с.
7. *Гольф-Рахт Т.Д.* Основы нефтепромысловой геологии и разработки трещиноватых коллекторов. – М.: Недра, 1986. – 608 с.
8. *Овнатанов Г.Т.* Вскрытие и обработка пласта. – М.: Недра, 1964. – 266 с.
9. *Баренблатт Г.И.* Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа / Г.И. Баренблатт, В.М. Ентов, В.М. Рыжик. – М.: Недра, 1972. – 288 с.
10. *Булатов А.И.* Освоение скважин: Справочное пособие / А.И. Булатов, Ю.Д. Качмар, П.П. Макаренко, Р.С. Яремчук. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 1999. – 472 с.
11. *Басниев К.С.* Нефтегазовая гидромеханика / К.С. Басниев, Н.М. Дмитриев, Г.Д. Розенберг. – М.: 2003. – 479 с.

## Авторы статьи

Тайлаков  
Олег Владимирович  
докт. техн. наук, профессор,  
зав. совместной лабораторией ресур-  
сов и технологий извлечения уголь-  
ного метана Института угля СО РАН  
и КузГТУ  
E-mail: [tailakov@uglemetan.ru](mailto:tailakov@uglemetan.ru)

Уткаев  
Евгений Александрович  
канд. техн. наук, научный сотрудник  
совместной лаборатории ресурсов и  
технологий извлечения угольного  
метана Института угля СО РАН и  
КузГТУ  
E-mail: [utkaev@uglemetan.ru](mailto:utkaev@uglemetan.ru)

Смыслов  
Алексей Игоревич  
младший научный сотрудник  
совместной лаборатории ресурсов и  
технологий извлечения угольного  
метана Института угля СО РАН и  
КузГТУ  
E-mail: [smyslov@uglemetan.ru](mailto:smyslov@uglemetan.ru)

Кормин  
Алексей Николаевич  
младший научный сотрудник  
совместной лаборатории ресурсов и  
технологий извлечения угольного  
метана Института угля СО РАН и  
КузГТУ  
E-mail: [kormin@uglemetan.ru](mailto:kormin@uglemetan.ru)