

НОВАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЯЗКОСТИ ГРАНУЛИРОВАННОГО ГЕЛЯ PPG В ТЕХНОГЕННОЙ ТРЕЩИНЕ

¹Али Г.Х., ¹Сохошко С.К., ¹Саранча А.В.

¹ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», Тюмень, Россия (625000, Тюмень, ул. Володарского, 38), e-mail: sarantcha@mail.ru

Целью представленной работы является разработка метода для определения эффективной вязкости гранулированного геля PPG (гель с приготовлением на поверхности) для блокирования техногенных трещин (трещин в результате авто ГРП). Данные гели относятся к химическим технологиям и используются на поздних стадиях разработки нефтяных месторождений. На лабораторной модели трещины были получены значения констант (кажущейся постоянной консистенции и кажущегося показателя псевдопластичности) для уравнения вязкопластичной жидкости. Эти же константы использованы в полученном уравнении для градиента давления вдоль техногенной трещины. Вязкость геля рассчитывалась из уравнения движения геля вдоль трещины. Представленные в статье уравнения позволяют рассчитывать вязкость геля для каждого размера фракций гранулированного геля в зависимости от ширины трещины и скорости закачки геля.

Ключевые слова: гранулированный гель, блокировка техногенных трещин.

NEW MODEL TO DETERMINE THE EFFECTIVE VISCOSITY OF PPG IN THE FRACTURE

¹Ali G.H., ¹Sohoshko S.K., ¹Sarancha A.V.

¹Federal Budget Educational Institution of Higher Education "Tyumen State Oil and Gas University", Tyumen, Russia (625000 Russia, Tyumen, street Volodarskogo, 38), e-mail: sarantcha@mail.ru

The ultimate goal of this paper is to develop a method which be used in mature oil fields to determine the effective viscosity of PPG in a fracture, with limited errors. This model modified by correlating screen test results with fracture experiment results so that the apparent consistency constant and the apparent flow index obtained from screen tests were introduced to replace the consistency constant and flow index from general power law equation. These correlations correlated effective viscosity with flow rate, fracture width, apparent consistency constant and apparent flow index together. The newly developed correlations were validated and the results show that a single group of screen test measurements can be applied to determine the effective viscosity of PPG in a fracture, with limited errors.

Keywords: granular gel, the lock of fracture.

Известно, что гели относятся к псевдопластичным материалам, которые описываются степенным соотношением между скоростью сдвига и напряжением сдвига [1-7]. Общий вид степенной модели следующий:

$$\tau = K\gamma^n \quad (1)$$

где K - постоянная консистенции ($\text{Па} \cdot \text{с}^n$), 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:

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

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

$$\tau = \left(\frac{P_0 - P_L}{L} \right) X, \quad (3)$$

где L - длина трещины, x - расстояние от центра трещины до ее стенки, P_0 и P_L - соответственно давление в начале и конце трещины.

Из уравнений 2 и 3 получаем,

$$k \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^n = \left(\frac{P_0 - P_L}{L} \right) X . \quad (4)$$

Интегрируя дифференциальное уравнение, получаем распределение скорости вдоль ширины трещины:

$$v = \left(\frac{P_0 - P_L}{KL} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} \left(\frac{W}{2} \right)^{\frac{n+1}{n}} \left[\left(\frac{2X}{W} \right)^{\frac{n+1}{n}} - 1 \right], \quad (5)$$

где v - скорость, W - ширина трещины.

Объемный расход q :

$$q = \left(\frac{P_0 - P_L}{KL} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{2} \left(\frac{W}{2n+1} \right) W^{\frac{2n+1}{n}} . \quad (6)$$

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

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

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:

$$\frac{dp}{dl} = a k_a^b \left(\frac{2n_a+1}{n_a} \right)^{c n_a} \left(\frac{2q}{h} \right)^{d n_a} \left(\frac{1}{W^{2n_a+1}} \right)^e . \quad (8)$$

Уравнение регрессии 9 использует данные тестов с экраном 150 меш:

$$\frac{dp}{dl} = 39210 k_a^{-0.0845} \left(\frac{2n_a+1}{n_a} \right)^{12.306 n_a} \left(\frac{2q}{h} \right)^{1.442 n_a} \left(\frac{1}{W^{2n_a+1}} \right)^{0.257} . \quad (9)$$

Уравнение регрессии 10 использует данные тестов с экраном 80 меш:

$$\frac{dp}{dl} = 32154 k_a^{-0.0942} \left(\frac{2n_a+1}{n_a} \right)^{13.475 n_a} \left(\frac{2q}{h} \right)^{1.526 n_a} \left(\frac{1}{W^{2n_a+1}} \right)^{0.253} . \quad (10)$$

Уравнение регрессии 11 использует данные тестов с экраном 40 меш:

$$\frac{dp}{dl} = 26303k_a^{-0.195} \left(\frac{2n_a+1}{n_a}\right)^{14.105n_a} \left(\frac{2q}{h}\right)^{1.464n_a} \left(\frac{1}{w^{2n_a+1}}\right)^{0.246} . \quad (11)$$

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

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

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 геланта и в процессе размещения, 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:

$$\frac{\Delta P_w}{L} = \frac{12\mu_w q}{hw^3}$$

(13)

где ΔP_w - 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 уравнениями. Для 150-сетки в испытании с экраном, эффективная вязкость PPG:

$$\mu_{PPG} = 3267.5K_a^{-0.0845} \left(\frac{2n_a+1}{n_a}\right)^{12.306n_a} \left(\frac{2q}{h}\right)^{1.442n_a} \left(\frac{1}{w^{2n_a+1}}\right)^{0.257} \left(\frac{hw^3}{q}\right) . \quad (14)$$

Для 80-сетки в испытании с экраном, эффективная вязкость PPG есть:

$$\mu_{PPG} = 2679.5K_a^{-0.0942} \left(\frac{2n_a+1}{n_a}\right)^{13.475n_a} \left(\frac{2q}{h}\right)^{1.526n_a} \left(\frac{1}{w^{2n_a+1}}\right)^{0.253} \left(\frac{hw^3}{q}\right) . \quad (15)$$

Для 40-сетки в испытании с экраном, эффективная вязкость PPG есть:

$$\mu_{PPG} = 2191.9K_a^{-0.195} \left(\frac{2n_a+1}{n_a}\right)^{14.105n_a} \left(\frac{2q}{h}\right)^{1.464n_a} \left(\frac{1}{w^{2n_a+1}}\right)^{0.246} \left(\frac{hw^3}{q}\right) . \quad (16)$$

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 уравнения 3. Разработанная модель была использована для определения эффективной вязкости PPG в модели трещины с использованием данных экранной модели 150 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 уравнения 14. Средняя относительная погрешность оказалась равной 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. Такая же процедура повторяется для уравнений 15 и 16.

Таблица 1

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

Ширина трещины (10^{-3} м)	Эффективная вязкость (сп)		Погрешность (%) $[(\mu_{eff.exp} - \mu_{eff.cal})/\mu_{eff.exp}]$
	Рассчитанный	Измеряется	
0.5	2.711×10^7	2.512×10^7	-7.89
1.0	1.672×10^8	1.710×10^8	2.23
1.5	4.847×10^8	4.847×10^8	0

Таблицы 2 и 3 показывают, что две другие модели также могут быть использованы для определения вязкости PPG. Это означает, что группа контрольных измерений на экранной модели (например, с сетками 150, 80, или 40) 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

Ширина трещины (10^{-3} м)	Эффективная вязкость (сп)		Погрешность (%) $[(\mu_{eff.exp} - \mu_{eff.cal})/\mu_{eff.exp}]$
	Рассчитанный	Измеряется	
0.5	6.274×10^6	5.711×10^6	-9.86
1.0	3.888×10^7	3.922×10^7	0.87
1.5	1.131×10^8	1.132×10^8	0.21

Таблица 3

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

Ширина трещины (10 ⁻³ м)	Эффективная вязкость (сп)		Погрешность (%) [[$\mu_{eff.exp} - \mu_{eff.cal}$]/ $\mu_{eff.exp}$]
	Рассчитанный	Измеряется	
0.5	4.147×10 ⁶	3.985×10 ⁶	-4.08
1.0	2.609×10 ⁷	2.577×10 ⁷	-1.26
1.5	7.652×10 ⁷	7.165×10 ⁷	-6.79

Таким образом, были разработаны три модели определения эффективной вязкости закачки набухшего геля PPG в открытую трещину. Полученные результаты на экранной модели с сеткой одного размера могут быть использованы для прогнозирования эффективной вязкости набухшего геля 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., Kabiri K. 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. Key Aspects of Project for Polymer Flooding. Paper SPE 109682 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Anaheim, California, 11-14 November 2011.
7. Wu Y., Bao B. Modeling Particle Gel Propagation in Porous Media. Paper SPE 115678 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, 21-24 September 2008.

Рецензенты:

Грачев С.И., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений», Институт геологии и нефтегазодобычи, ФГБОУ ТюмГНГУ, г. Тюмень;

Стрекалов А.В., д.т.н., профессор кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений», Институт геологии и нефтегазодобычи, ФГБОУ ТюмГНГУ, г. Тюмень.