

УДК 622.276.5:549.08
DOI 10.17513/use.38192

ПАРАМЕТРЫ НЕЛИНЕЙНЫХ СВЯЗЕЙ ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА ЧЕРЕЗ КОМПЛЕКС ФРАКЦИЙ ПРОППАНТА

Песков А.В.

*ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», Самара,
e-mail: rednakel@yandex.ru*

В настоящей статье исследовалась фильтрация газа через насыпные образцы, заполненные композициями фракций проппанта «Боровичи» или кварцевым песком. Исследования проводились на отечественной установке «Дарсиметр» в диапазонах перепада давлений от 0,3 до 1,6 атм. Исследовались смеси фракций расклинивающего материала с различными выборочной средней и среднеквадратичным отклонением размера зерен. Размер зерен проппанта варьировал от 180 до 560 мкм, а для кварцевого песка – от 40 до 180 мкм. Для каждой смеси установлен степенной закон зависимости расхода от перепада давления. Предпосылкой для искомой степенной зависимости служила экспериментальная связь, найденная при фильтрации флюида через образцы песка. С уменьшением выборочной средней размера зерен показатель степени n в зависимости $Q = kc\Delta p^n$ расхода газа от перепада давления возрастает, а с увеличением среднеквадратичного отклонения показатель степени увеличивается. При снижении значений выборочного среднего от 465 до 125 мкм показатель степени n возрастает от 0,43 до 0,72. С увеличением значения среднего квадратичного отклонения показатель степени n возрастает от 0,48 до 0,61 при одинаковом значении выборочного среднего. Значение коэффициента пропорциональности k_c при снижении размера частиц в смесях с размером частиц от 465 до 125 мкм изменяется в пределах от $7 \cdot 10^{-7}$ до 10^{-8} . Определены корреляционные зависимости между диаметром зерен смесей проппанта и показателем степени n перепада давления. С использованием оптического микроскопа Альтами изучались сферичность и округлость зерен во фракциях проппанта. Установлены коэффициенты сферичности и округлости по диаграмме Крумбьена – Шпосса. Для 80 % зерен сферичность варьировала от 0,5 до 0,9. Рассчитывался эквивалентный диаметр зерен, который оказался приблизительно в 1,2 раза больше, чем тот, что следовал исходя из размера примененных сит. Исходя из исследования для получения повышенных значений коэффициента пропорциональности k_c , следует выбирать проппант с меньшим среднеквадратичным отклонением, с большим размером зерен, хорошей отсортированностью зерен. Следует анализировать зерна по коэффициентам окатанности и сферичности.

Ключевые слова: коэффициент пропорциональности, нелинейные зависимости, зерно, проппант, фракции, коэффициенты сферичности и округлости

PARAMETERS OF NONLINEAR CONNECTIONS DURING GAS FILTRATION THROUGH A COMPLEX OF PROPPANT FRACTIONS

Peskov A.V.

Samara State Technical University, Samara, e-mail: rednakel@yandex.ru

In this article, gas filtration through bulk samples filled with compositions of Borovichi proppant fractions or quartz sand was investigated. The research was carried out on the domestic installation “Darsimeter” in the pressure drop ranges from 0.3 to 1.6 atm, from 0.6 to 1.6 atm, from 0.3 to 1.3 atm. Mixtures of fractions of wedging material with different sample mean and mean square deviation of grain size were studied. The grain size of the proppant varied from 180 to 560 microns, and for quartz sand from 40 to 180 microns. For each mixture, a power law of dependence of the flow rate on the pressure drop is established. The prerequisite for the desired power dependence was the experimental relationship found during fluid filtration through sand samples. With a decrease in the sample average grain size, the exponent n increases depending on $Q = kc\Delta p^n$ of the gas flow from the pressure drop, and with an increase in the standard deviation, the exponent increases. With a decrease in the values of the sample mean from 465 to 125 microns, the exponent of n increases from 0.43 to 0.72. With an increase in the value of the mean square deviation, the exponent of n increases from 0.48 to 0.61 with the same value of the sample mean. The value of the proportionality coefficient k_c with a decrease in particle size in mixtures with a particle size from 465 microns to 125 microns varies from $7 \cdot 10^{-7}$ to 10^{-8} . The correlations between the grain diameter of the proppant mixtures and the exponent of the degree n of the pressure drop are determined. Using an optical microscope, Altami studied the sphericity and roundness of grains in proppant fractions. The coefficients of sphericity and roundness according to the Krumbien-Spotts diagram are established. For 80% of the grains, the sphericity varied from 0.5 to 0.9. The equivalent grain diameter was calculated, which turned out to be approximately 1.2 times larger than the one that followed based on the size of the sieves used. Based on the study, to obtain increased values of the proportionality coefficient k_c , a proppant with a smaller mean square deviation, with a large grain size, good sorting should be chosen. grains and a smaller mean square deviation. It is necessary to analyze the grains by the coefficients of roundness and sphericity.

Keywords: proportionality coefficient, nonlinear dependencies, grain, proppant, fractions, coefficients of sphericity and roundness

Для повышения нефтеотдачи пластов используют гидроразрыв пласта с образованием трещины, заполненной проппантом – расклинивающим материалом, и от качества последнего зависят коэффициенты проницаемости и продуктивности. Согласно [1, 2] выбор проппанта не всегда учитывался как метод повышения эффективности

и рентабельности процесса ГПП, однако при детальном изучении этих процессов очевидно, что свойства проппанта в значительной степени влияют на продуктивность скважин. Отечественными учеными изучались анализ влияния фракций на эффективность гидроразрыва пласта [3].

Цель исследования – определить вид степенной зависимости между расходом газа и перепадом давления на композициях фракций проппанта с использованием установки «Дарсиметр». Исследования проводились при различных параметрах нелинейных связей: выборочных средних размера частиц фракций и среднеквадратичных отклонениях. Установить возможную связь между размером частиц проппанта и параметрами зависимостей расхода газа от перепада давления. С применением микроскопического метода определить характеристики зерен: сферичность и округлость для изучаемых образцов.

Материалы и методы исследования

Частицы проппанта, просеянные через сита определенного размера, не являются идеальным материалом ни по размеру, ни по форме, ни по окатанности. Это или оваловидные зерна в виде эллипсоидов вращения, имеющие разный размер по длинной оси эллипса, или дипирамиды, или полигональные фигуры. Изучение частиц проппанта в настоящей статье проводилось на микроскопе Альтами. Изучались зерна разных фракций. В качестве примера приведено фото одной из фракций диаметром 300–350 мкм (рисунок). Рассчитывался эквивалентный диаметр зерен.

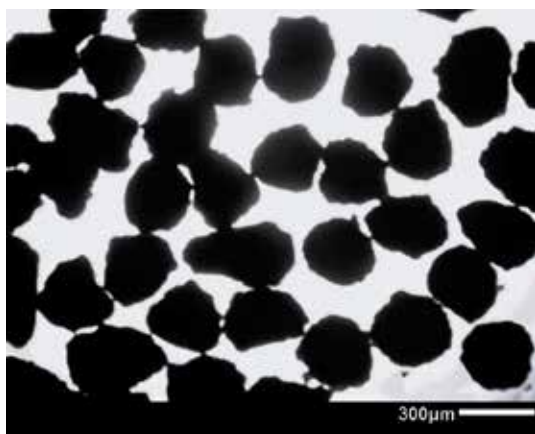


Фото зерен проппанта

Эквивалентный диаметр зерен оказался приблизительно в 1,2 раза больше, чем

тот, что следовал исходя из размера примененных сит. Около 20% зерен имело сферичность по диаграмме Крумбьена – Шпосса выше 0,9, а для остальных зерен сферичность варьировала от 0,5 до 0,9. Округлость зерна трудно оценивать по выступам, углам, так как таких элементов несколько по периметру зерна. Округлость варьировала от значения 0,3 до 0,9.

В статье изучалась фильтрация через насыпные модели, содержащие проппант при различных комбинациях в содержании выделенных фракций в интервале изменения размера зерен от 560 до 180 мкм для проппанта «Боровичи» и от 180 мкм до 40 мкм для кварцевого песка. Исследования проводились на установке «Дарсиметр» и регистрировались расход газа и перепад давления для различных смесей проппантов в диапазоне градиента давления на образец от 0,1 до 1,6 атм. Определялись степенные связи $Q = k_c \Delta p^n$, где n может принимать значение в пределах от 1 до 0,5 по данным [4]. Для расчета коэффициента проницаемости возможно использовать выражение $k = (d^2)/(96\sigma)$ [4].

Из образца естественного проппанта были выделены фракции ≥ 560 мкм, 500–560 мкм, 350–500 мкм, 300–350 мкм, 250–300 мкм, 212–250 мкм, 180–212 мкм, ≤ 180 мкм, из которых были составлены искусственные смеси.

Смесь 1 представлена естественным проппантом, и максимум распределения приходится на фракцию 300–350 мкм при содержании 48%. Зерна фракции естественного проппанта распределены по нормальному закону. Смесь 3 состоит из двух компонентов с размером зерен 350–560 и 500–560 мкм. Смесь 4 состоит из трех компонентов с диаметром зерен 300–350 мкм, 350–560 мкм и 500–560 мкм.

Смесь 2 состоит из одной фракции с диаметром зерен 350–500 мкм. Смесь 5 состоит из двух компонентов с диаметром зерен 500–560 мкм и 53 мкм в равном соотношении и приготовлена, для проверки гипотезы об изменении проницаемости, если пустоты одного компонента заполнены частицами второго.

Смесь 6 состоит из одного компонента с диаметром зерен 300–350 мкм. Смесь 7 состоит из четырех фракций одинакового содержания. Смеси 8 и 9 приготовлены таким образом, что максимум распределения смещается из интервала 350–560 мкм в интервалы 300–350 мкм (смесь 8) и 200–250 мкм (смесь 9). В смеси 10 присутствуют

четыре компонента, и содержание фракции для максимального и минимального размера частиц больше, чем в центре распределения, в 2 раза. В смесях 20, 21 максимум распределения приходится на значение диаметра 125 мкм. В смеси 22 вершина распределения приходится на две фракции 125 и 80 мкм. Смеси 11–19 представлены одной фракцией.

**Результаты исследования
и их обсуждение**

Рассмотрим полученные результаты. Зависимость $Q = F(\Delta p)$ расхода газа от перепада давления для естественной смеси I проппанта при среднем выборочном диаметра зерен 455 мкм для интервала 350–560 мкм имеет вид $Q = 7 \cdot 10^{-7} p^{0,43}$ для условий съемки образца при $\Delta p = 0,3–1,6$ атм (таблица).

Параметры нелинейных связей композиций проппанта

№ смеси	Перепад давления ΔP , атм	Зависимость расхода газа от перепада давления	Среднее выборочное x_p , мкм	Среднеквадратичное отклонение
1	0,3–1,6	$7 \cdot 10^{-7} x^{0,43}$	465	90
	1,6–0,6	$10^{-6} x^{0,395}$		
	1,3–0,3	$6 \cdot 10^{-7} x^{0,447}$		
2	1,6–0,3	$8 \cdot 10^{-7} x^{0,37}$	455	
3	0,3–1,6	$7 \cdot 10^{-7} x^{0,37}$	431	80
4	0,3–1,6	$5 \cdot 10^{-7} x^{0,4}$	476	33
5	0,3–1,6	$2 \cdot 10^{-8} x^{0,62}$	291	238
6	0,3–1,6	$2 \cdot 10^{-7} x^{0,49}$	325	
7	0,3–1,6	$2 \cdot 10^{-7} x^{0,51}$	320	130
	1,6–0,6	$4 \cdot 10^{-7} x^{0,47}$		
	1,3–0,3	$2 \cdot 10^{-7} x^{0,52}$		
	1–0,3	$2 \cdot 10^{-7} x^{0,53}$		
8	0,3–1,6	$4 \cdot 10^{-7} x^{0,48}$	335	53
	1,6–0,6	$3 \cdot 10^{-7} x^{0,498}$		
	1,3–0,3	$4 \cdot 10^{-7} x^{0,49}$		
	1–0,3	$4 \cdot 10^{-7} x^{0,48}$		
9	0,3–1,6	$2 \cdot 10^{-7} x^{0,51}$	276	100
	1,6–0,6	$3 \cdot 10^{-7} x^{0,474}$		
	1,3–0,3	$2 \cdot 10^{-7} x^{0,53}$		
10	0,3–1,6	$4 \cdot 10^{-8} x^{0,61}$	334	145
	1,6–0,6	$6 \cdot 10^{-8} x^{0,59}$		
	1,3–0,3	$4 \cdot 10^{-8} x^{0,61}$		
11	1	$4 \cdot 10^{-7} x^{0,42}$	252	–
12	1	$2 \cdot 10^{-6} x^{0,307}$	≥ 500	–
13	1	$10^{-7} x^{0,51}$	≥ 212	–
14	1	$2 \cdot 10^{-8} x^{0,695}$	150	–
15	1	$10^{-8} x^{0,72}$	125	–
16	1	$4 \cdot 10^{-9} x^{0,813}$	106	–
17	1	$3 \cdot 10^{-9} x^{0,825}$	80	–
18	1	$6 \cdot 10^{-10} x^{0,905}$	63	–
19	1	$3 \cdot 10^{-10} x^{0,92}$	40	–
20	0,3–1,6	$10^{-8} x^{0,68}$	113	
	1,6–0,6	$3 \cdot 10^{-8} x^{0,61}$		
	1,3–0,3	$10^{-8} x^{0,7}$		
21	0,3–1,6	$8 \cdot 10^{-9} x^{0,71}$	114	
	1,6–0,6	$8 \cdot 10^{-9} x^{0,714}$		
	1,3–0,3	$3 \cdot 10^{-9} x^{0,79}$		
22	0,3–1,6	$10^{-8} x^{0,7}$	103	
	1,6–0,6	$2 \cdot 10^{-8} x^{0,66}$		
	1,3–0,3	$9 \cdot 10^{-9} x^{0,72}$		

Исследования проводились для трех интервалов перепада давления Δp , так как ранее установлены некоторые различия связей $Q = f(\Delta p)$ в зависимости от интервала [7, 8]. При диапазоне съемки $\Delta p = 0,3-1,3$ атм показатель степени n возрастает $Q = 6 \cdot 10^{-7} p^{0,447}$. Для большинства образцов изменение диапазона съемки $\Delta p = 0,3-1,3$ атм на $0,3-1,6$ атм не приводит к изменению степени n или приводит к увеличению степени n на $0,01-0,02$.

Для двух- и трехкомпонентных смесей 3 и 4 при близком относительно смеси 1 среднем выборочном диаметре зерен 431 мкм и 476 мкм, среднеквадратичное отклонение σ для смесей 3 и 4 составило соответственно 80 и 33, показатели степени n имеют меньшие значения – соответственно $Q = 7 \cdot 10^{-7} p^{0,37}$ и $Q = 5 \cdot 10^{-7} p^{0,4}$. Для однокомпонентной смеси с диаметром зерен 455 мкм полученная зависимость близка к двухкомпонентным $Q = 8 \cdot 10^{-7} p^{0,37}$, что, вероятно, указывает, что при снижении числа фракций или снижении дисперсии зависимость изменяется с уменьшением показателя степени. Для двухкомпонентной смеси с диаметром зерен 530 и 53 мкм в зависимости показатель степени n резко увеличивается из-за того, что пустоты в первичной матрице с диаметром 530 мкм закрыты в них частицами 53 мкм, так как известно, что пустоты между частицами одного размера составляют 0,1 их диаметра [4]. Для смеси 7 выборочная средняя размера зерен меньше, чем для смеси 1, а $\sigma = 130$, и выше, чем для смеси 1, а зависимость приобретает вид $2 \cdot 10^{-7} p^{0,51}$. Показатель степени n для этой смеси возрастает относительно смеси 1. Для смеси 8 выборочная средняя размера зерен $x_b = 335$ мкм и ниже, чем для смеси 1. Среднеквадратичное отклонение для этой смеси $\sigma = 53$ ниже, чем для смеси 1. При этом зависимость имеет вид $4 \cdot 10^{-7} p^{0,48}$ при показателе степени больше, чем для смеси 1. Для смеси 9 максимальный диаметр частиц составляет 235 мкм, и фракция с этим диаметром имеет значительную долю в составе смеси – 44%. Размер частиц этой фракции ниже, чем для смеси 1, средняя выборочная размера зерен $x_b = 276$, что меньше, чем в смеси 1. Среднеквадратичное отклонение несколько выше $\sigma = 100$, чем для смеси 1. Зависимость расхода газа от давления приобретает вид $2 \cdot 10^{-7} x^{0,51}$, а при этом показатель степени n больше, чем для смеси 1. Для смеси 10 значения содержаний фракций на крыльях в 2 раза выше, чем в центре, и средняя выборочная $x_b = 335$, такая же, как

для смеси 8. Однако среднеквадратичное отклонение $\sigma = 145$ выше, чем для смеси 8 и 1, и при этом зависимость имеет вид $4 \cdot 10^{-8} p^{0,61}$. Показатель степени выше, чем во всех смесях, по всей видимости из-за большего среднеквадратичного отклонения. Смесь 20 представлена кварцевым песком Чапаевского месторождения с преобладающей фракцией размером частиц 125 мкм до 83%. А зависимость расхода газа от давления имеет вид $10^{-8} x^{0,72}$, показатель степени с уменьшением диаметра зерен возрастает. Для смесей 21 и 22 также с преобладающей фракцией 125 мкм зависимости $Q = F(\Delta p)$ расхода газа от перепада давления незначительно отличаются от зависимости смеси 20. Для ряда смесей изменение интервала измерения с $0,3-1,6$ атм на $0,6-1,6$ атм приводит к небольшому снижению показателя степени в зависимости, а измерения в интервале $0,3-1,3$ показывают невысокие возрастания показателя степени. Для фракций с одним интервалом зерен 11–19 со снижением размера частиц от 500 до 40 мкм показатель степени n в устанавливаемой зависимости повышается от 0,31 до 0,92. Коэффициент пропорциональности k_c при изменении размера частиц в монофракциях от 560 до 40 мкм изменяется от $2 \cdot 10^{-6}$ до $3 \cdot 10^{-10}$, а для смесей с размером частиц от 465 до 125 мкм – от $7 \cdot 10^{-7}$ до 10^{-8} . Зависимость между $k_c = f(d)^n$ для фракций с изменением d от 40 до 600 мкм выражается $k_c = 9 \cdot 10^{-16} d^{3,36}$ при $R^2 = 0,998$. Зависимость $k_c = f(d)^n$ для четырех смесей с основной фракцией, содержащей до 40% вещества (смеси 1, 9, 10, 20), имеет вид $4 \cdot 10^{-14} d^{2,52} R^2 = 0,88$. Зависимость между показателем степени n и диаметром зерен в зависимости $Q = p^n$, имеет вид $n = 4,25 d^{-0,38}$ для смесей 1, 3, 8, 9, 20, при величине достоверности аппроксимации $R^2 = 0,92$. Зависимость между эквивалентным диаметром фракций и показателем степени n в зависимости для этих же смесей имеет вид $n = 4,56 d^{-0,38}$. Таким образом с уменьшением диаметра основной по содержанию фракции показатель степени n в зависимости $Q = p^n$ будет возрастать.

Заключение

На образцах проппанта и кварцевого песка выбранных фракций при различных выборочном среднем и среднеквадратичном отклонении размера зерен определены зависимости расхода газа от перепада давления. При снижении значений выборочного среднего от 465 до 125 мкм в сме-

сях показатель степени n в зависимости $Q = k_c \Delta p^n$ расхода газа от перепада давления возрастает от 0,43 до 0,72. С увеличением значения среднеквадратичного отклонения показатель степени n в зависимости $Q = k_c \Delta p^n$ расхода газа от перепада давления возрастает от 0,48 до 0,61 при одинаковом значении выборочного среднего. Значение коэффициента пропорциональности k_c при снижении размера для смесей с размером частиц от 465 до 125 мкм изменяется в пределах от $7 \cdot 10^{-7}$ до 10^{-8} . Определены корреляционные зависимости между диаметром зерен и показателем степени n в зависимости расхода газа от перепада давления. Микроскопическим методом установлено, что эквивалентный диаметр частиц больше в 1,2 раза размера частиц, получаемых при просеивании через сита определенного размера. Определены сферичность и округлость частиц для изученных образцов. Исходя из исследования для получения повышенных значений коэффициента пропорциональности k_c следует выбирать проппант с большим размером зерен, хорошей отсортированностью зерен и меньшим среднеквадратичным отклонением. Следу-

ет анализировать зерна по коэффициентам окатанности и сферичности.

Список литературы

1. Гилаев Г.Г., Ольховская В.А., Гилаев Ген.Г., Хафизов В.М. Гидроразрыв пласта в вертикальных и горизонтальных скважинах. Ижевск, 2020. 304 с.
2. Панькович И.В., Усенко А.А., Савастыин М.Ю. Перспектива применения проппанта малых фракций как метода оптимизации процесса многостадийного гидравлического пласта // Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». 2022. № 5. С. 1499–1508.
3. Сидоров И.В., Сабитов Р.Р., Митрофанов А.Д. Анализ влияния фракций проппанта на эффективность гидравлического разрыва пласта на Самотлорском месторождении // Территория Нефтегаз. 2010. № 5. С. 56–60.
4. Щелкачев В.Н., Лапук Б.Б. Подземная гидравлика. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. 736 с.
5. Троицкий В.М. О физическом механизме нелинейного закона фильтрации газа в пористых средах // Вести газовой науки. 2021. № 2 (47). С. 126–137.
6. Толпаев В.А., Ахмедов К.С., Гоголева С.А. Нелинейные законы фильтрации при больших скоростях потока // Нефть и газ. 2015. № 5. С. 83–89.
7. Песков А.В. Проницаемость расклинивающего материала // Успехи современного естествознания. 2022. № 3. С. 86–91.
8. Песков А.В. Нелинейные зависимости при фильтрации газа через образцы расклинивающего материала // Успехи современного естествознания. 2022. № 11. С. 118–123.