

УДК 55:549.08:622.276.5

**НЕЛИНЕЙНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА
ЧЕРЕЗ ОБРАЗЦЫ РАСКЛИНИВАЮЩЕГО МАТЕРИАЛА****Песков А.В.***ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», Самара,
e-mail: rednakel@yandex.ru*

Исследовалась фильтрация газа через образцы с расклинивающим материалом, представленным пропантом и кварцевым песком диаметром от 40 до 500 мкм. Установлено, что зависимость получаемых расходов флюида через образец от перепада давлений не является линейной и не выражается, может быть выражена линейным законом Дарси для большинства образцов. Измерения расходов флюида проводились в искусственных образцах, моделирующих трещины гидроразрыва в породах нефтяного пласта. Измерены расходы при различных перепадах давления от 0,1 до 1,74 атм на установке по определению газопроницаемости «Дарсиметр». Исследовались узкие фракции песка и пропанта, которые получены на установке грохот. Использовались два типа искусственных образцов: цилиндрический образец для заполнения насыпным материалом и в виде щели для размещения материала в виде одного слоя заданного размера. В результате исследований устанавливалась степенная связь между расходом флюида и перепадом давления на образце, а также между произведением скорости фильтрации на вязкость флюида и градиентом давления. Основой для искомым связи служила зависимость, полученная для грубозернистого песка при фильтрации воды. В настоящих исследованиях по фильтрации газа установлены степенные зависимости с показателем степени, изменяющимся от 0,93 до 0,3 для образцов с размером зерен расклинивающего материала от 40 до 500 мкм. Выявлено, что с увеличением градиента давления при фильтрации через зерна определенного размера показатель степени снижается. Результаты исследований через цилиндрические образцы и искусственные щели показали сопоставимые и близкие зависимости. Между перепадом давления и расходом для каждой фракции установлены нелинейные степенные зависимости. При перенабивках расклинивающего материала в образце определены погрешности измерения расхода газа: среднеквадратичное отклонение и коэффициент вариации. Рассчитаны числа Рейнольдса для ряда материалов, определяющих отклонение закона фильтрации от линейного закона. Для щели 150 мкм со значительной проницаемостью не получены однозначные зависимости при разных градиентах давления.

Ключевые слова: коэффициент проницаемости, нелинейные зависимости, расклинивающие материалы, пропант, число Рейнольдса, фракции

**NONLINEAR DEPENDENCES DURING GAS FILTRATION
THROUGH SAMPLES OF WEDGING MATERIAL****Peskov A.V.***Samara State Technical University, Samara, e-mail: rednakel@yandex.ru*

Gas filtration through samples with a wedging material, represented by propane and quartz sand with a diameter of 40, was investigated. up to 500 microns. It is established that the dependence of the fluid flow rates obtained through the sample on the pressure drop is not linear and cannot be expressed by Darcy's linear law for most samples. Fluid flow measurements were carried out in artificial samples modeling hydraulic fracturing cracks in oil reservoir rocks. The flow rates were measured at various pressure drops from 0.1 to 1.74 atm at the installation for determining gas permeability "Darsimeter". Narrow fractions of sand and proppant were studied, which were obtained at the screen installation. 2 types of artificial samples were used: a cylindrical sample for filling with bulk material and in the form of a slot for placing the material in the form of a single layer of a given size. As a result of the studies, a power-law relationship was established between the flow rate of the fluid and the pressure drop on the sample, as well as between the product of the filtration rate by the viscosity of the fluid and the pressure gradient. The basis for the desired relationship was the dependence obtained for coarse-grained sand during water filtration. In the present gas filtration studies, power dependences have been established with a degree index varying from 0.93 to 0.3 for samples with a grain size of the wedging material from 40 up to 500 microns. It was revealed that with an increase in the pressure gradient during filtration through grains of a certain size, the degree indicator decreases. The results of studies through cylindrical samples and artificial slits showed comparable and similar dependencies. Nonlinear power dependences are established between the pressure drop and the flow rate for each fraction. During readjustments of the wedging material in the sample, the errors of measuring the gas flow were determined: the standard deviation and the coefficient of variation. The Reynolds numbers are calculated for a number of materials determining the deviation of the filtration law from the linear law. For a gap of 150 microns with significant permeability, no unambiguous dependences were obtained for different pressure gradients.

Keywords: permeability coefficient, nonlinear dependencies, wedging materials, proppant, Reynolds number, fractions

Гидравлический разрыв пласта в настоящее время является одним из самых эффективных методов повышения нефтеотдачи, и при использовании этой операции

рассматривают качество расклинивающего материала для заполнения трещины гидроразрыва, такие как диаметр и способ укладки частиц, их отсортированность, про-

ницаемость трещины с расклинивающим материалом. Перед применением данного метода для прогноза желательно иметь значительное количество нефтепромысловых данных и сопутствующих исследований, чтобы снизить риски недостаточной эффективности проведения метода [1; 2].

Цель исследования – по результатам исследований параметров фильтрации газа на установке «Дарсиметр» через искусственные образцы с расклинивающим материалом, моделирующие трещину гидроразрыва пласта, установить вид нелинейной степенной зависимости между градиентом давления и расходом газа; исследования провести на цилиндрических искусственных образцах, вмещающих пропант или песок с заданным размером зерен, и в искусственных образцах в виде щелей с расклинивающим материалом; рассчитать по образцам искусственных трещин проницаемость.

Материалы и методы исследования

В настоящей статье изучались параметры фильтрации: расход газа, градиент давления и проницаемость на насыпных моделях с расклинивающим материалом: пропантом, кварцевым песком размером зерен от 40 до 500 мкм.

Установка по определению газопроницаемости образцов пород

Исследования провести на установке «Дарсиметр» (рисунок). Определялся вид степенной зависимости между расходом газа и градиентом давления в интервале от 0,1 до 1,6 атм. Изучение нелинейной фильтрации можно проводить по уравнению Форхгеймера или с помощью степенных зависимостей, используя искусственные нейронные сети и множественные регрессионные модели [3–6].



Дарсиметр

Известно, что нелинейный закон фильтрации газа может быть выражен как скорость фильтрации v в зависимости от градиента давления dp / dL [7]:

$$v = k_c \left(\frac{dp}{dL} \right)^n,$$

где n принимает значение в пределах $1 \geq n \geq 0,5$.

Численные значения n и k_c в каждом случае определяются из опытов. В настоящем исследовании уточнялось изменение показателей n и k_c в зависимости от изменения градиента давления. В опытах с грубозернистым песком при фильтрации жидкости была выведена зависимость

$$v = 173 \left(\frac{d}{90} i \right)^n [7],$$

где d – диаметр зерен, а i – гидравлический уклон или градиент давления dp / dL , отличающийся от i на постоянный множитель удельный вес жидкости.

Выявлено, что с увеличением диаметра зерен величина показателя степени уменьшается. В наших исследованиях, при фильтрации газа, предполагалось проверить, справедливо ли будет изменение показателя степени, при изменении диаметра зерен расклинивающего материала. Для расчета проницаемости использовались выражения

$$k = \frac{d^2}{96\sigma}, [7] \quad (1)$$

$$k = b^2 m_T, [2] \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{5(1-m)^2}{4m^3},$$

где b – раскрытость щели,
 m_T – трещинная пористость,
 m – пористость.

Проницаемость в искусственных образцах, наполненных зернами пропанта, зависит от величины угла Θ при различном расположении зерен. Крайние конфигурации соответствуют теснейшему расположению зерен при $\Theta = 60^\circ$ и свободному при $\Theta = 90^\circ$.

Для исследований применялся цилиндрический искусственный образец из оргстекла с внутренним отверстием, заполняемым исследуемым материалом и уплотняемым с торцов. А также использовался искусственный образец щели.

Таблица 1

Степенная зависимость расхода газа от перепада давления
 $Q = F(\Delta p)$, $Q \cdot \mu/s = F(p/l)$, k , Re для зерен разного размера пропанта и песка

Номер	Описание	$Q = F(\Delta p)$	$q\mu/s = f(p/l)$	k	Re
1	Естественный пропант	$2 \cdot x^{-0,697}$	—	—	—
2	Пропант более 500 мкм	$10^{-7} x^{0,53}$			
3	Песок 63 мкм + естественный	$10^{-8} x^{0,66}$			
4	Пропант более 300 мкм	$3 \cdot 10^{-7} x^{0,46}$			
5	Щель 180 мкм с пропантом	$3 \cdot 10^{-8} x^{0,64}$			
6	Щель 180 мкм + щель 75 мкм	$2 \cdot 10^{-7} x^{0,606}$			
7	Щель 100 мкм с пропантом	$3 \cdot 10^{-9} x^{0,77}$			
8	Щель 75 мкм открытая	$10^{-8} x^{0,8}$			
9	Щель 150 мкм открытая	$4 \cdot 10^{-8} x^{0,62}$			
10	150 мкм	$2 \cdot 10^{-8} x^{0,695}$			
11	180 мкм	$2 \cdot 10^{-8} x^{0,65}$			
12	125 мкм	$10^{-8} x^{0,72}$	$5 \cdot 10^{-10} x^{0,72}$	$7,3-13 \cdot 10^{-12}$	7-25
13	106 мкм	$4 \cdot 10^{-9} x^{0,813}$	$10 \cdot 10^{-10} x^{0,813}$	$6-9 \cdot 10^{-12}$	5-20
14	80 мкм	$3 \cdot 10^{-9} x^{0,825}$	$7 \cdot 10^{-11} x^{0,82}$	$3,8-6,5 \cdot 10^{-12}$	4-12
15	63 мкм	$6 \cdot 10^{-10} x^{0,905}$	$10^{-11} x^{0,905}$	$2,8-3,1 \cdot 10^{-12}$	3-8
16	40 мкм	$3 \cdot 10^{-10} x^{0,92}$	$6 \cdot 10^{-12} x^{0,92}$	$1,8-2,1 \cdot 10^{-12}$	0,1-5

Исследуемый образец представлял собой полосу с размещенным на клее веществом пропанта заданной фракции в один слой. Полоска укреплялась в щели вплотную по ее раскрытости, равной диаметру зерен исследуемого материала и толщине подложки. Также исследовался образец пленки с пропантом и с некоторым дополнительным раскрытием. Это был образец пленки с пропантом диаметром 180 мкм и дополнительной раскрытостью 75 мкм. Расклинивающий материал представлял собой пропант марки Боровичи, который был рассеян на фракции от 212 до 300 мкм, более 300 мкм и более 500 мкм. Также использовались смесь 50% естественного образца пропанта и 50% фракции менее 63 мкм, а также кварцевый песок фракций 40, 63, 80, 125, 150, 180 мкм.

Результаты исследования и их обсуждение

Для определения погрешностей исследования проведены измерения расхода газа при давлении 1 атм для 15 перенабивок образца. Математическое ожидание расхода составило $q = 5,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$, среднее квадратичное отклонение $1,21 \cdot 10^{-5}$, коэффициент вариации 0,21.

Рассмотрим полученные результаты (табл. 1). В степенной зависимости $Q = f(p)$

при увеличении диаметра зерен от 40 до 500 мкм значение степени снижается от 0,905 до 0,53, а в свободном множителе или коэффициенте пропорциональности значение степени снижается от -12 до -7. Для зависимостей с малым диаметром 40, 63 мкм графики зависимостей $Q = f(p)$ при $p = 0,1-1,7$ атм аппроксимируются прямыми линиями. Уравнение прямой линии для зерен 40 мкм $y = 2 \cdot 10^{-10} x + 2 \cdot 10^{-6}$. Числа Рейнольдса для этих данных не выше критического значения по Щелкачеву. Для опытов с расклинивающим материалом с $d = 40, 63, 80, 106$ мкм рассчитывались значения коэффициента проницаемости с учетом погрешности из-за отклонения реального закона фильтрации от линейного закона Дарси (табл. 1). Коэффициент пропорциональности K_c отличается от коэффициента проницаемости k приблизительно в 3 раза для образцов с $d = 40, 63$ мкм. И эти параметры отличаются в 10 раз для образцов с $d = 80$ мкм. Таким образом, зависимости для зерен с $d = 40, 63$ мкм близки к линейным. Использование для расчетов закона Дарси в таких случаях является некорректным. При увеличении диаметра зерна материала на пленках в искусственных щелях от 100 до 180 мкм показатель степени при x снижается от 0,77 до 0,64.

Таблица 2

Законы фильтрации через цилиндрические образцы

Размер зерна, мкм	$Q = f(\Delta p)$	Δp	$q\mu/s = p/l$
Более 212 и менее 300	$10^{-7}x^{0,51}$	0,06–1,74	$10^{-8}x^{0,51}$
	$4 \cdot 10^{-7}x^{0,42}$	1,05–1,74	$4 \cdot 10^{-8}x^{0,42}$
	$2 \cdot 10^{-7}x^{0,49}$	0,497–0,93	$2 \cdot 10^{-8}x^{0,49}$
	$6 \cdot 10^{-8}x^{0,6}$	0,13–0,497	$3 \cdot 10^{-9}x^{0,6}$
300	$3 \cdot 10^{-7}x^{0,46}$	0,22–1,76	$2 \cdot 10^{-8}x^{0,47}$
	$7 \cdot 10^{-7}x^{0,395}$	1,11–1,76	$8 \cdot 10^{-8}x^{0,395}$
	$3 \cdot 10^{-7}x^{0,45}$	0,4–0,9	$3 \cdot 10^{-8}x^{0,45}$
	$2 \cdot 10^{-7}x^{0,52}$	0,227–0,6	$10^{-8}x^{0,52}$
более 500	$10^{-7}x^{0,52}$	0,145–1,7	$10^{-0,8}x^{0,52}$
	$2 \cdot 10^{-6}x^{0,307}$	1,09–1,7	$3 \cdot 10^{-7}x^{0,3}$
	$2 \cdot 10^{-7}x^{0,498}$	0,43–0,89	$2 \cdot 10^{-8}x^{0,49}$
	$8 \cdot 10^{-8}x^{0,588}$	0,135–0,320	$4 \cdot 10^{-9}x^{0,58}$
	$6 \cdot 10^{-10}x^{0,905}$	0,08–1,87	$10^{-11}x^{0,905}$
	$2 \cdot 10^{-9}x^{0,8}$	1,7–1,2	$6 \cdot 10^{-11}x^{0,8}$
	$5 \cdot 10^{-10}x^{0,93}$	0,5–1,295	$8 \cdot 10^{-12}x^{0,93}$
	$6 \cdot 10^{-10}x^{0,91}$	0,5–0,08	$1 \cdot 10^{-11}x^{0,91}$
63+бор	$2 \cdot 10^{-8}x^{0,66}$	0,15–1,78	$10 \cdot 10^{-9}x^{0,66}$
	$10^{-7}x^{0,53}$	1,07–1,78	$7 \cdot 10^{-9}x^{0,53}$
	$3 \cdot 10^{-8}x^{0,66}$	1,07–0,5	$10^{-9}x^{0,66}$
бор	$3 \cdot 10^{-8}x^{0,696}$	0,16–1,78	$10^{-9}x^{0,695}$
	$2 \cdot 10^{-9}x^{0,697}$	1–1,6	$10^{-9}x^{0,698}$
	$6 \cdot 10^{-9}x^{0,82}$	0,5–1	$2 \cdot 10x^{0,82}$

Рассмотрим полученные законы фильтрации через цилиндрические образцы с расклинивающим материалом разного диаметра зерен при трех режимах перепада давления (табл. 2). 1 режим приближенно от 1 до 1,7 атм, 2 режим приближенно от 0,5 до 1 атм, 3 режим от 0,1 до 0,5 атм (табл. 2). В таблице показаны степенные зависимости $Q = f(p)$ и $Q\mu/s = F(p/l)$.

При снижении перепада давления для зерен фракций от 212 до 300 мкм, более 300 мкм и более 500 мкм показатель степени при x возрастает. Меньший показатель степени при x для зерен с самым большим диаметром $d = 500$ мкм при перепаде давления 1–1,7 атм составил 0,307. Для диаметра зерен с d фракция от 212 до 300 мкм показатель степени при x для диапазона $\Delta p = 1$ –1,7 атм составил 0,42, для диапазона $\Delta p = 0,5$ –1 атм показатель степени – 0,49 для диапазона $\Delta p = 0,1$ –0,5 атм показатель степени – 0,6. Зависимости, полученные по общему перепаду давления от 0,1 до 1,7 атм, отличаются от зависимостей, полученных

при более узких перепадах: 0,1–0,5; 0,5–1; 1–1,7 атм – и являются менее точными.

Таблица 3

Законы фильтрации через образцы искусственных щелей

Щель, мкм	степень	Δp , атм
100 с пропантом	$3 \cdot 10^{-9}x^{0,77}$	0,09–1,57
180 с пропантом	$3 \cdot 10^{-8}x^{0,64}$	0,11–1,57
150 мкм открытая	$7 \cdot 10^{-10}x^{0,87}$	0,065–0,175
150 мкм открытая	$2 \cdot 10^{-11}x^{1,14}$	0,175–0,3
75 мкм открытая	$3 \cdot 10^{-10}x^{0,81}$	0,105–1,04
75 мкм открытая	$6 \cdot 10^{-10}x^{0,77}$	0,392–1,04
75 мкм открытая	$10^{-10}x^{0,87}$	0,105–0,392
180 с пропантом + 75	$2 \cdot 10^{-7}x^{0,606}$	0,07–1,3

Рассмотрим полученные законы фильтрации через образцы искусственных щелей с расклинивающим материалом разного диаметра зерен и без расклинивающего материала (табл. 3).

Таблица 4

Рассчитанная проницаемость по искусственным щелям

Щель, раскрытость, мкм	К изм, Д	р	К (1), Д, m = 0,45%	К (2), Д
75	522–753	1,04–0,14		466
150	1850–2148	1,57–0,3		1867
100	48–86	1,57–0,09	24	
180	67–141	1,57–0,18	77	
180 + 75	167–505	1,3–0,07	77	466

При увеличении диаметра зерна от 100 до 180 мкм на материале пленок в искусственных щелях показатель степени при x снижается от 0,77 до 0,64, а степень при свободном сомножителе изменяется от -8 до -7. Для открытой щели 75 мкм при диапазоне давления $p = 1,04-0,105$ атм зависимость $q = f(p)$ составила $3 \cdot 10^{-10} x^{0,81}$, однако для диапазона 0,392–1,04 атм зависимость имеет вид $6 \cdot 10^{-10} x^{0,77}$. Эти изменения вида зависимости при изменении диапазона давления подобны цилиндрическим образцам. Щель 75+180 состоит из пленки с зернами 180 мкм и параллельного пространства из щели с раскрытостью 75 мкм. По обеим частям этой композитной щели идут два потока газа пропорционально их проницаемостям, и суммарный поток рассчитывается по средней проницаемости щели. Вид зависимости для этой щели $2 \cdot 10^{-7} x^{0,606}$. Вид зависимости подобен для щели с расклинивающим материалом 180 мкм, чем для открытой щели 75 мкм. И имеет вид $3 \cdot 10^{-8} x^{0,64}$. Щель 150 мкм исследовалась при диапазоне давления 0,065–0,3 атм. Разделив общий интервал на 2 подынтервала 0,065–0,175 атм и 0,175–0,3 атм, нашли две зависимости, значительно отличающиеся по показателю степени при перепаде давления $-7 \cdot 10^{-10} x^{0,87}$ и $2 \cdot 10^{-11} x^{1,14}$. Это связано, вероятно, со значительной раскрытостью щели и с проявлением нелинейной фильтрации газа. Для цилиндрического образца и щели для зерен 180 мкм получены практически идентичные законы фильтрации, и 100 мкм показало практически идентичные фильтрации законы: $2 \cdot 10^{-8} x^{0,65}$ для цилиндрического образца и $3 \cdot 10^{-8} x^{0,64}$ для искусственной щели. Несколько различимы законы для образцов с зернами $d = 100$ мкм.

Это связано с различной упаковкой зерен при укладке в образцы – от возможных крайних конфигураций, соответствующих теснейшему расположению зерен при $\Theta = 60^\circ$ и свободному при $\Theta = 90^\circ$.

Проницаемость для щели 180 мкм составила 77Д и для щели 100 мкм 24Д (табл. 4). Для щели 75 мкм проницаемость по формуле (2) составила 466 Д а для щели 150 мкм – 1867 Д. Для щели из двух компонентов 180 + 75 расчет производился по известной зависимости для нахождения средней проницаемости пласта, состоящего из двух пропластков разной проницаемости и мощности, и в результате суммарная проницаемость оказалась 216 Д. Между показателем степени зависимости и диаметром зерен расклинивающего материала от 40 до 500 мкм получена связь $n = 5,67d^{0,45}$ при величине достоверности аппроксимации $R^2 = 0,89$.

Заключение

На искусственных образцах, моделирующих трещину гидроразрыва с расклинивающим материалом пропанта Боровичи со средним диаметром зерен от 250–600 мкм, и фракциях кварцевого песка с диаметром от 40 до 180 мкм установлены степенные зависимости расхода газа от перепада давления и зависимости скорости фильтрации от градиента давления. Установленные зависимости

$$v = k_c \left(\frac{dp}{dL} \right)^n$$

имеют показатель степени $n = 0,92-0,31$, снижающийся при увеличении диаметра зерен от 40 до 600 мкм. В пределах каждого диапазона перепада давлений от 0,1 до 1,7 атм для опыта с выбранной фракцией показатель степени n снижается на участке повышенных перепадов давлений от 1 до 1,7 атм. Коэффициент пропорциональности K_c для фракций пропанта изменяется от $4 \cdot 10^{-9}$ до $3 \cdot 10^{-7}$. Коэффициент пропорциональности при диаметре зерен 40 мкм при фильтрации газа по закону близкому к линейному принимает значение $6 \cdot 10^{-12} x^{0,92}$ и больше коэффициента прони-

цаемости вычисленного по закону Дарси приблизительно в 3 раза. Полученные результаты исследований возможно использовать для оценки качества расклинивающего материала в трещине гидроразрыва пласта.

Список литературы

1. Петров В.А., Липаев А.А. Проблемы, возникающие при проведении ГРП и возможности их решения // Управление техносферой 2022. Т. 5. Вып. 1. URL: <https://technosphere-ing.ru/files/2021/1702.pdf> (дата обращения: 11.11.2022).
2. Бобков Д.О. Проблемы, возникающие при проведении ГРП, и возможности их решения // Современные научные исследования и инновации. 2017. № 7. URL: <https://web.shauka.ru/issues/2017/07/84111> (дата обращения: 06.05.2021).
3. Песков А.В. Особенности измерения абсолютной проницаемости горных пород // Вестник Самарского государственного технического университета. 2020. Т. 28. № 2 (66). С. 73–83.
4. Золотухин А.Б., Гаюбов А.Т. Использование множественной регрессионной модели для описания течения флюида в пористых средах // Нефть. Газ. Новации. 2019. № 12. С. 64–70.
5. Зайцев М.В., Михайлов Н.Н., Туманова Е.С. Модели нелинейной фильтрации и влияние параметров нелинейности на дебит скважин в низкопроницаемых коллекторах // Георесурсы. 2021. Т. 23. № 4. С. 44–50.
6. Песков А.В. Проницаемость расклинивающего материала // Успехи современного естествознания. 2022. № 3. С. 86–91.
7. Щелкачев В.Н., Лапук Б.Б. Подземная гидравлика. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. 736 с.