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 Эвердингеном 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 натурных условиях с использованием критерия Рейнольдса [11]

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

где W – скорость фильтрации; k – коэффициент проницаемости пласта; ρ – плотность жидкости; m – коэффициент пористости; μ – коэффициент динамической вязкости жидкости.

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

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

где r_c – радиус скважины; Q – расход жидкости при нагнетании; k_s – коэффициент проницаемости пласта в зоне влияния скин-эффекта; h – мощность пласта; Δp_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 $\mathrm{Re}_м$ и натуры $\mathrm{Re}_н$

$$\mathrm{Re}_н = \mathrm{Re}_м. \qquad (4)$$

Или после подстановки формулы (2) в (4)

$$\frac{W_н\sqrt{k_н}\rho_н}{m_н^{1,5}\mu_н} = \frac{W_м\sqrt{k_м}\rho_м}{m_м^{1,5}\mu_м} = \mathrm{Re}. \qquad (5)$$

С использованием выбранных материалов и геометрических параметров проведены лабораторные эксперименты для оценки фильтрационных свойств искусственных материалов, моделирующих угольные пласты. При этом коэффициент проницаемости угольного массива, известный по результатам измерений в натурных 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

$$q_{inj} = \frac{k_W h \mathrm{P}_{\max}^{\mathrm{Surf}}}{70{,}65\,\mu\, B_{\mathrm{W}}\, \ln(2{,}25 t_D e^{2s})}, \qquad (6)$$

где k_W – коэффициент водопроницаемости; h – суммарная мощность пласта; $\mathrm{P}_{\max}^{\mathrm{Surf}}$ – максимальное давление, подаваемое на устье скважины; μ – коэффициент динамической вязкости воды; B_W – фактор сжимаемости; t_D – безразмерное время нагнетания.

Время нагнетание флюида определялось по формуле

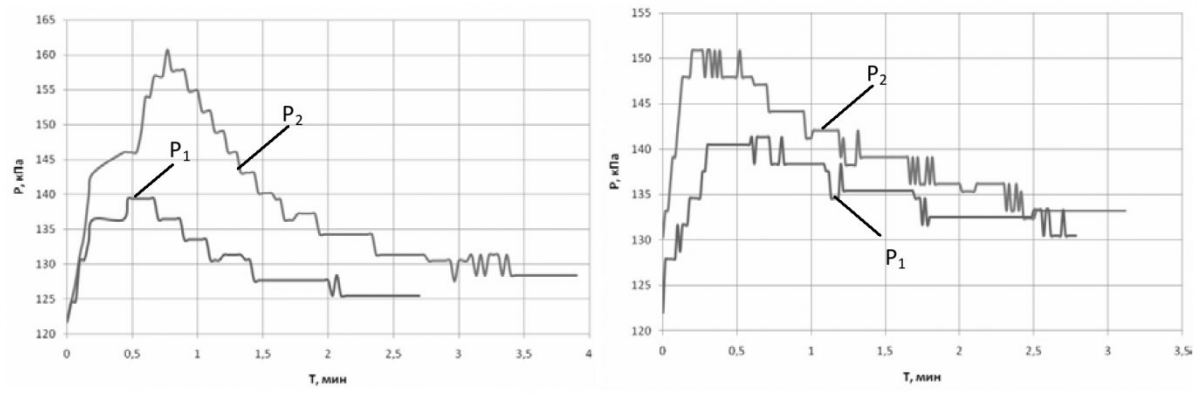
$$t_{inj} = 5{,}2\ t_{Dws}, \qquad (7)$$

где $t_{Dws} = \dfrac{17 \cdot 10^4 Ce^{0,14S}}{\left(\dfrac{kh}{\mu}\right)}$ – 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

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

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.



а) *б*)

Рис. 1 – Изменения давления флюида P *во времени* T *в образцах с естественной (*P1*) и искусственно измененной проницаемостью (*P2*):*

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 прискважинной зоны углепородного массива при проведении инжекционных 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.* Esteblishment 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 ресурсов и технологий извлечения угольного метана Института угля СО РАН и КузГТУ
E-mail: 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

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

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