УДК 622

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОЙ ВЯЗКОСТИ СДВИГА ПСЕВДОПЛАСТИЧНОГО МАТЕРИАЛА В ТРЕЩИНЕ

THEORETICAL MODEL FOR CALCULATION OF THE EFFECTIVE SHEAR VISCOSITY OF A PSEUDO-PLASTIC MATERIAL IN A FRACTURE

С. В. Овчинникова, Г. Х. Али
S. V. Ovchinnikova, G. H. Ali

Тюменский индустриальный университет, г.Тюмень

Ключевые слова: ***нефтяное месторождение; градиент давления; трещина; вязкость***
Key words: ***mature oil fields; pressure gradient; fractures; apparent constant consistency; viscosity***

Известно, что гели относятся к псевдопластичным материалам, которые описываются степенным соотношением между скоростью сдвига и напряжением сдвига. Общий вид степенной модели следующий:

$$\tau = k\gamma^n \,, \tag{1}$$

где K — постоянная консистенции (Па·с^n), n — показатель текучести, γ — скорость сдвига (с$^{-1}$), τ — напряжение сдвига (Па). Параметры n и K определяют степень неньютоновского поведения. Материал считается неньютоновским, если n не равно 1. Кроме того, степень неньютоновского поведения увеличивается по мере того, как индекс n отклоняется от единицы.

Для стационарного течения баланс импульса для оболочки конечной толщины был применен впервые. Было получено дифференциальное уравнение, описывающее динамику потока. Для неньютоновской жидкости дифференциальное уравнение для распределения скоростей может быть получено в следующем виде:

$$\tau = k\left(\frac{\partial v}{\partial r}\right)^n. \tag{2}$$

Если предположить, что нет никаких утечек жидкости вдоль и по высоте трещины, то для среды, текущей между двумя параллельными пластинами, справедливо уравнение

$$\tau = \left(\frac{P_O - P_L}{L}\right) X, \tag{3}$$

где L — длина трещины, x — расстояние от центра трещины до ее стенки, P_O и P_L – соответственно давление в начале и конце трещины.

Из уравнений 2 и 3 получаем

$$k\left(\frac{\partial v}{\partial r}\right)^n = \left(\frac{P_O - P_L}{L}\right) X\ . \tag{4}$$

При интегрировании дифференциального уравнения получаем распределение скорости вдоль ширины трещины

$$v = \left(\frac{P_O - P_L}{KL}\right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} \left(\frac{W}{2}\right)^{\frac{n+1}{n}} \left[\left(\frac{2X}{W}\right)^{\frac{n+1}{n}} - 1\right], \tag{5}$$

где v — скорость, W — ширина трещины.

Объемный расход q:

$$q = \left(\frac{P_O - P_L}{KL}\right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{2} \left(\frac{n}{2n+1}\right) W^{\frac{2n+1}{n}}\ . \tag{6}$$

Градиент давления $\frac{dp}{dl}$ по ширине трещины:

$$\frac{dp}{dl} = (2K)\left(\frac{2n+1}{n}\right)^n \left(\frac{2q}{h}\right)^n \frac{1}{W^{2n+1}}\ . \tag{7}$$

Поскольку постоянная кажущейся консистенции K_{a1} и показатель кажущейся текучести n_{a1} из экранной модели связаны с постоянной консистенции K и индексом текучести n в степенной модели в уравнении 1, уравнение 7 может быть изменено следующим образом:

$$\frac{dp}{dl} = ak_a^b \left(\frac{2n_a+1}{n_a}\right)^{cn_a} \left(\frac{2q}{h}\right)^{dn_a} \left(\frac{1}{W^{2n_a+1}}\right)^e\ . \tag{8}$$

Уравнение регрессии 9 использует данные тестов с экраном 130 меш:

$$\frac{dp}{dl} = 37220k_a^{-0{,}0845} \left(\frac{2n_a+1}{n_a}\right)^{11{,}406n_a} \left(\frac{2q}{h}\right)^{2{,}142n_a} \left(\frac{1}{W^{2n_a+1}}\right)^{0{,}247}\ . \tag{9}$$

Уравнение регрессии 10 использует данные тестов с экраном 60 меш:

$$\frac{dp}{dl} = 31254k_a^{-0{,}0842} \left(\frac{2n_a+1}{n_a}\right)^{12{,}475n_a} \left(\frac{2q}{h}\right)^{1{,}636n_a} \left(\frac{1}{W^{2n_a+1}}\right)^{0{,}223}\ . \tag{10}$$

Уравнение регрессии 11 использует данные тестов с экраном 30 меш:

$$\frac{dp}{dl} = 24423k_a^{-0{,}185} \left(\frac{2n_a+1}{n_a}\right)^{12{,}105n_a} \left(\frac{2q}{h}\right)^{1{,}534n_a} \left(\frac{1}{W^{2n_a+1}}\right)^{0{,}276}\ . \tag{11}$$

Коэффициент сопротивления часто используется для оценки величины сопротивления потоку геля / геланта при фильтрации через пористые среды. Он определяется как

$$Fr = \left(\frac{k}{\mu}\right)_{\text{рассол}} \Big/ \left(\frac{k}{\mu}\right)_{\text{геле}}, \tag{12}$$

где $\left(\frac{k}{\mu}\right)_{\text{рассол}}$ — подвижность рассола, Мд /сп; $\left(\frac{k}{\mu}\right)_{\text{геле}}$ — подвижность геля, Мд/сп.

Проницаемость модели трещины остается неизменной до размещения и в процессе размещения геланта, поэтому коэффициент сопротивления может быть вычислен как отношение эффективной вязкости геля к вязкости рассола. Поскольку вязкость рассола при комнатной температуре составляет около 1 сп, можно принять, что эффективная вязкость геля при комнатной температуре численно равна коэффициенту сопротивления.

Коэффициент сопротивления также может быть выражен как отношение перепада давления при закачке PPG к перепаду давления при закачке воды при одинаковом их расходе. Следующее уравнение используется для расчета перепада давления при закачке воды в трещину:

$$\frac{\Delta Pw}{L} = \frac{12\mu_w q}{hw^3}, \tag{13}$$

где ΔPw — перепад давления воды, μ — вязкость воды, L — длина трещины, q — расход при закачке, h — высота трещины и w — ширина трещины.

Таким образом, эффективную вязкость набухшего PPG при его прокачке через открытую трещину можно получить с помощью коррелированных с экранной моделью уравнений для давления, поделенных на уравнение падения давления для воды.

Для 130 сетки в испытании с экраном, эффективная вязкость PPG равна

$$\mu_{PPG} = 3369{,}5K_a^{-0{,}0743}\left(\frac{2n_a+1}{n_a}\right)^{11{,}206n_a}\left(\frac{2q}{h}\right)^{1{,}433n_a}\left(\frac{1}{w^{2n+1}}\right)^{0{,}247}\left(\frac{hw^3}{q}\right). \tag{14}$$

Для 60 сетки в испытании с экраном эффективная вязкость PPG равна

$$\mu_{PPG} = 2779{,}5K_a^{-0{,}0842}\left(\frac{2n_a+1}{n_a}\right)^{14{,}475n_a}\left(\frac{2q}{h}\right)^{1{,}626n_a}\left(\frac{1}{w^{2n+1}}\right)^{0{,}244}\left(\frac{hw^3}{q}\right). \tag{15}$$

Для 30 сетки в испытании с экраном эффективная вязкость PPG равна

$$\mu_{PPG} = 2140{,}9K_a^{-0{,}175}\left(\frac{2n_a+1}{n_a}\right)^{12{,}105n_a}\left(\frac{2q}{h}\right)^{1{,}564n_a}\left(\frac{1}{w^{2n+1}}\right)^{0{,}226}\left(\frac{hw^3}{q}\right). \tag{16}$$

Проверочные тесты проводились для обеспечения применимости этих моделей для необходимой глубины прогноза. Данные по раствору PPG, приготовленного в 1%-ном рассоле и закачанного с расходом 5 мл/мин, не были использованы для вычисления корреляции, но были использованы для проверки модели (3). Разработанная модель была использована для определения эффективной вязкости PPG в модели трещины с использованием данных экранной модели 130 меш. Соответствующая эффективная вязкость рассчитывалась для трех различных значений ширины трещины, а именно 0,5, 1,0 и 1,5 мм (0,02, 0,04, 0,06 дюймов). В таблице 1 приведены значения экспериментальной эффективной вязкости и значения, рассчитанные с помощью (14). Средняя относительная погрешность оказалась равна 3,37 %. Это указывает на то, что полученные уравнения регрессии могут быть использованы для определения эффективной вязкости PPG, протекающего через модель трещины, с небольшой относительной погрешностью.

Таблица 1

Результаты расчетов по разработанной модели (уравнение 14) для PPG при концентрации рассола 1 % и темпе закачки 5 мл / мин

Перелом / Ширина (10^{-3} м)	Эффективная вязкость (сп)		Относительная ошибка (%) $\left[\left(\mu_{eff.exp} - \mu_{eff.cal}\right)/\mu_{eff.exp}\right]$
	Рассчитанная	Измеряемая	
0,5	$2{,}621\times0^7$	$2{,}422\times10^7$	–8,21
1,0	$1{,}542\times10^8$	$1{,}630\times10^8$	5,39
1,5	$4{,}797\times10^8$	$4{,}797\times10^8$	0

Такая же процедура повторяется для (15) и (16). Таблицы 2 и 3 показывают, что две другие модели также могут быть использованы для определения вязкости PPG. Это означает, что группы контрольных измерений на экранной модели (например, с сетками 130, 60, или 30) могут быть применены для оценки свойств частиц геля (вязкость, эффективное давление закачки) в трещине.

Таблица 2

Результаты расчетов по разработанной модели (уравнение 15) для PPG при концентрации рассола 10 % и темпе закачки 15 мл / мин

Перелом / Ширина (10^{-3} м)	Эффективная вязкость (сп)		Относительная ошибка (%) $\left[\left(\mu_{eff.exp}-\mu_{eff.cal}\right)/\mu_{eff.exp}\right]$
	Рассчитанная	Измеряемая	
0,5	$6{,}174\times0^{6}$	$5{,}912\times10^{6}$	–4,43
1,0	$3{,}908\times10^{7}$	$3{,}932\times10^{7}$	0,61
1,5	$1{,}132\times10^{8}$	$1{,}135\times10^{8}$	0,002

Таблица 3

Результаты расчетов по разработанной модели (уравнение 16) для PPG при концентрации рассола 10 % и темпе закачки 25 мл / мин

Перелом / Ширина (10^{-3} м)	Эффективная вязкость (сп)		Относительная ошибка (%) $\left[\left(\mu_{eff.exp}-\mu_{eff.cal}\right)/\mu_{eff.exp}\right]$
	Рассчитанная	Измеряемая	
0,5	$4{,}027\times0^{6}$	$3{,}996\times10^{6}$	–0,77
1,0	$2{,}600\times10^{7}$	$2{,}566\times10^{7}$	–1,01
1,5	$7{,}552\times10^{7}$	$7{,}265\times10^{7}$	–3,95

Таким образом, три модели были разработаны для определения эффективной вязкости закачки набухшего PPG в открытую трещину.

Результаты, полученные на экранной модели с сеткой одного размера, могут быть использованы для прогнозирования эффективной вязкости набухшего PPG при закачке его в открытую трещину.

Список литературы

1. Al-Assi, A.A., Willhite, G.P., Green, D.W., and McCool, C.S. 2009. Formation and Propagation of Gel Aggregates Using Partially Hydrolyzed Polyacrylamide and Aluminum Citrate. *SPEJ* 14 (3): 450-461. SPE-100049-PA.doi: 10.2118/100049-PA.
2. Du, Y. and Gong, J. P. in Surface Friction and Lubrication of Polymer Gels, ed. G. Biresaw and K. L. Mittal, CRC Press, Boca Raton, Florida, May 2008, ch. 11, pp.223-246.
3. Ganguly, S., Willhite, G.P., Green, D.W., and McCool, C.S. 2001. The Effect of Fluid Leakoff on Gel Placement and Gel Stability in Fractures. Paper SPE 64987 presented at SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, Houston, Texas, 13-16 February 2001.
4. Larkin, R. and Creel P. Methodologies and Solutions to Remediate Inter-well Communication Problems on the SACROC CO2 EOR Project-A Case Study.paper SPE 113305 presented at 2008 SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium held in Tulsa, OK, 19-23 April 2008.
5. Ramazani-Harandi M.J.; Zohuriaan-Mehr M.J.; Ershad-Langroudi A.; Yousefi A.A.; K. Kabiri.Rheological Determination of the Swollen Gel Strength of the Superabsorbent Polymer Hydrogels.*Polym.Test.* 2006, 25, 470 474.
6. Wang, D., Seright, R.S., Shao, Z., and Wang, J. 2007. Key Aspects of Project for Polymer Flooding. Paper SPE 109682 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Anaheim, California, 11-14 November.
7. Wu, Y., Bao, B. 2008. Modeling Particle Gel Propagation in Porous Media. Paper SPE 115678 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, 21-24 September.

Сведения об авторах

Овчинникова Светлана Валерьевна, *к. с. н., доцент кафедры «Бизнес-информатика и математика», Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 8(3452)283047, e-mail: ovchinnikovasv@tsogu.ru*

Гассан Хуссейн Али, *аспирант кафедры «Моделирование и управление процессами нефтегазодобычи», Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: mehemet80@yahoo.com*

Information about the authors

Ovchinnikova S. V.*, Candidate of Science in Sociology, associate professor of the chair «Business-informatics and mathematics», Industrial University of Tyumen, phone: 8(3452)283047, e-mail: ovchinnikovasv@tsogu.ru*

Ali G. H.*, postgraduate student of the Department «Modelling and management of processes of oil and gasrecovery», Industrial University of Tyumen, e-mail: mehemet80@yahoo.com*