

УДК 532.546; 533.15

## ПРОНИЦАЕМОСТЬ ПОРИСТЫХ СРЕД ДЛЯ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ\*

Л. Дж. Клинкенберг\*\*  
(Shell Development Co.)

Стандартная процедура определения проницаемости пористых сред согласно API Code No.27 (первый выпуск, октябрь 1935) основана на фундаментальном предположении, что, пока скорость потока пропорциональна градиенту давления, проницаемость пористой среды является свойством среды и не зависит от природы флюида, используемого для её определения. Несмотря на то, что это верно для большинства жидкостей, установлено, что проницаемость для газов зависит от природы газа и является приблизительно линейной функцией обратной величины среднего давления. Этот эффект может быть объяснен с учетом эффекта проскальзывания, который тесно связан со средним свободным пробегом молекул. Кажущаяся проницаемость, экстраполируемая к давлению стремящемуся к бесконечности, дает проницаемость, которая является характеристикой только пористой среды.

DOI: 10.5510/OGP20120200114

### I. Введение

В нефтяной промышленности стало обычной практикой определять проницаемость кернового материала сухим воздухом; оборудование, обычно применяемое для этого устроено, так чтобы давление на выходе из образца было равно или близко к атмосферному [1].

Эта практика основана на фундаментальном предположении, что до тех пор, пока действует закон Дарси, то есть, пока скорость потока пропорциональна градиенту давления\*\*\*, проницаемость пористой среды является свойством среды и независима от природы флюида, используемого для её определения [3]. Следовательно, результаты лабораторных исследований с воздухом, могут быть применимы к однородному потоку нефти или газа в подземных резервуарах.

Фундаментальное предположение, что проницаемость пористой среды не зависит от природы флюида, используемого для её определения, проиллюстрировано Маскетом (Muskat) [4] несколькими измерениями проницаемости высокопроницаемых песчаников по воздуху и жидкости.

В работе [5] Маскет дает таблицу результатов исследований проницаемости по воде и воздуху большого количества нефтеносных песчаников, выполненных Фенчером (Fancher), Льюисом (Lewis) и Барнсом (Barnes) [6], демонстрирующих значительные несоответствия между проницаемостью по воздуху и воде, при этом, в основном значения проницаемости по воде ниже, чем по воздуху. Большое количество случаев подобных несоответствий между проницаемостями по воздуху и воде, а также по другим жидкостям, наблюдалось во время исследований, выполненных в лабораториях Batavian Oil Company (Амстердам, Нидерланды) и Shell

Development Company (Эмеривилль, Калифорния). В общем, получено, что для высокопроницаемых сред различия между проницаемостями по жидкости и воздуху малы, тогда как для сред с низкой проницаемостью эти различия значительны.

Указанные несоответствия стимулировали исследования правильности предположения о том, что проницаемость пористой среды не зависит от природы флюида.

Исследования показали, что проницаемость по газу является функцией среднего свободного пробега газовых молекул, и поэтому зависит от факторов, влияющих на него, а именно - давления, температуры и природы газа. Поэтому, когда средний свободный пробег мал, например, при высоких давлениях, проницаемость по газу, близка к проницаемости по жидкости. Экспериментальные данные, которые подтверждают это заключение, обсуждаются ниже.

### II. Проницаемость пористых сред для различных жидкостей

Очевидно, что, если жидкость реагирует с некоторым элементом кернового материала, например, если вода вызывает набухание кернового материала, содержащего глину, то можно ожидать различия между проницаемостями для различных жидкостей и воздуха. То же самое верно, если керновый материал слабо уплотнен, т.е. часть пор может быть перекрыта сыпучим материалом, размываемым жидкостью. С практической точки зрения эти соображения могут быть очень важны; следовательно, если проблема возникает при движении воды в пластах содержащих глину, то проницаемость пласта по сухому воздуху может не иметь никакого значения или даже определенно вводить в заблуждение.

В данной работе обсуждается вопрос о про-

\* L.J.Klinkenberg. *The permeability of porous media to liquids and gases*. Reprinted with permission from the American Petroleum Institute. Copyright 1941 © American Petroleum Institute.

\*\* Представлен А.Г.Лумис (A.G.Loomis, Shell Development Co., Эмеривилль, Калифорния) на Одиннадцатой полугодовой встрече, Тулса, Оклахома, май 1941

\*\*\* В [2] Маскет полностью обсудил пределы применимости закона Дарси относительно перехода ламинарного потока в турбулентный. В данном исследовании экспериментальные условия были подобраны так, чтобы соблюдалась ламинарность потока.

Таблица 1

Используемая жидкость	Проницаемость, мД			
	Фильтр G <sub>4</sub> № 1	Фильтр G <sub>4</sub> № 2	Фильтр G <sub>5</sub> С	Фильтр G <sub>5</sub> Е
Керосин	48.6	49.8	...	...
Толуол	47.6	50.2	3.70	3.42
Хлороформ	49.8	50.6	3.66	3.36
Диэтиловый эфир	50.7	51.9	...	...
Тетрахлорметан	49.5	50.8	3.68	3.33
Пентан	50.2	50.1	...	...
Изооктан	...	...	3.67	3.42
Нитробензол	...	...	3.27	3.05

ницаемости пористых сред не имеющих никаких изменений во внутренней структуре для различных флюидов.

Этот вопрос широко обсуждался в литературе [7], т.е. способны ли стенки малых капилляров пористых сред адсорбировать молекулы до такой степени, чтобы создать более или менее прочные слои, толщина которых в несколько раз превышает молекулярный размер. Указанные адсорбированные слои могут привести к сокращению эффективного диаметра пор в разной степени для различных жидкостей и, как следствие, проницаемость пористой среды будет зависеть от природы жидкости. Некоторые авторы [8] предпочитают говорить об увеличении вязкости жидкости вблизи стенки капилляра, что в принципе одно и то же.

Однако, внимательное изучение литературы приводит к заключению, что нет никаких доказательств присутствия указанных адсорбционных слоев такой толщины, чтобы значительно уменьшить проницаемость пористой среды по жидкости.

Чтобы проверить это экспериментально для пористой среды и избежать осложнений, связанных с набуханием или эрозией, измерения проницаемости были выполнены на стеклянных фильтрах Джена (Jena).

Полученные результаты показаны в таблице 1. Отклонения, за исключением эксперимента с нитробензолом, в пределах погрешности.

Как видно из таблицы 2 поведение воды соответствует норме.

Используемая жидкость	Проницаемость, мД	
	Фильтр G <sub>4</sub>	Фильтр G <sub>5</sub>
Изооктан	78.8	2.31
Вода	79.4	2.27

Для дополнительного подтверждения отклонения, полученного для нитробензола, измерения проницаемости были выполнены также и на других фильтрах; сначала была определена проницаемость

по изооктану, затем по нитробензолу и, вновь по изооктану. Результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3

Используемая жидкость	Проницаемость, мД		
	Фильтр G <sub>5</sub> А	Фильтр G <sub>5</sub> В	Фильтр G <sub>4</sub>
Изооктан	2.38	2.26	63.8
Нитробензол	2.17	2.01	62.8
Изооктан	2.34	2.24	...

Отклонения, полученные для нитробензола не являются результатом образования адсорбционных слоев на стенках капилляров, а вызваны электрокинетическими явлениями. Когда жидкость протекает через капилляры, создается разность потенциалом между концами капилляра – фильтрационный потенциал. Фильтрационный потенциал вызывает электро-эндосмотический поток жидкости, противоположный по направленности гидродинамическому потоку. Подобное явление имеет место и в пористой среде. Полученная проницаемость, следовательно, слишком низка и зависит от природы жидкости. Большинство жидкостей имеет такие значения дзета-потенциала, диэлектрической постоянной и удельной проводимости, которые вызывают лишь небольшие электро-эндосмотические эффекты.

В случае с нитробензолом электро-эндосмотический эффект может быть получен исчезающе малым, если увеличить удельную электропроводность (одновременно уменьшая дзета-потенциал) нитробензола растворением в жидкости очень малого количества соли трехвалентного железа. При этом была получена проницаемость, которая была такой же в пределах погрешности эксперимента, что и для других жидкостей, таких как изооктан.

Таким образом, можно сделать вывод, что если нет никаких изменений во внутренней структуре пористой среды могут иметь место различия в про-

ницаемости для различных жидкостей, в большинстве случаев находящиеся в пределах погрешности эксперимента. Расхождения, полученные между проницаемостями по воздуху и жидкости (как обсуждалось во Введении), имеют место, очевидно, не из-за природы жидкостей, используемых при исследовании, а из-за процедуры измерения проницаемости по воздуху. Это стало понятно после измерения проницаемости стеклянного фильтра Джена по различным газам, как показано в таблице 4.

Используемый газ	Проницаемость, мД
Воздух	3.06
Водород	4.23
Двуокись углерода	2.88

Объяснение различий между проницаемостями по различным газам достигнуто, применением результатов для потока разряженных газов, полученных Кундтом (Kundt) и Варбургом (Warburg) [9, 10] и для потока газов через пористые среды при нормальном давлении, полученных Кнудсеном (Knudsen) [11].

### III. Теория проскальзывания

Кундт и Варбург доказали, что при течении газа вдоль твердой стенки, слой газа вблизи неё находится в движении относительно твердой поверхности. Другими словами, если стенка имеет нулевую скорость, то скорость слоя газа в непосредственной близости от неё имеет конечное значение. В результате количество газа, проходящее через капилляр больше, чем можно было бы ожидать по формуле Пуазейля. Это становится очевидным при следующем упрощенном рассмотрении кинетической теории газов.

Рассмотрим слой, примыкающий к стенке, который меньше, чем длина свободного пробега молекул газа, поэтому, практически молекула не сталкивается с другими молекулами, присутствующими в данном слое. На данный момент половина молекул газа в данном слое будет иметь составляющую скорости направленную к стенке, а другая половина – в противоположном направлении. Молекулы движущиеся к стенке имели последнее столкновение где-то в протекающей массе, и поэтому, в направлении потока будут иметь среднюю составляющую скорости отличную от нуля. Часть этой средней составляющей скорости будет потеряна при столкновении со стенкой. Даже если молекулы потеряют её полностью, то все ещё в направлении потока средняя составляющая скорости всех молекул, содержащихся в слое будет составлять половину средней составляющей скорости молекул, двигающихся к стенке. Поэтому, газ в слое будет иметь определенную скорость течения. Допустим, что  $w_0$  есть скорость вблизи стенки относительно стенки. Допустим, что постоянный градиент скорости в направлении, перпендикулярном стенке равен  $\frac{dw}{dz}$ , тогда скорость

на расстоянии  $z$  от стенки будет:

$$W_2 = w = z \frac{dw}{dz}$$

Предположим, далее, что молекулы, имевшие последнее столкновение на расстоянии  $z$  от стенки, в направлении потока имеют среднюю составляющую скорости, равную скорости потока газа в данном месте. Среднее расстояние  $z$  от стенки, на котором имело место последнее столкновение, будет пропорционально среднему свободному пробегу  $\lambda$  молекул газа  $\bar{z} = c\lambda$ , где  $c$  - коэффициент пропорциональности.

Отсюда средняя составляющая скорости молекул, двигающихся к стенке будет:

$$w_0 + c\lambda \frac{dw}{dz}$$

Если столкновение со стенкой не полностью упругое, тогда все молекулы в направлении потока теряют свою среднюю составляющую скорости и, как было отмечено выше, средняя скорость всех молекул, содержащихся в рассматриваемом слое, будет составлять половину средней составляющей скорости молекул, двигающихся к стенке.

Отсюда:

$$w_0 = \frac{1}{2} \left( w_0 + c\lambda \frac{dw}{dz} \right)$$

$$w_0 = c\lambda \frac{dw}{dz} \quad (1)$$

Кундт и Варбург показали, что предположение о том, что градиент скорости  $\frac{dw}{dz}$  является постоянным не верно; у стенки градиент скорости больше, чем на большем расстоянии. Кроме того, в вышеприведенных предположениях было допущено, что молекулы после столкновения в определенном месте получают среднюю составляющую скорости в направлении потока равную скорости потока в данном месте. Средний градиент скорости, однако, зависит от функции распределения скорости в данном месте; и, следовательно, не только от скорости, но также и от градиента скорости, как было отмечено Джагером (Jager) [12] и Джейнсом (Janes) [13]. Величина  $c$ , рассчитанная Кундтом и Варбургом, следовательно не точна. Пока что невозможно произвести точный расчет, однако величина  $c$  возможно чуть меньше 1.

### IV. Течение газа через прямой капилляр

Варбург [10] применил эффект проскальзывания к потоку газа через капилляр, радиус которого больше по сравнению со средним свободным пробегом. Согласно Варбургу, рассмотрим капилляр радиуса  $z_0$  и длиной  $l$ , причем его ось, совпадает с осью  $x$  и предположим, что скорость является функцией только расстояния  $r$  от оси. Разность сил сопротивления течению в направлении оси  $x$  в слоях радиусов  $r$  и  $r + rd$  элементарного объема газа, расположенного между сечениями  $x$  и  $x + dx$ , создают силу направленную противоположно потоку:

$$-\frac{d}{dr} \left( \mu \frac{dw}{dr} \cdot 2\pi r dx \right) dr$$

где  $\mu$  - вязкость газа.

Для стационарного потока данная сила должна быть уравновешена силой нормального давления на плоских основаниях выделенного полого цилиндрического элемента. Разность этих сил будет:

$$-\frac{dp}{dx} \cdot dx \cdot 2\pi r dx$$

Тогда получим:

$$-\frac{d}{dr} \left( \mu \frac{dw}{dr} \cdot 2\pi r dx \right) dr = -\frac{dp}{dx} \cdot dx \cdot 2\pi r dr$$

$$\frac{d}{dr} \left( r \frac{dw}{dr} \right) = \frac{dp}{dx} \cdot \frac{r}{\mu}$$

Интегрирование дает:

$$r \frac{dw}{dr} = \frac{1}{2\mu} \cdot \frac{dp}{dx} r^2 + A \quad (2)$$

Интегрируя еще раз получим:

$$w = \frac{1}{4\mu} \cdot \frac{dp}{dx} r^2 + A \ln r + B \quad (3)$$

Ввиду того, что скорость потока при  $r = 0$  должна иметь конечную величину, то  $A = 0$ .

Константу интегрирования  $B$  можно определить из граничного условия (1) на стенке ( $r = r_0$ ).

$$w_0 = c\lambda \frac{dw}{dz} = -c\lambda \left( \frac{dw}{dr} \right)_{r=r_0}$$

Подставив это выражение в уравнение (3) получим:

$$-c\lambda \left( \frac{dw}{dr} \right)_{r=r_0} = \frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dx} r_0^2 + B$$

$$B = -c\lambda \left( \frac{dw}{dr} \right)_{r=r_0} - \frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dx} r_0^2$$

Из выражения (2) получим:

$$\left( \frac{dw}{dr} \right)_{r=r_0} = \frac{r_0}{2\mu} \cdot \frac{dp}{dx}$$

$$B = -c\lambda \frac{r_0}{2\mu} \cdot \frac{dp}{dx} - \frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dx} r_0^2$$

Подставив это выражение в уравнение (3) получим:

$$w = -\frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dx} (r_0^2 - r^2 + 2c\lambda r_0)$$

Объем газа, проходящий в течении времени через кольцевое сечение между стенками двух цилиндров радиусов  $r$  и  $r + rd$  будет:

$$dv = -\frac{\pi}{2\mu} \cdot \frac{dp}{dx} \cdot t (r_0^2 r dr - r^3 dr + 2c\lambda r_0 r dr)$$

Объем, проходящий через весь поперечный разрез цилиндрического сечения радиуса:

$$\begin{aligned} v &= -\frac{\pi}{2\mu} \cdot \frac{dp}{dx} \cdot t \int_0^{r_0} (r_0^2 r dr - r^3 dr + 2c\lambda r_0 r dr) \\ &= -\frac{\pi r_0^4}{8\mu} \cdot \frac{dp}{dx} \cdot t \left( 1 + \frac{4c\lambda}{r_0} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

Так как средний свободный пробег обратно пропорционален давлению, то мы можем написать:

$$4c\lambda = \frac{b}{p}$$

Если за единицу времени через капилляр проходит  $n$  – грамм-молей, то

$$\frac{pv}{t} = nRT$$

Поставим это выражение в уравнение (4) получим:

$$nRT dx = -\frac{\pi r_0^4}{8\mu} \left( p dp + \frac{b}{r_0} dp \right)$$

Интегрируя по всей длине капилляра, получим:

$$\begin{aligned} nRTl &= -\frac{\pi r_0^4}{8\mu} \int_{p_1}^{p_2} \left( p dp + \frac{b}{r_0} dp \right) = \\ &= \frac{\pi r_0^4}{8\mu} \left\{ \frac{p_1^2 - p_2^2}{2} + \frac{b}{r_0} (p_1 - p_2) \right\} \end{aligned}$$

Следовательно:

$$\frac{pv}{t} = Q = \frac{\pi r_0^4}{8\mu l} \cdot (p_1 - p_2) \cdot \frac{p_1 - p_2}{2} \cdot \left( 1 + \frac{b}{\frac{1}{2}(p_1 + p_2)r_0} \right)$$

Если  $\bar{\lambda}$  это средний свободный пробег при среднем давлении  $\bar{p} = \frac{1}{2}(p_1 + p_2)$ , то:

$$Q = \frac{\pi r_0^4}{8\mu l} \cdot (p_1 - p_2) \cdot \bar{p} \cdot \left( 1 + \frac{4c\lambda}{r_0} \right) \quad (5)$$

Если при контакте со стенкой не происходит проскальзывание флюида ( $c\lambda = 0$ ), то уравнение (5) сводится к уравнению Паузейля.

## V. Течение газа через идеальную пористую среду

Простейший ламинарный поток, формируется в пористой среде, в которой все капилляры имеют одинаковый диаметр и случайную ориентацию. Такая модель хотя и будет иметь одну и ту же проницаемость во всех направлениях, слишком проста для использования в качестве основы для количественных прогнозов, однако, как показано ниже она дает возможность получить качественные оценки.

Рассмотрим куб пористой среды ребром в 1см. Предположим, что он содержит  $n$  капилляров радиуса  $r$  и направление потока перпендикулярно одной из его граней.

Количество жидкости, протекающей в единицу времени находим путем применения закона Паузейля:

$$\frac{v}{t} = \frac{1}{3} \cdot \frac{n\pi r^4}{8\mu} (p_1 - p_2) \quad (6)$$

Согласно закону Дарси, количество проходящей жидкости будет рассчитано по формуле:

$$\frac{v}{t} = \frac{K}{\mu} \cdot (p_1 - p_2) \quad (7)$$

где  $K$  – проницаемость.

Из уравнения (6) и (7), получим:

$$K = \frac{1}{3} \cdot \frac{n\pi r^4}{8} \quad (8)$$

Для газа, если проскальзывание происходит при контакте со стенкой (см. уравнение (5)) получим:

$$Q = \frac{1}{3} \cdot \frac{n\pi r^4}{8\mu} \cdot (p_1 - p_2) \bar{p} \left( 1 + \frac{4c\lambda}{r} \right) \quad (9)$$



Или, с учетом уравнения (8):

$$Q = \frac{K}{\mu} \cdot (p_1 - p_2) \bar{p} \left( 1 + \frac{4c\lambda}{r} \right) \quad (10)$$

Применяя уравнение Дарси для потока газа, проходящего через пористую среду вышеприведенных размеров:

$$Q = \frac{K_a}{\mu} \cdot (p_1 - p_2) \bar{p} \quad (11)$$

Уравнения (10) и (11) приводят к тому, что:

$$K_a = K \left( 1 + \frac{4c\lambda}{r} \right) \quad (12)$$

С учетом того, что средний свободный пробег обратно пропорционален давлению можно написать:

$$\frac{4c\lambda}{r} = \frac{b}{\bar{p}}$$

где  $b$  - является константой. Подставляя это выражение в уравнение (12), получим:

$$K_a = K \left( 1 + \frac{b}{\bar{p}} \right) \quad (13)$$

уравнение характеризующее связь между кажущейся и истинной проницаемостью идеализированной пористой системы для газа.

## VI. Проницаемость образцов керн и стеклянных фильтров для различных газов при различных давлениях

Если упрощенные расчёты, данные в разделе V, действительны не только для системы прямых капилляров, но также могут быть применимы к пористой среде, то согласно уравнениям (12) или (13) следует, что:

1. Проницаемость по газу является линейной функцией обратной величины среднего давления ( $1/\bar{p}$ ).

2. Проницаемость по газу не зависит от разности давлений ( $p_1 - p_2$ ) до тех пор, пока среднее давление

$$\bar{p} = \frac{p_1 + p_2}{2}$$

постоянно.

3. Так как константа  $b$  обратно пропорциональна  $r$  (радиусу капилляров), величина  $b$  предположительно будет малой для высокопроницаемых и большой для малопроницаемых образцов.

4. При одинаковом среднем давлении проницаемость для разных газов различна, так как в этом случае средний свободный пробег  $\bar{\lambda}$  имеет различные значения.

5. Кажущаяся проницаемость экстраполированная на давление стремящееся к бесконечности  $\bar{p} \rightarrow \infty$  ( $1/\bar{p} = 0$ ) дает действительную проницаемость.

Для подтверждения вышеприве-

денных заключений, были произведены измерения проницаемости на стеклянных фильтрах и образцах керн различных месторождений. Для того чтобы проверить первый вывод, о том, что проницаемость по газу является линейной функцией  $1/\bar{p}$ , измерения проводились при различных давлениях, примерно от 1 см.рт.ст. до 20 атм. В таблице 5 приводятся результаты измерений проницаемости по воздуху для стеклянного фильтра при различных давлениях. В таблицах 6 и 7 подобные измерения даны для 2 образцов керн.

Как видно из рисунков 1-3, кажущаяся проницаемость является линейной функцией  $1/\bar{p}$ . Однако, как видно из таблиц 5-7, указанную функцию можно считать линейной только приближенно, при этом величина константы  $b$  увеличивается с увеличением давления.

Даже в идеальной поровой системе, нельзя ожидать, что коэффициент  $b$  будет постоянным, потому

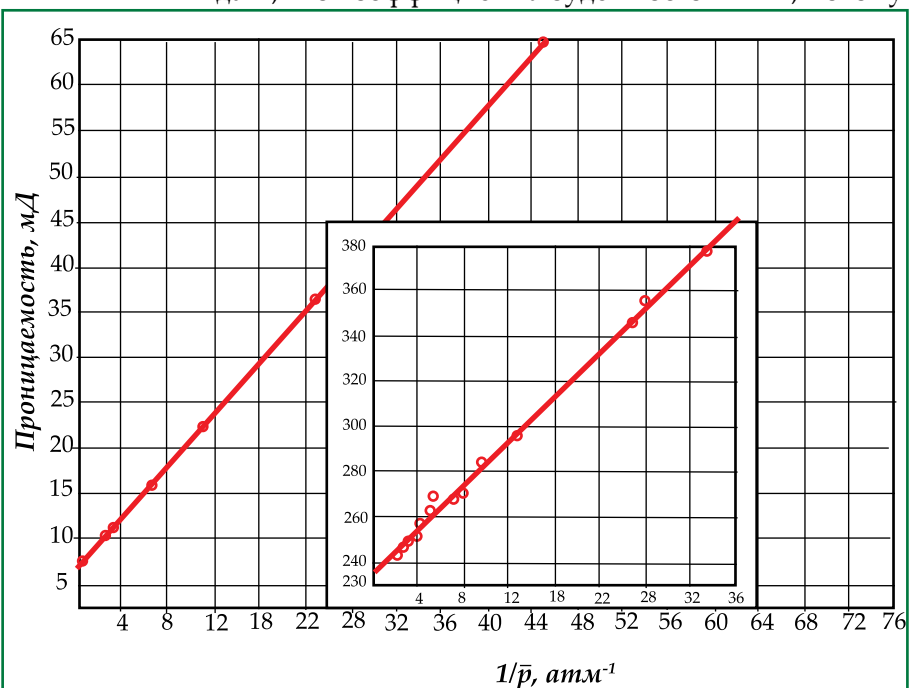


Рис.1. Проницаемость стеклянного фильтра Джена G<sub>3</sub>A для воздуха при различных давлениях (проницаемость для изооктана 2.36 мД)

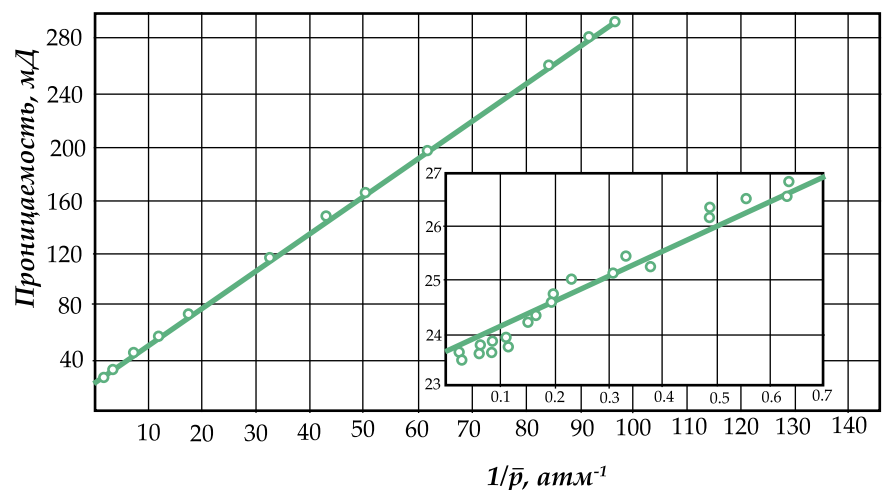


Рис.2. Проницаемость образца керн "А" для воздуха при различных давлениях (проницаемость для изооктана 23.66 мД)

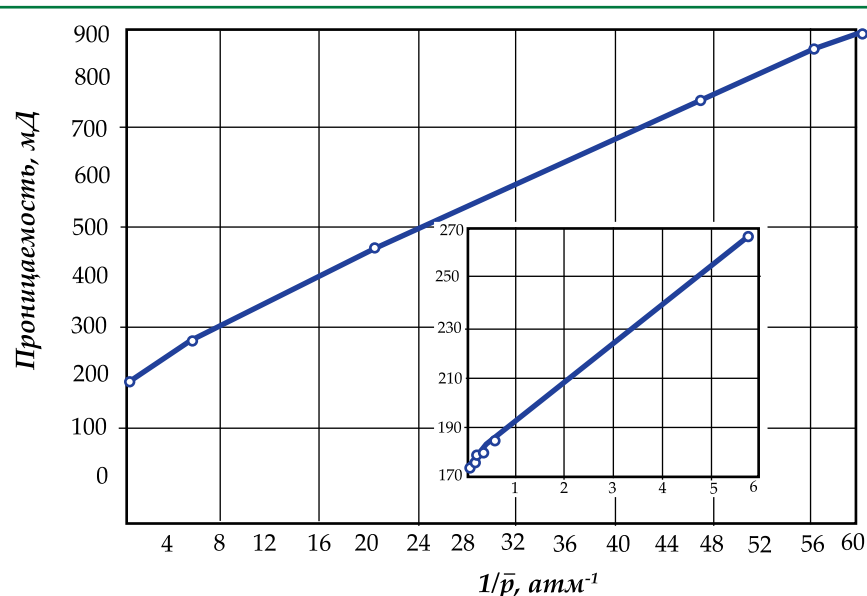


Рис.3. Проницаемость образца керна "F" для воздуха при различных давлениях (проницаемость для изооктана 170 мД)

что теория Кундта и Варбурга не может быть применима к потоку газа через капилляр, если средний свободный пробег не слишком мал по сравнению с радиусом капилляра (т.е. возможны отклонения при низких давлениях).

Во втором случае предполагалось, что закон течения приемлем, строго говоря, только для капилляров такой длины, для которых влияние концевых эффектов незначительно. Однако капилляры в поровой системе, не имеют постоянного поперечного сечения и не всегда их длина превышает диаметр.

Это изменение коэффициента  $b$ , в данной статье в деталях обсуждаться не будет.

Что касается второго заключения, что проницаемость не зависит от

Таблица 5

Проницаемость стеклянного фильтра Джена "G<sub>5</sub> A" для воздуха при различных давлениях (проницаемость для изооктана: 2.36 мД)

$\bar{p} = \frac{p_1 + p_2}{2},$ атм	$p_1 - p_2,$ атм	$1/\bar{p},$ атм <sup>-1</sup>	$K_a,$ мД	$K_a/K$	$b$
0.02195	0.01771	45.55	64.84	27.4	0.58
0.04007	0.01694	24.96	37.13	15.7	0.59
0.05505	0.01591	18.18	27.96	11.8	0.60
0.09810	0.01508	10.19	16.65	7.05	0.59
0.34976	0.00952	2.859	6.69	2.84	0.64
0.4615	0.00757	2.167	5.64	2.39	0.64
1.192	0.0450	0.838	3.76	1.59	0.71
1.199	0.0343	0.834	3.76	1.59	0.71
1.6679	0.0546	0.600	3.43	1.45	0.75
1.683	0.0270	0.594	3.43	1.45	0.76
1.758	0.0462	0.569	3.36	1.42 <sup>5</sup>	0.75
2.517	0.04416	0.3974	3.04	1.29	0.72
2.908	0.0358	0.3439	3.02	1.28	0.81
3.245	0.0445	0.3082	2.90	1.23	0.74
3.859	0.0422	0.2592	2.79	1.18 <sup>5</sup>	0.71
4.571	0.0430	0.2189	2.76	1.17	0.76
5.353	0.0458	0.1868	2.65	1.12 <sup>5</sup>	0.67
5.501	0.0318	0.1819	2.65	1.12 <sup>5</sup>	0.68
5.612	0.0481	0.1782	2.70	1.15	0.82
6.014	0.0294	0.1662	2.64	1.12	0.72
6.484	0.0419	0.1542	2.64	1.12	0.78
9.484	0.0329	0.1054	2.54	1.08	*
10.91	0.0289	0.0917	2.48	1.05	...
12.08	0.0450	0.0828	2.48	1.05	...
14.04	0.0335	0.0712	2.47	1.05	...
16.49	0.0282	0.0606	2.46	1.04	...
18.98	0.0185	0.0527	2.44	1.03	...
19.31	0.0210	0.0518	2.42	1.02	...

\* При более высоких давлениях расчет  $b$  не был произведен, т.к. влияние погрешностей эксперимента на величину  $b$  так велико, что нельзя считать расчет достоверным.

Таблица 6

Проницаемость образца керна "А" для воздуха  
при различных давлениях (проницаемость для жидкости: 23.66 мД)

$\bar{p} = \frac{p_1 + p_2}{2},$ атм	$p_1 - p_2,$ атм	$1/\bar{p},$ атм <sup>-1</sup>	$K_a,$ мД	$K_a/K$	$b$
0.01036	0.01627	96.56	290	12.25	0.116
0.01087	0.01603	92.00	28	11.82	0.117
0.01189	0.01577	84.09	259	10.96	0.118
0.01633	0.01508	61.20	197	8.31	0.119
0.02023	0.01425	50.05	165	6.98	0.120
0.02336	0.01414	42.83	148	6.25	0.122
0.03149	0.05734	31.74	117	4.97	0.124
0.05921	0.01081	16.89	75.6	3.20	0.130
0.08882	0.03962	11.26	60.0	2.53	0.136
0.1464	0.03101	6.829	46.6	1.97	0.142
0.3433	0.01635	2.913	34.4	1.446	0.153
0.799	0.00351	1.251	28.6	1.207	0.166
1.570	0.03652	0.636	26.79	1.133	0.209
1.581	0.01558	0.632	26.58	1.124	0.198
1.802	0.05379	0.5553	26.49	1.119	0.214
2.037	0.03422	0.4910	26.23	1.108	0.220
2.045	0.02052	0.4892	26.33	1.112	0.229
2.657	0.03511	0.3764	25.22	1.066	0.18
3.007	0.05166	0.3325	25.43	1.075	0.23
3.224	0.03704	0.3101	25.09	1.060	0.20
4.366	0.04600	0.2290	25.02	1.058	0.26
5.049	0.03296	0.1981	24.72	1.045	0.23
5.100	0.03493	0.1961	24.62	1.041	0.21
6.34	0.01779	0.1577	24.34	1.029	*
6.34	0.03729	0.1577	24.29	1.027	...
6.43	0.03446	0.1553	24.25	1.023	...
8.94	0.01615	0.1119	23.79	1.005	...
8.94	0.03177	0.1119	23.85	1.008	...
9.19	0.03221	0.1088	23.93	1.012	...
12.45	0.01707	0.0802	23.66	1.000	...
12.48	0.02033	0.0800	23.82	1.007	...
16.44	0.04056	0.0608	23.67	1.000	...
16.45	0.01954	0.0608	23.77	1.005	...
20.01	0.01821	0.0499	23.55	0.995	...
20.01	0.01105	0.0499	23.65	1.000	...

\* При более высоких давлениях расчет  $b$  не был произведен, т.к. влияние погрешностей эксперимента на величину  $b$  так велико, что нельзя считать расчет достоверным.

Таблица 7

Проницаемость образца зерна "F" для воздуха  
при различных давлениях (проницаемость для воздуха: 171 мД)

$\bar{p} = \frac{p_1 + p_2}{2},$ атм	$p_1 - p_2,$ атм	$1/\bar{p},$ атм <sup>-1</sup>	$K_a,$ мД	$K_a/K$	$b$
0.01665	0.02717	60.1	900	5.29	0.071
0.01779	0.02652	56.2	863	5.07	0.072
0.02130	0.02528	46.96	758	4.44	0.073
0.04890	0.01821	20.46	455	2.67	0.082
0.1738	0.00843	5.75	268	1.58	0.082
1.701	0.02017	0.587	184.9	1.087	0.15
2.659	0.01625	0.3761	180.0	1.058	0.16
3.641	0.01511	0.2748	179.8	1.057	0.21
4.619	0.01412	0.2165	179.1	1.052	0.24
7.04	0.00821	0.1420	176.7	1.038	0.27
12.89	0.00582	0.0776	173.9	1.022	0.29

разности давлений ( $p_1 - p_2$ ) до тех пор, пока среднее давление постоянно, то оно проверялось несколько раз и всегда подтверждалось. Данные таблиц 5 и 6 иллюстрируют этот факт.

Из уже представленных и других примеров, приведенных в таблице 8, очевидно, что чем выше проницаемость образца, тем меньше коэффициент  $b$ , как и предполагалось.

Для проверки заключения о том, что при одинаковом среднем давлении проницаемость для разных газов различна, были произведены измерения для воздуха, азота, двуокиси углерода и водорода. Результаты приведены на рисунках 4-7. Согласно уравнению (12) при данном давлении кажущаяся проницаемость для различных газов должна увеличиваться в порядке увеличения их средних свободных пробегов, что подтверждается приведенными данными. Одинаковая проницаемость для различных газов обнаруживается при давлениях, когда средний свободный пробег молекул газа для них одинаков.

Ввиду того, что средний свободный пробег обратно пропорционален давлению, одинаковая проницаемость для различных газов будет наблюдаться при давлениях, которые пропорциональны средним

свободным пробегам. Для водорода, воздуха и двуокиси углерода, например, средние свободные пробеги которых, соответственно  $1.123 \times 10^{-8}$  см,  $608 \times 10^{-8}$  см и  $397 \times 10^{-8}$  см, одинаковая проницаемость будет наблюдаться при давлениях в соотношении 1.85:1:0.65 или для обратных величин давления в соотношении 0.54:1:1.54. Как видно, экспериментальные результаты проверки этого предположения довольно близки к этим значениям.

И, наконец (как видно из рисунков 1-7) кажущаяся проницаемость  $K_a$  экстраполированная на давление  $\bar{p} \rightarrow \infty$ , в пределах погрешности эксперимента, равна проницаемости по жидкости. Это показано в таблице 9, где представлены проницаемости при атмосферном давлении, экстраполированные к давлению  $\bar{p} \rightarrow \infty$  и проницаемости по жидкости ряда стеклянных фильтров и образцов зерна различного происхождения. То, что проницаемость по газу экстраполированная на давление  $\bar{p} \rightarrow \infty$  равна проницаемости по жидкости возможно, т.к. средний свободный пробег молекул жидкости почти равен среднему свободному пробегу молекул газа при очень высоком давлении.

Из вышеуказанных результатов очевидно, что

Таблица 8

Образец	Проницаемость для изооктана, мД	$b$ для $1/\bar{p} = \infty$
Стеклянный фильтр Джена G <sub>5</sub> А	2.36	0.58
Стеклянный фильтр Джена G <sub>5</sub> No. 3	2.13	0.76
Стеклянный фильтр Джена G <sub>5</sub> No.5	4.36	0.76
Стеклянный фильтр Джена G <sub>4</sub>	85.6	0.138
Образец зерна А	23.66	0.116
Образец зерна В	24.40	0.096
Образец зерна С	32.1	0.174
Образец зерна D	92.3	0.067
Образец зерна E	105	0.067
Образец зерна F	170	0.069
Образец зерна G	1.054	0.035
Образец зерна H	1.347	0.022



проницаемость согласно API Code No.27 зависит от природы используемого флюида. Как показано, возможно определить проницаемость, которая характеризует только пористую среду, если учесть эффект проскальзывания; экспериментально это производится экстраполированием проницаемости по газу, определенной при различных давлениях, на давление  $\bar{p} \rightarrow \infty$ .

В нефтяной промышленности проницаемость образцов керна определяется для установления геологической корреляции и для количественного расчета дебита продуктивного пласта. В данных расчетах были получены некоторые приблизительные значения, т.к. нет необходимости знать проницаемость с более высокой степенью точности. Кроме того, нефтеносный песчаник, в основном является неоднородным по проницаемости и поэтому необходимо усреднять значения для данного продуктивного интервала. Кроме того проницаемость, определенная в лаборатории для извлеченных и просушенных образцов керна, не отражает в полной степени пластовых условий, из-за усадки глин и др. гидратированных материалов.

Поэтому очевидно, что расхождения между проницаемостями для жидкости и газа при атмосферном давлении, во многих случаях, по крайней мере для пластов с относительно высокой проницаемостью не представляют интерес для практических целей.

Для низкопроницаемых пластов абсолютные расхождения хотя и могут быть незначительными, однако в процентном соотношении (см. таблицу 9) могут быть велики, поэтому в этих случаях желательно учитывать эффект проскальзывания, обсуждаемый в данной статье.

## VII. Установка и методика эксперимента

### A. Определение проницаемости по жидкости

В процессе эксперимента следует обратить внимание на:

1. Чистоту жидкости, т.к. суспендированные и коллоидные загрязнения, в частности, могут засорить образец, и, следовательно, привести к снижению проницаемости.

2. Насыщение пористой среды. Все поры должны быть полностью насыщены жидкостью.

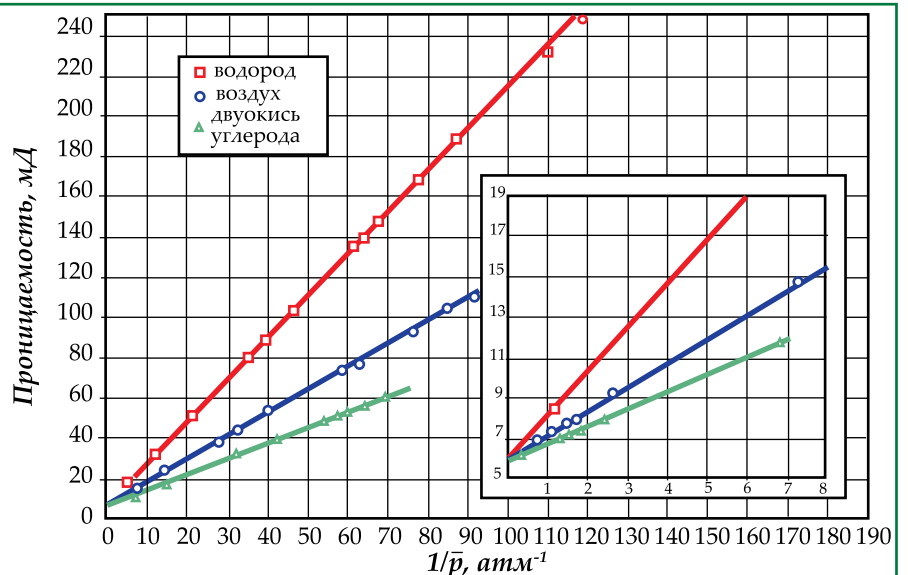


Рис.4. Проницаемость образца керна "К" для водорода, воздуха и двуокиси углерода при различных давлениях

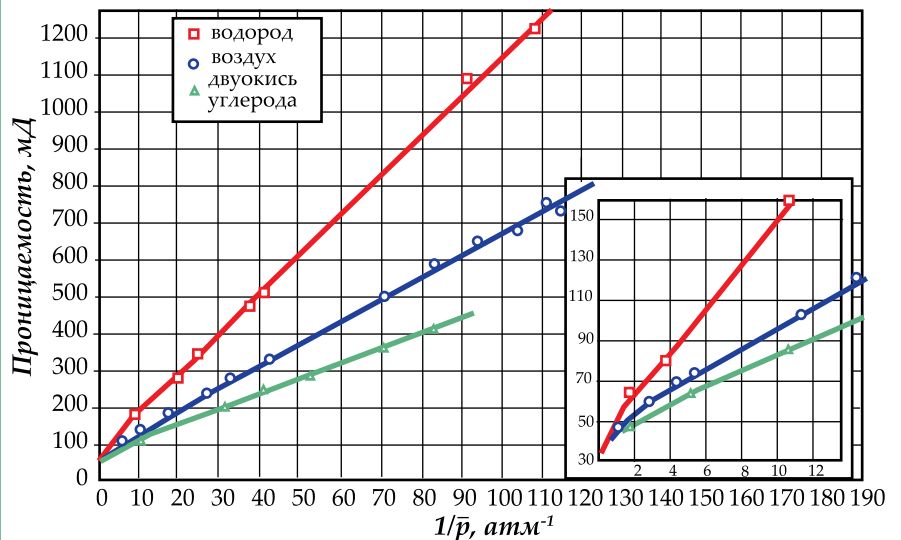


Рис.5. Проницаемость образца керна "С" для водорода, воздуха и двуокиси углерода при различных давлениях (проницаемость для изооктана 32.1 мД)

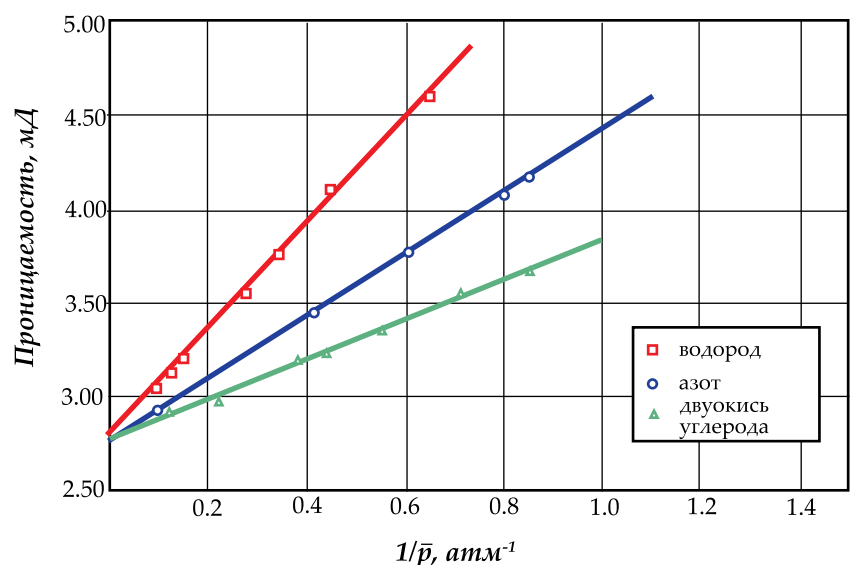


Рис.6. Проницаемость образца керна "L" для водорода, азота и двуокиси углерода при различных давлениях (проницаемость для изооктана 2.55 мД)

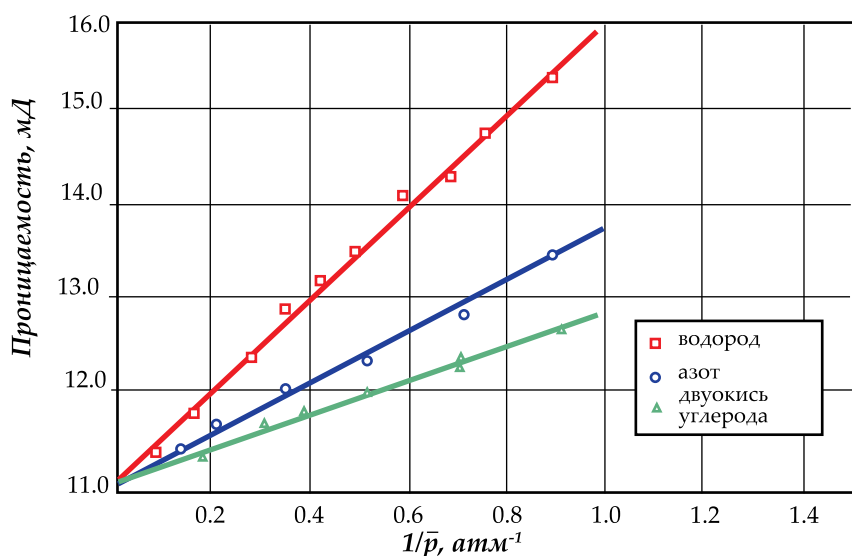


Рис.7. Проницаемость образца керны "М" для водорода, азота и двуоксида углерода при различных давлениях (проницаемость для изооктана 10.45 мД)

Окклюдированные пузырьки газа могут привести к значительному снижению проницаемости образца.

Установка для определения проницаемости по жидкости показана на рисунке 8.

$a_1$  и  $a_2$  - пористые образцы для проведения измерений. Они устанавливаются между двумя стеклянными чашками, снабженными стеклянными шлифами таким образом, чтобы их не нужно было переустанавливать при размещении в другой установке.

Стеклянные фильтры впаяны непосредственно между двумя стеклянными шлифами.

Размещение указанных образцов друг на другом, как показано на рисунке 8, позволяет исследовать их одновременно.

$b_1$  и  $b_2$  служат манометрами. При небольших перепадах давления, жидкость, используемая для определения проницаемости может также служить жидкостью для манометра (трубки  $b_1$  и  $b_2$  длиннее, чем показано на рисунке). При больших перепадах давления, трубки  $b_1$  и  $b_2$  заполняются ртутью.

$c$  - стеклянный фильтр - служит в качестве дополнительного устройства для удаления суспендированных частиц из жидкости до того, как она проникнет в образцы  $a_1$  и  $a_2$ .

$d$  - сосуд, емкостью 700 мл, из которого жидкость вытесняется ртутью. Ртуть попадает в сосуд  $d$  из колбы Мариотта  $f$  под действием постоянного перепада уровня. Ртуть из колбы Мариотта  $f$  через центральное сливное отверстие под действием постоянного перепада уровня попадает в сосуд  $d$ . При помощи крана  $k$  с двумя отверстиями сосуд  $d$  может быть подсоединен, по желанию, либо к остальной части прибора, либо к боковой трубке  $e$ .

Прежде, чем начать опыт, прибор заполняется жидкостью и образцы керны насыщаются. Для этого, колба  $f$ , соединительная трубка и часть центральной трубки, соединенная с сосудом  $d$ , сначала заполняется ртутью, так чтобы под краном  $m$  не скопился воздух. Затем сосуд  $d$  вакуумируется через боковую трубку ротационным масляным вакуумным насосом. Когда достигается соответствующий вакуум, например, 0.5 мм.рт.ст., боковая трубка  $g$  погру-

жается в сосуд со свежедистиллированной жидкостью. Кран в трубке  $g$  немного приоткрывается и жидкость медленно всасывается в сосуд  $d$ . Летучие жидкости, попадая в сосуд  $d$  начинают интенсивно кипеть, если давление ниже давления их пара. Турбулентность жидкости, на выходе из отверстия крана, предотвращает запаздывание кипения. Жидкость при этом почти полностью освобождается от растворенных газов при поступлении в сосуд  $d$ , что имеет важное значение для насыщения образцов.

Образцы и манометры, при этом, вакуумируются через трубку  $i$ , которая заменяется на слив  $h$  при помощи ртутного диффузионного насоса. В связи с этим концы манометра должны быть закрыты. При работе с низкопроницаемыми образцами, для экономии времени, одновременно,

так же можно вакуумировать нижний манометр.

Как только давление достигнет 0.01 мм.рт.ст. (измеряется с помощью манометра Маклеода (McLeod)) кран  $k$  поворачивают так, чтобы обеспечить связь между сосудом  $d$  и вакуумированной частью установки. Под влиянием атмосферного и гидростатического давления ртути, жидкость начинает поступать в установку и полностью заполняет её. При непрерывной закачке в процессе заполнения, остатки газа вытесняются паром жидкости до тех пор, пока освободившийся из жидкости газ полностью не удален. Если под образцами пузырьки газа не наблюдаются, можно считать поры полностью насыщенными жидкостью в отсутствии свободного газа.

После установки термометра  $t$  для снятия температуры жидкости, трубка  $i$  снова заменяется сливом  $h$ . Таким образом, установка готова к работе.

Затем жидкость движется через установку, при поддержании постоянного перепада уровня ртути. Перепад давлений по образцу рассчитывается исходя из уровней в манометрах и восходящей трубке  $h$ , после того, как эти уровни устанавливаются. Скорость потока измеряется путем накопления вытекающей жидкости в калиброванный цилиндр или в тарированную колбу, при низких скоростях потока в течении времени измерения.

Меняя высоту колбы  $f$ , можно определить проницаемость при различных перепадах давления. Продолжая измерения в течение некоторого времени, можно установить остается ли проницаемость постоянной и не забиты ли поры загрязнением.

В некоторых случаях применяется модифицированная установка, показанная на рисунке 9. В этой установке не используется ртуть во избежание загрязнения жидкости при контакте с ней. Кроме того для предупреждения загрязнения жидкости смазкой крана, не допускается прямой контакт его с рабочими жидкостями.

Здесь также, как и в вышеописанной установке,  $a_1$  и  $a_2$  стеклянные фильтры (или образцы керны) для измерений,  $b_1$  и  $b_2$  служат манометрами и имеется дополнительный фильтр  $c$ .

Таблица 9

Образец	Газ	Проницаемость для газа при:		Проницаемость для изооктана, мД
		Атмосферном давлении, мД	$\bar{p} \rightarrow \infty$ мД	
Стекланный фильтр Джена G <sub>5</sub> А	Воздух	4.09	2.34	2.36
Стекланный фильтр Джена G <sub>5</sub> No.3	Воздух	5.04	2.13	2.13
Стекланный фильтр Джена G <sub>5</sub> No.5.	Воздух	9.89	4.36	4.36
Стекланный фильтр Джена G <sub>4</sub>	Воздух	97.6	a	85.6
Образец керна А	Воздух	28.2	23.6	23.66
Образец керна В	Воздух	28.0	a	24.4
Образец керна F	Воздух	195	170	170
Образец керна D	Воздух	102	a	92.3
Образец керна E	Воздух	124.1	106.5	b
Образец керна G	Воздух	1.096	1.054	b
Образец керна H	Воздух	1.406	1.347	1.353
Образец керна К	Водород	8.0	5.9	b
Образец керна К	Воздух	7.2	5.9	b
Образец керна К	Двуокись углерода	6.9	5.9	b
Образец керна С	Водород	50	32	32.1
Образец керна С	Воздух	45	32	32.1
Образец керна С	Двуокись углерода	42	32	32.1
Образец керна L	Водород	5.64	2.75	2.55
Образец керна L	Азот	4.41	2.75	2.55
Образец керна L	Двуокись углерода	3.84	2.75	2.55
Образец керна М	Водород	15.92	11.10	10.45
Образец керна М	Азот	13.65	11.10	10.45
Образец керна М	Двуокись углерода	12.83	11.10	10.45
Образец керна N	Водород	20.8	14.76	14.68
Образец керна N	Азот	18.75	17.76	14.68
Образец керна O	Водород	44.70	35.50	36.20
Образец керна O	Азот	41.65	35.50	36.20
Образец керна P	Азот	68.9	60.2	61.2
Образец керна R	Азот	182.3	166.6	166.1
Образец керна S	Азот	223.0	204.3	190.7

<sup>a</sup> - кажущаяся проницаемость не была экстраполирована на  $\bar{p} \rightarrow \infty$ , т.к. были произведены замеры только при пониженных давлениях.  
<sup>b</sup> - проницаемость для жидкости не была определена.

До измерений, сосуд **d** заполняется хорошо деаэрированной жидкостью. Затем установка вакуумируется одновременно через трубку **i** (которая заменяется **h** в процессе измерений), трубки **b<sub>1</sub>** и **b<sub>2</sub>**, и вторую запасную колбу **e**. Когда воздух в образцах практически вытесняется паром жидкости, он поступает в **e**; жидкость поднимается через **c** и заполняет всю установку над ним, так что фильтры полностью насыщаются. Если деаэрация жидкости является неполной, она кипит двигаясь через **c**, в результате последние остатки газа в жидкости полностью удаляются и откачиваются через трубку **b<sub>1</sub>**. До начала измерений, запасная колба **e** заполняется таким образом, чтобы для измерения проницаемости был достигнут достаточный перепад уровня, что и было выполнено как описано выше.

При исследовании проницаемости органических жидкостей на стекланных фильтрах не было обна-

ружено никаких затруднений, ввиду того, что было предотвращено загрязнение свежедистиллированной жидкости частицами пыли или контактов с резиной и т.п. При измерении проницаемости воды, возникли затруднения, т.к. проницаемость уменьшилась даже при использовании свежедистиллированной воды. Это было обусловлено главным образом механическим засорением фильтров. Это стало ясно из экспериментов, при которых два G<sub>4</sub> фильтра были помещены друг за другом. При этих экспериментах, когда установка еще не была снабжена дополнительным фильтром **c** (см. рисунки 8 и 9), проницаемость первого фильтра снизилась гораздо больше, чем второго.

Так как загрязнения, вызывающие механическую закупорку не были летучими и не переносились во время дистилляции, предполагалось, что проблемы были вызваны микроорганизмами, развившимися в

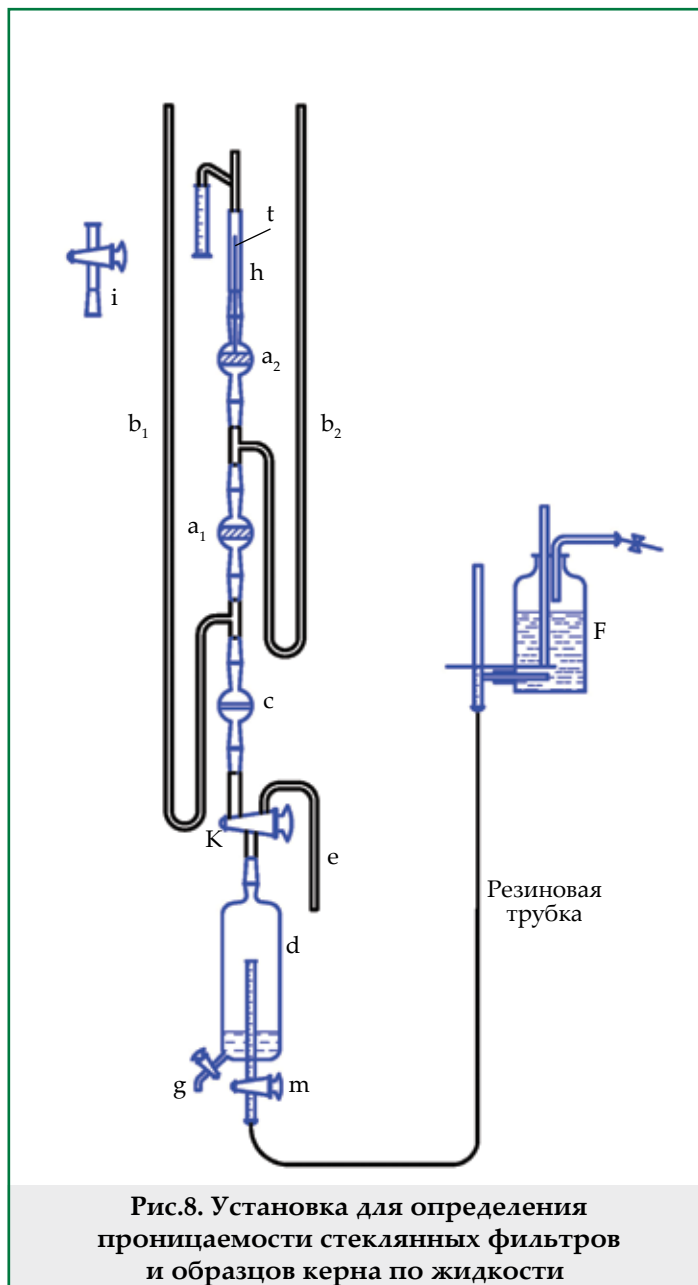


Рис.8. Установка для определения проницаемости стеклянных фильтров и образцов керна по жидкости

воде после дистилляции. Эти трудности могут быть частично устранены за счет стерилизации воды формалином или окисью серебра, и, наконец, полностью устранены за счет дополнительного фильтра с.

#### В. Определение проницаемости по газу при различных давлениях

Поскольку было бы желательно использовать для наших исследований как низкие, так и высокие давления, были собраны 2 установки – одна для измерений при давлении ниже, а другая - выше 1 атм.

Установка для определения проницаемости по газу при низких давлениях приведена на рисунке 10. Установка изготовлена из стекла во избежание возможных погрешностей в связи с возможным выделением газа из резиновых соединений.

Как и в установке для измерений проницаемости по жидкости, и здесь стеклянные фильтры с обеих сторон оборудованы стеклянными шлифами. Образцы керна закреплялись цементом Пебе (Pebe cement) между двумя полусферическими стеклянными чашками, каждая из которых снабжена стеклянными шлифами, как схематически показано на

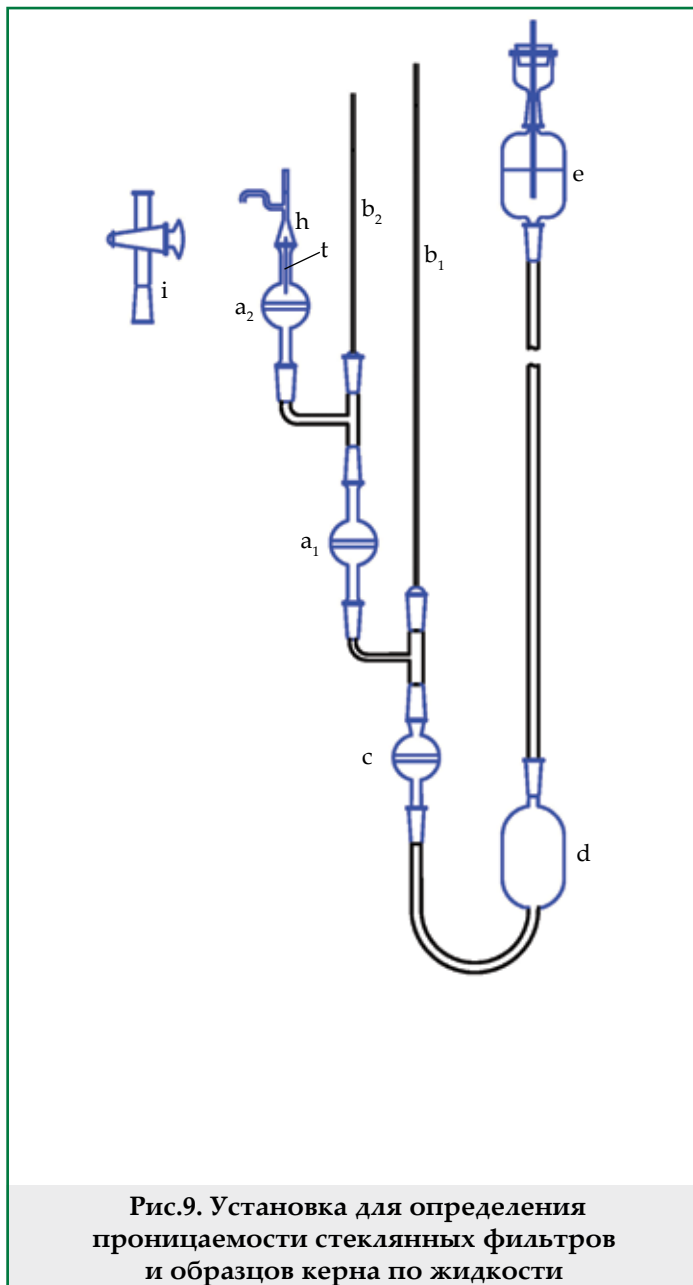


Рис.9. Установка для определения проницаемости стеклянных фильтров и образцов керна по жидкости

рисунке 10 (КМ). Таким образом, каждый исследуемый стеклянный фильтр или образец керна может монтироваться в установку при помощи стеклянных шлифов. Трубка В, которая имеет два прямоугольных изгиба, надевается на более тонкую трубку А, и это соединение уплотняется пиццином\*.

Давление до и после образца керна измеряется непосредственно с помощью открытых ртутных манометров  $M_1$  и  $M_2$ . Если перепад давлений незначителен, то его более точно можно измерить масляным манометром  $O_2$ , который может быть отключен (с помощью трехходовых кранов 4 и 5) при высоких перепадах давления.

Если давление составляет порядка нескольких см.рт.ст., давление после образца керна может быть измерено с помощью масляного манометра  $O_1$ , вторая часть которого связана с высоким вакуумом, создаваемым ртутным диффузионным насосом. Этот манометр работает практически как закрытый манометр. При необходимости, может быть сделана поправка на давление при «закрытых» концах, так как вакуум, создаваемый диффузионным насосом может

\* - (прим.перев.) – пиццин – классическая вакуумная замазка





Рис. 10. Установка для определения проницаемости при низких давлениях

быть измерен с помощью манометра Маклеода.

Газ прокачивается через установку при помощи ротационного вакуумного масляного насоса.

Поток газа поступает в установку через осушительную хлоркальциевую трубку. Как правило, это необходимо для обеспечения повторяемости результатов, поскольку большинство образцов керна более или менее гигроскопичны, и проницаемость может изменяться с увеличением влажности (набухания глинистых частиц).

Скорость потока газа и давления, преобладающие в установке, регулируются тремя съемными капиллярами  $c_1$ ,  $c_2$  и  $c_3$ . С помощью этих капилляров можно достичь желаемого распределения давления без нарушения вакуума в насосе, который служит одновременно в качестве пре-вакуума ртутного диффузионного насоса.

Для измерения скорости потока газа при установленном стационарном состоянии, градуированная пипетка **Р** соединяется с помощью трехходового крана **1** и воздух из пипетки всасывается в установку через трубку с хлористым кальцием. С помощью уравновешивающего сосуда и крана **13** уровень вне пипетки сохраняется на том же, что и внутри нее – вследствие этого всасываемый воздух поддерживает постоянное давление в 1 атм и стационарное состояние не нарушается. Замеряется время, необходимое для подачи в установку фиксированного объема газа. В виду того, что этот газ насыщен водяным паром, оставшимся в хлоркальциевой трубке, необходимо делать поправку на его объем.

Если измерения проводятся не с воздухом, а с водородом или двуокисью углерода, к установке подсоединяется (как показано на рисунке) баллон содержащий необходимый газ. Давление в 1 атм поддерживается постоянным с помощью маностата.

На рисунке 11 показана схема установки для опреде-

ления проницаемости по газу при давлениях выше 1 атм. Как и в установке для измерений проницаемости при низких давлениях и для жидкости (изооктана), образец устанавливается в установку с помощью одинаковых стеклянных полусфер, оборудованных стеклянными шлифами. Образец может монтироваться в любую из установок. Образец помещается в кернодержатель **К**, изготовленный из металла, таким образом, что давление внутри и вне стеклянной стенки одинаковое (если не учитывать небольшой градиент давления в образце), что не создает никакого риска поломки из-за высокого давления. До образца давление определяется высокоточным манометром **M<sub>1</sub>** типа Бурдона (Bourdon), перепад давления в образце дифференциальным манометром **M<sub>2</sub>** с дибутилфталатом в качестве манометрической жидкости. Показания последнего манометра должны быть скорректированы с учетом удельного веса воздуха, при 20 атм, который уже не является незначительным по отношению к манометрической жидкости. Поток газа замеряется путем пропуска его вовнутрь градуированной пипетки **Р**, при этом уровень внутри и вне пипетки поддерживается одинаковым. Поток газа регулируется с помощью игольчатого клапана **4**. Давление до образца поддерживают постоянным с помощью электромагнитного маностата. Регулятор давления состоит из двух камер, соединенных между собой стеклянным капилляром простирающимся почти до низа нижней камеры, которая содержит ртуть. Верхняя камера заполняется воздухом, давление которого чуть ниже того давления, на которое рассчитана установка. Когда давление в аппарате увеличивается, ртуть в капиллярной трубке регулятора поднимается до электрического контакта с железным стрежнем, который проходит через изолированное отверстие в стенке капилляра до его середины. Затем реле закрывается и электрический ток протекает через обмотку электромагнитного клапана



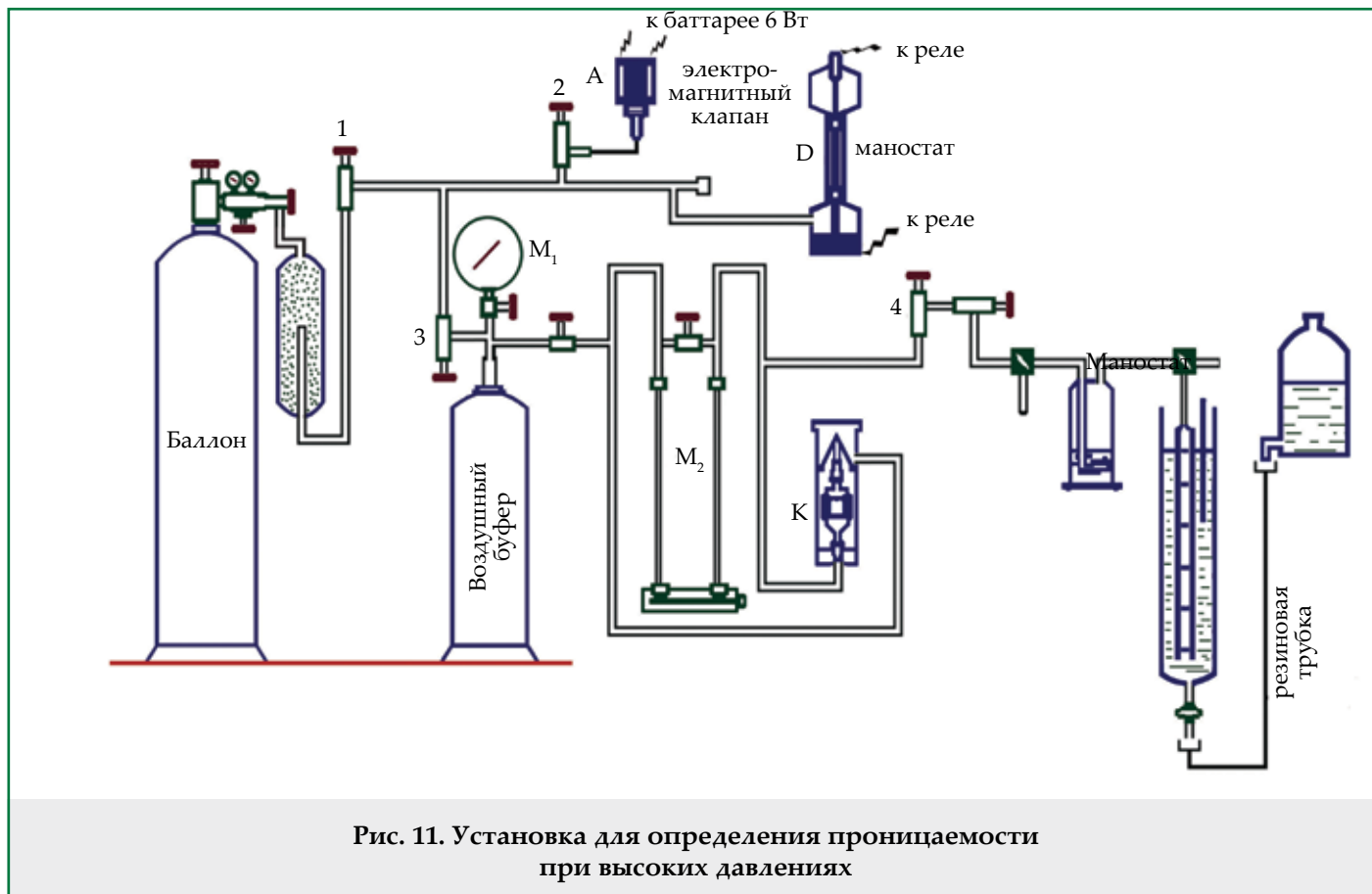


Рис. 11. Установка для определения проницаемости при высоких давлениях

А, который открывается и газ вытекает до тех пор, пока давление в установке падает до необходимого уровня, чтобы вновь прервать электрический контакт в регуляторе. Воздушный буфер служит для сглаживания возможных флуктуаций давления. При помощи игольчатых клапанов 1, 2 и 3 маностат может быть настроен таким образом, что флуктуации давления в манометре  $M_2$  составляют только несколько сотен сантиметров водного столба. Газ из баллона поступает в осушительный баллон Т, содержащий хлористый кальций.

Данная установка позволяет определять проницаемость при давлениях до 20 атм.

**Благодарности.** Работа, представленная в статье, была выполнена в течении 1938-1939 годов, сначала в лабораториях *Batavian Oil Company* (Амстердам, Нидерланды), а затем в *Shell Development Company* (Эмеривилль, Калифорния) в сотрудничестве с докторами В.Адриани (W.Adriani), Дж.Бейнтема (J.Beintema) и Дж. ван Хейнингеном (J. van Heiningen), которым автор глубоко признателен. К сожалению, данная статья была подготовлена без их ценных советов.

Автор глубоко признателен и выражает искреннюю благодарность доктору М.Д.Тейлору (M.D.Taylor) за ценные обсуждения и помощь при подготовке данной статьи.

Перевод с английского: д.т.н. Б.А.Сулейманов

### Литература

1. API Code No. 27: "Standard Procedure for Determining Permeability of Porous Media," 1st edn., Oct. -1935.
2. See for instance: M.Muskat. The Flow of Homogeneous Fluids through Porous Media. New-York: McGraw-Hill Book Co., 1937.
3. Loc. cit., 71 and 91.
4. Loc. cit., 93.
5. Loc. cit., 103.
6. G.H.Fancher, J.A.Lewis, K.B.Barnes //Pennsylvania State College Mineral Industries Expo-riuent Station. -1933. -Bull.No.12
7. Авторы, которые считают, что существуют адсорбированные слои в несколько молекулярных размеров:  
I.R.McHaffie, L.Lehner. The adsorption of water from the gas phase on plane surfaces of glass and platinum //Journal of the Chemical Society. -1925. -Vol.127. -P.1559  
I.Weber, G.Lervin. Ueber Wandschichtdicken //Kolloid Zeitschrift. -1930. -Vol.50. -P.197-199.  
W.B.Hardy. Studies in Adhesion. II //Proceedings of The Royal Society London [A]. -1928. -Vol.118. -P.209.

*D.P.Barnard, R.B.Wilson.* The Mechanism of lubrication - II. Methods of measuring the property of oiliness //Industrial & Engineering Chemistry. -1922. –Vol.14. –P.683

Авторы, которые не согласны с этой гипотезой:

*J.C.W.Frazer, W.A.Patrick, H.S.Smith.* The Thickness of adsorbed vapor films //The Journal of Physical Chemistry. -1927. –Vol.31. –P.897

*G.H.Latham.* The thickness of adsorbed vapor films //Journal of The American Chemical Society. -1928. –Vol.50. –P.2897.

*L.H.Bastow, F.P.Bowden.* On the contact of smooth surfaces //Proceedings of The Royal Society London [A]. -1932. –Vol.139. –P.404

*R.Bulkley.* Viscous flow and surface films //Bureau of Standards Journal of Research . -1931. –Vol.6. –P.89.

8. *E.Manegold.* Die Durchlässigkeit kanal-, gerüst- und netzartiger kapillarsysteme für flüssigkeiten und gase (theoretischer teil.) //Kolloid Zeitschrift. -1937. –Vol.81. –P.167

9. *A.Kundt, E.Warburg.* Ueber reibung und waermeleitung verduennter gase //Poggendorfs Annalen der Physik. -1875. –Vol.155. –P.337, 525.

10. *E.Warburg.* Ueber die gleitung der gase an glaswanden //Poggendorfs Annalen der Physik. -1876. –Vol.159. –P.399.

11. *M.Knudsen.* Die Gesetze der Molekularströmung und der inneren Reibungsströmung der Gase durch Röhren //Annalen der Physik. -1909. –Vol.333. –P.75-130

12. *G.Jager* //Wien. Ber. 108, Abt. III, 452 (1899).

13. *J.H.Jeans.* The persistence of molecular velocities in the kinetic theory of gases //Philosophical Magazine Series 6. -1904. -Vol.8. –P.700-703

### Обсуждение

**Morrис Mackem (Gulf Research и Development Company, Питтсбург, Пенсильвания):** статья доктора Клинкенберга до того тщательно написана и дает столь полный отчет об экспериментальных результатах и дискуссиях по затрагиваемому вопросу, что остается очень малый простор для дополнительных комментариев.

Как отмечает др. Клинкенберг, теория проскальзывания газов при течении в капиллярах существовала еще 65 лет тому назад. Тем не менее, те из нас, кто занимается измерением проницаемости последние 10 лет, должны ответственно признать, что упустили из виду основные приложения этой теории к потоку газов через пористую среду. Всеми экспериментаторами, несомненно, наблюдались редкие расхождения между измерениями проницаемости для газов и жидкостей, которые объяснились погрешностями эксперимента. На долю Клинкенберга выпало доказать, что это есть выражение реального физического явления и кроме того, раскрыть влияние количественных характеристик таким образом, чтобы их можно было контролировать и интерпретировать.

Пожалуй, единственное оправдание прошлым неудачам, связанным с не учетом эффекта проскальзывания, является то, что, если принять средний свободный пробег, определенный с помощью других методов, и эффективный радиус пор в качестве общепринятой характеристики песчаного пласта и ввести их в теоретические формулы для течения с учетом проскальзывания, то поправка априори прогнозируется слишком малой, чтобы играть какую-то роль в измерениях. Конечно, основная причина очень высокого проскальзывания в огромной площади поверхности пластовых песчаников по сравнению с капиллярной трубкой. В любом случае, хотя эти причины и оправдывают неудачи предыдущих экспериментаторов в нахожде-

нии объяснения расхождениям в проницаемостях по газу и жидкости, вместе с тем похвально упорство и смелость др. Клинкенберга с его явно чрезмерно оптимистичной рабочей гипотезой, которая в конечном итоге оказалась важной и обоснованной.

Важность и ценность работы Клинкенберга состоит в том, что она показывает как экстраполяция проницаемости по воздуху при низких давлениях на среднее давление, стремящаяся к бесконечности дает проницаемость идентичную проницаемости для жидкостей. Отсюда, существующий метод измерения проницаемости для газов должен быть изменен, при этом достаточно, чтобы замеры были произведены для нескольких значений среднего давления, а результаты экстраполировались для средних давлений, стремящихся к бесконечности. Таким образом, сохраняются все преимущества присущие измерениям с газами, и не потребуются возврата к прямым измерениям с жидкостью со всеми их недостатками и сложностями.

Несмотря на то, что рецензент был среди тех, кто настойчиво выступал против выражения проницаемости через эффективный радиус пор с точки зрения применения в нефтяной промышленности. Следует признать, что в других производственных задачах определение эффективного размера пор имеет большое значение само по себе. В связи с этим, было бы интересно сравнить эффективные радиусы, соответствующие проницаемости по жидкости и вовлеченные в эффект проскальзывания, что характеризуется постоянной  $b$ . Простая проверка показывает, что величина  $b^2K$  вовсе не постоянна, как и должно быть, если вышеуказанные эффективные радиусы пор одинаковы и распределение пор по размерам не имеет значения. Тем не менее, более детальное изучение  $b$  и его вариаций может пролить свет на геометрию пористых материалов, которую трудно определить другими способами.

**М.К.Левретт (M.C.Leverett) (Humble Oil and Refining Company Хьюстон,Техас):** Эта статья является исключительной презентацией очевидной кропотливой экспериментальной работы, показывающей, что при точном измерении проницаемости по газу следует учитывать эффект проскальзывания. Эта статья имеет очень важное значение, поскольку в ней это явления рассматривается впервые.

Особое внимание должно быть уделено замечаниям автора о том, что поправки на проскальзывание при измерениях проницаемости по газам «во многих случаях, - по крайней мере, для умеренно высокопроницаемых сред, - не имеют первостепенного значения для практики». Эти поправки необходимо учитывать в лабораторных исследованиях поведения флюидов в песчаных пористых средах. Несмотря на это, во многих фундаментальных исследованиях подобного типа, используемые песчаные пористые среды обладают довольно высокой проницаемостью и поэтому поправки на проскальзывание незначительны.

**В.С.Уоллс (W.S.Walls) (Phillips Petroleum Company, Бартлесвилль, Оклахома):** превосходная статья г-на Клинкаберга представляет интерес для общего понимания и уточнения основ течения жидкостей и газов в пористых средах. Его можно поздравить с тщательным исследованием этой проблемы. Расхождения между проницаемостью для воздуха, воды и других жидкостей были обнаружены во многих лабораториях по исследованию кернов, однако, величина этих расхождений, обнаруженных в обычных условиях тестирования не настолько велика, чтобы серьезно повлиять на практическое применение данных по проницаемости для заканчивания скважин или исследования пластов.

Влияние размеров капилляров и давления на поток газов были обсуждены в связи с кинетической теорией газов и жидкостей в работах по физической химии, таких как обсуждение Герцфельда (Herzfeld) и Смалвудом (Smallwood) в Трактате по физической химии (Treatise on Physical Chemistry) под редакцией Тейлора (Taylor) опубликованной D. Van Nostrand Company, Inc (Нью-Йорк), но г-н Клинкаберг прояснил вопрос по получению экспериментальных данных для реальных образцов керна.

Хотя течение газа при низких давлениях можно считать ламинарным или вязким, имеются некоторые отличия от обычного ламинарного течения. При низких давлениях средний свободный пробег молекул газа становится большим, чем размер пор, и происходит эффект проскальзывания. При этом в некоторых отношениях обычное ламинарное или вязкое течение меняется при проявлении проскальзывания. Попытки измерения вязкости газов в условиях, когда происходит проскальзывание, дают значения, зависящие от размера капилляров и давления. Вязкость, измеряемая, при таких условиях обычно называется кажущейся вязкостью, поскольку она не является истинной вязкостью газа, так как она уменьшается с уменьшением давления и зависит от радиуса капилляра. В таких условиях вполне логично ожидать, что уравнения Пуазейля и Дарси не будут строго соблюдаться. При высоких давлениях средний свободный пробег молекул газа становится малым по сравнению с размером пор и проскальзывание не происходит. Это условие

обычного вязкого течения, при этом уравнение Дарси соблюдается.

При обычной процедуре тестирования кернов на проницаемость отклонение из-за проскальзывания обычно мало, когда используется воздух, потому что для образцов, имеющих высокую проницаемость используется среднее давление приблизительно в 1 атм, а для образцов имеющих низкую проницаемость 1.5 - 3 атм. Когда соклет экстрактор используется для извлечения нефти из образца керна, очевидно, что не удастся полностью удалить остатки нефти из образцов, имеющих низкую проницаемость, что частично компенсирует расхождение в проницаемости по воздуху. Скорость и простота определения проницаемости по воздуху говорят в пользу его использования при обычном анализе кернов.

Статья г-на Клинкаберга очень полезна с точки зрения понимания фундаментальных концепций течения флюидов, но не окажет серьезного влияния на существующие методы анализа керна.

**Джордж Х. Фэнчер (George H. Fancher) (Техасский Университет, Остин, Техас):** Статья г-на Клинкаберга - ценный вклад в понимание того, чем является самое важное и единственное физическое свойство нефтяных и газовых пластов - проницаемость. Несмотря на значительное количество исследований, которые были проведены в этой области в течение прошлого десятилетия и внушительного множества накопленных данных и информации по измерению проницаемости, и также тот факт, что эффект Клинкаберга был известен давно, представленная работа нова, своевременна, и важна, особенно с теоретической точки зрения. Было доказано, что, когда проницаемость пористой среды измеряется по газу, для определения истинной проницаемости нужно сделать поправку на то что тестируемый флюид - газ, а не жидкость. Нигде в литературе нет более убедительного доказательства факта, что проницаемость является неотъемлемым свойством среды, когда жидкость используется для определения проницаемости. Теория течения газа подтверждена убедительными данными, хотя остается возможность для дальнейшей работы и уточнения теории. Полные данные испытаний были бы полезны для всех исследователей, работающих в данной области, чтобы ускорить прогресс, и надеюсь, что г-н Клинкаберг сочтет возможным снабдить этими данными.

Интересно напомнить в свете этой новой информации, что при сравнении проницаемости песчаника по газу и жидкости, некоторые исследователи сообщили о лучшем совпадении, когда использовалось Уэймутское (Weymouth) среднее, а не среднеарифметическое давление, требуемое теорией\*. Уэймутское среднее, всегда заметно превышает среднеарифметическое давление, при этом вопрос подробно исследован, для экспериментов в низкопроницаемых образцах при перепадах давления 100 - 150 psi. Конечно, никакого физического или теоретического обоснования, в рамках рассматриваемой работы, Уэймутского среднего не имеет и если следовать методу Клинкаберга нет необходимости в

\* Прим. переводчика - Уэймутское среднее давление определяется по формуле:

$$P_{avg} = \frac{2(P_1^3 - P_2^3)}{3(P_1^2 - P_2^2)}$$

его использовании.

С практической точки зрения, с удовлетворительной точностью проницаемость высокопроницаемого песчаника (скажем 25 мД), может быть оценена обычным способом, с использованием воздуха в качестве рабочего флюида. Учитывая тот факт, что нас обычно коммерчески интересует проницаемость выше, чем 25 мД и что образец керн не может характеризовать пласт в целом, очевидно, что выводы г-на Клинкенберга относятся в основном к низкопроницаемым образцам и в большинстве случаев при использовании обычных методов определения проницаемости никаких серьезных погрешностей не произойдет.

**М.Д.Тейлор (M.D.Taylor) (Shell Development Company, Эмеривилль, Калифорния)\*:**

Благоприятный тон обзоров и комментариев, конечно, более приятен. Однако, я хотел бы согласиться с комментариями рецензентов о том, что эффект проскальзывания обычно слишком мал, чтобы иметь практическое значение для промысловых расчетов, и другие эффекты, связанные с отбором образцов керн, их подготовкой к измерениям могут нести более серьезные

\* Подготовлено М.Д.Тейлором в период прохождения армейской службы

ошибки, чем пренебрежение эффектом, обсужденным в этой статье. Выбор предельной проницаемости, выше которой эффектом проскальзывания можно пренебречь для практических расчетов, например 25 мД, как предложено г-ном Фэнчером, не вполне обоснованно. Так, данные о проницаемости образцов керн по воздуху и азоту, представленные в таблице 9, показывают, что пренебрежение эффектом проскальзывания для образцов керн проницаемостью 10 мД вызовет, в среднем, ошибку приблизительно в 25% (на основании значения, измеренного при атмосферном давлении); 25 мД в 17%; 50 мД приблизительно 13%; 100 мД приблизительно 11% и 1Д приблизительно 5%. Как видно из таблицы, с увеличением проницаемости, средняя ошибка, вызванная, не учетом проскальзывания снижается постепенно, и нет предельной проницаемости, после которой погрешность быстро снижается.

Использование изменений, наблюдаемых в значении  $b$ , чтобы получить информацию о геометрии пористого материала, как предложено г-ном Маскетом, было предметом множества исследований, однако определенных выводов не было сделано. При это, наиболее значимыми факторами являются:

- 1 - радиусы капилляров в суженных участках;
- 2 - скорость, с которой эти радиусы увеличиваются;
- 3 - длина суженных участков;
- 4 - распределение пор по размерам в образце.

## The permeability of porous media to liquids and gases

**L.J.Klinkenberg**  
(Shell Development Co.)

### Abstract

The standard procedure for determining the permeability of porous media according to APZ Code No. 27 (first edition, October 1935) is based on the fundamental assumption that, as long as the rate of flow is proportional to the pressure gradient, the permeability constant of a porous medium is a property of the medium, and is independent of the fluid used in its determination. Although this is true for most liquids, the permeability constant as determined with gases is dependent upon the nature of the gas, and is approximately a linear function of the reciprocal mean pressure. This effect can be explained by taking into account the phenomena of slip, which are related closely to the mean free paths of the gas molecules. The apparent permeability extrapolated to infinite pressure gives a permeability constant which is a characteristic of the porous medium only.

## Məsaməli mühitlərin maye və qaz keçiriciliyi

**L.J.Klinkenberg**  
(Shell Development Co.)

### Xülasə

Məsaməli mühitlərin keçiriciliyinin təyin edilməsi üçün standart prosedur API Code No.27 (ilk buraxılış oktyabr 1935) aşağıdakı fundamental fərziyyəyə əsaslanır ki. Nə qədər ki axının sürəti təzyiqlə qradientinə proporsionaldır, məsaməli mühitin keçiriciliyi mühitin xassəsidir və müəyyən olunmaq üçün istifadə edilən flüiddin təbiətindən asılı deyil.

Bunun əksər mayelər üçün doğru olmasına baxmayaraq, müəyyən edilmişdir ki, qazlar üçün keçiricilik qazın təbiətindən asılıdır və bu təxmini orta təzyiqlin əks qiymətinin xətti funksiyasıdır. Bu effekt sürüşmə effektini nəzərə almaqla izah edilə bilər ki, bu da molekulların orta sərbəst hərəkəti ilə sıx bağlıdır. Sonsuzluğa yönəlmiş təzyiqlə ekstrapolyasiya olunan zahiri keçiricilik, yalnız məsaməli mühitin xassəsi olan keçiriciliyi verir.