

О Г Р А Д А Н И Я

В. С. ... 1946

... 1946

... 1946

... 1946

... 1946

... 1946

... 1946

**ПРОВЕРКА ЗАКОНА ДАРСИ В ОБЛАСТИ НЕВЫСОКИХ
СКОРОСТЕЙ ФИЛЬТРАЦИИ**

... 1946

... 1946

- | | |
|---|------|
| 1. КЭЛЬХАУН Д.С. и ЮСТЕР С.Т. — Течение однородных жидкостей через идеальную пористую среду, 1946 | 1 |
| 2. ЮСТЕР С.Т. — Определение проницаемости на однородной жидкости, 1946. | 37 |
| 3. РАЙДЕР Х.М. — О форме пор песчаников, 1948. | 52 |
| 4. РАЙДЕР Х.М. — Об абсолютной, эффективной и кажущейся проницаемости, 1948 | 58 |
| 5. РОЗЕ У.Д. — Проницаемость и скольжение газа, 1949 | 70 |
| 6. ХЭЙД Дж. Дж., Мак МАХОН, Р. НИЛЬСЕН и С. ЮСТЕР — Изучение проницаемости пород при фильтрации однородных жидкостей, 1950 | 85 |
| 7. ОЛЕ Э.Л. — Влияние проницаемости на распределение рудных тел в известняках и доломитах, 1951 | 106 |
| 8. КОЛЛИНС Р.И. и КРОУФОРД П. — О введении поправки Клинкенберга в уравнения нестационарного движения газа в пористой среде, 1953 | 129 |
| 9. ИСТЕС Р.К. и П.Ф. ФУЛЬТОН — Скольжение газа и измерение проницаемости, 1956. | 134. |

КАЛЬХАУН Дж.С. и ЮСТЕР С.Т.

ТЕЧЕНИЕ ОДНОРОДНЫХ ЖИДКОСТЕЙ ЧЕРЕЗ ИДЕАЛЬНУЮ ПОРИСТУЮ
СРЕДУ

CALHOUN J.C. and S.T.YUSTER

A STUDY OF THE FLOW OF HOMOGENEOUS FLUIDS THROUGH IDEAL
POROUS MEDIA.

Drilling and Production Practice
1946, p.335-355, 10 ref, 25 fig.

Перевод № 65, карт. 778

Цель работы

Целью работы являлась детальная проверка исследований Клинкенберга и некоторых других автором путем:

1. Исследования фильтрации газов при различных средних давлениях, градиентах давления и температурах.

2. Исследования фильтрации чистых жидкостей при изменении общего давления, различных градиентах давления и температурах.

3. Установления корреляции между фильтрацией газа и течением жидкости.

4. Исследования течения растворов с различными свойствами: сорбируемостью, поверхностной энергией и т.п., обнаруживавших те или иные аномалии в опытах фильтрации выполненных другими исследователями.

5. Установления корреляции между фильтрацией этих растворов и чистых жидкостей.

Исследование среды

Исследования были выполнены на искусственных пористых средах:

1/Стеклянных пористых фильтрах из пирекса фирмы *Corning Glass Works*, ϕ 30 мм и $h = 4$ мм. Фильтры были впаяны в трубки из пирекса с отводами.

2/Кварцевых фильтрах приготовленных следующим путем. Кварцевые трубки дробили и дезинтегрировали в ступке. Порошок обрабатывали HCl , пропитывали водой, сушили и рассеивали на стандартных ситах. Были приготовлены фракции 40-60; 60-100; 100-170 и 170-200 меш. Для получения фильтров брали 15-20г. фракции и 10% количество по весу 3% раствора декстрина. Смесь

прессовали под давлением 200 кгс/см^2 в цилиндре с плотно пригнанным поршнем.

Спрессованный диск вынимали, высушивали, очищали, подвергали обжигу в течение 15-20 минут при температуре $1600-1650^\circ\text{C}$ выдержанный в течение 8-10 мин и медленно охлаждали.

Измеряли воздухопроницаемость дисков, их размеры, затем вплавляли их в трубки из пирекса и оттягивали концы последние что обеспечивает удобное присоединение к аппаратуре.

Исследования были выполнены с помощью специально разработанной аппаратуры.

А П П А Р А Т У Р А

1. Аппарат для измерения жидкостепроницаемости. Схема аппарата показана на рис. 1, она в общем воспроизводит схему вискозиметра Хэйдуиллера для летучих жидкостей. Достоинством аппарата является: 1/ незначительное количество жидкости необходимой для выполнения определения, 2/ возможность изменения направления движения жидкости, 3/ возможность использования летучих жидкостей, 4/ возможность выполнения измерений при различных давлениях, 5/ быстрота определения.

Стеклоанное кольцо (1) с впаянным в него кварцевым фильтром спаивают между змеевиками. Этот узел помещают в водяную баню. Отводы соединяют образец с калиброванными стеклянными трубками манометра (2) длиной ~ 60 см и внутренним диаметром 0,952 см. В нижней части трубки имеют: 1/ боковые отводы L - присоединенные к обращенному U' образному манометру (3) с отводом в верхней части со шлифом (5); 2/ боковые отводы M расположенные ниже отводов L и соединенные трубкой с зажимом в байпасе; 3/ нижние отводы E , к которым гибкими трубками присоединены подвижные груши (4); ^{с ртутью} у этих отводов помещены зажимы.

Обращенный манометр (3) служит для заполнения системы жидкостью и измерения ^Н общего давления.

Шлиф (5) предназначен для присоединения воронки (6) с краном и отводом (8) к источнику вакуума. В воронку (6) вставлена воронка (7) со своим краном.

Заполнение системы

Опускают груши (4) так, чтобы уровень ртути снизился несколько ниже отводов L и изолируют аппарат зажимами. Эвакуи-

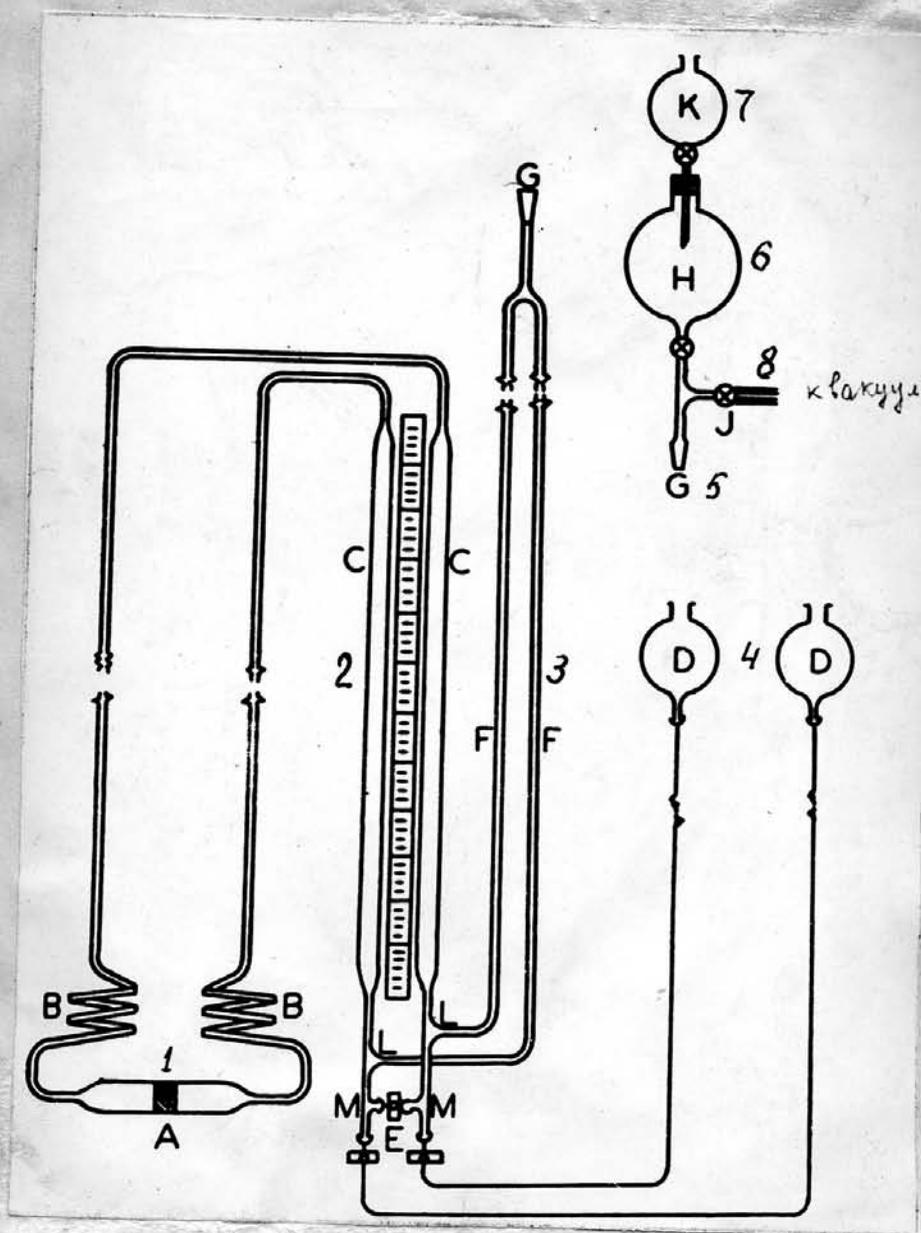


Рис. 1 Схема аппарата для измерения жидкостепроницаемости по изменению уровня раздела исследуемой и замыкающей жидкостей.

рукт аппарат через отвод (8). Заполняют воронку (7) деаэрированной жидкостью, затем переводят ее в воронку (6), где из нее выделяются дополнительное количество газа. Медленно открывают кран воронки (6) и перепускают в аппарат заданное количество жидкости, руководствуясь высотой заполнения колен (2). Сообщают *груши* (4) с аппаратом и вводят в манометрические трубки ртуть с таким расчетом, чтобы аппарат был полностью заполнен жидкостью, а ртуть заполняла колена манометров приблизительно на $1/2$ высоты; часть жидкости из колен манометра (3) будет вытеснена в воронку (6). /об"ем системы из (1) и отводов к манометрическим трубкам должен быть равен приблизительно об"ему одной трубки. Снимают *узел* воронок. Подготовка аппарата к измерению на этой стадии опыта закончена.

Измерение

Закрывают байпас, опускают одну из воронок и одновременно поднимают другую. В результате уровень в одном колене поднимается, а в другом опускается—при этом *возникает* фильтрация жидкости через образец. После достижения некоторой заданной разности уровней быстро поднимают обе воронки на одну и ту же высоту, что повышает давление в системе. Изолируют аппарат и приступают к наблюдениям за выравниванием уровней ртути в коленах, записывая изменение отсчетов во времени.

Об"ем описанный любым из менисков ртути в единицу времени есть расход жидкости, а разность уровней ртути—перепад давления.

По мере выравнивания уровней перепад давления снижается—расход, а следовательно и скорость выравнивания уровней уменьшается.

Скорость процесса выравнивания уровней зависит от проницаемости образца. Коэффициент проницаемости определяется из уравнения:

$$K = \frac{38La\eta}{A(1 - \frac{\rho_0}{\rho_{Hg}})} \cdot \frac{\rho_0}{\rho_a} \cdot \frac{\lg \frac{\Delta h_0}{\Delta h_t}}{t}$$

где:

Δh_0 - разность уровней в момент начала отсчета

Δh_t - " " " через " секунд

a - внутренний диаметр колен манометра /сечение /.

ρ_0, ρ_a - плотность жидкости при комнатной т-ре и т-ре термостатирования

ρ_{Hg} - плотность ртути

A, L - сечение и длина образца

2. Аппарат для относительного измерения проницаемости.

Аппарат в принципе совершенно подобен капиллярному вискозиметру *Оствальда* и отличается тем, что капилляр заменен расширением с впаивным в него образцом искусственной пористой среды. Общий вид четырех таких аппаратов показан на рис. 2. Детали устройства поясняет рис. 3.

Загрузку аппарата жидкостью производят, после тщательного эвакуирования аппарата, под вакуумом - из воронки с краном и фильтром присоединяемым на шлифе к правому колену.

Заполнение жидкостью продолжают до тех пор, пока образец не будет полностью насыщен над верхним торцом образца не скопится достаточное количество жидкости.

Измерения производят также как и при градуировке виско-

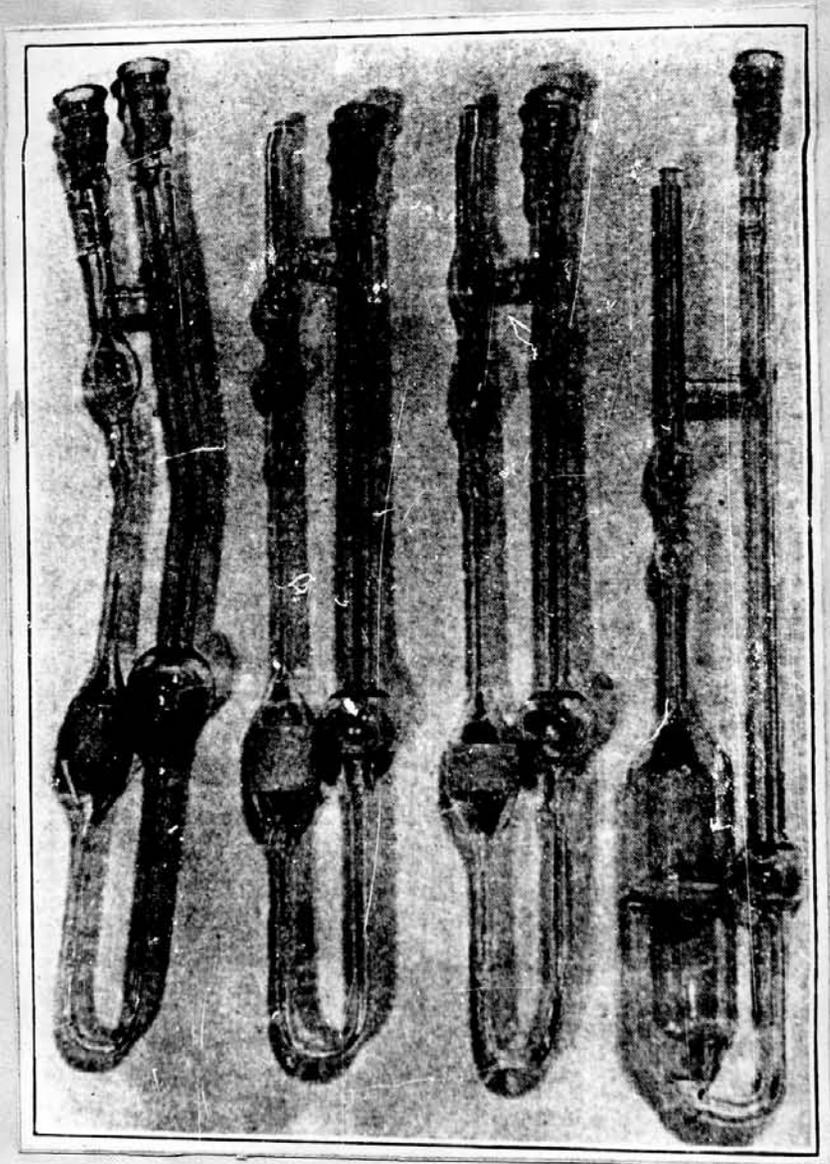


рис.2 Общий вид аппаратов для относительного измерения жидкостепроницаемости типа вискозиметра Оствальда.

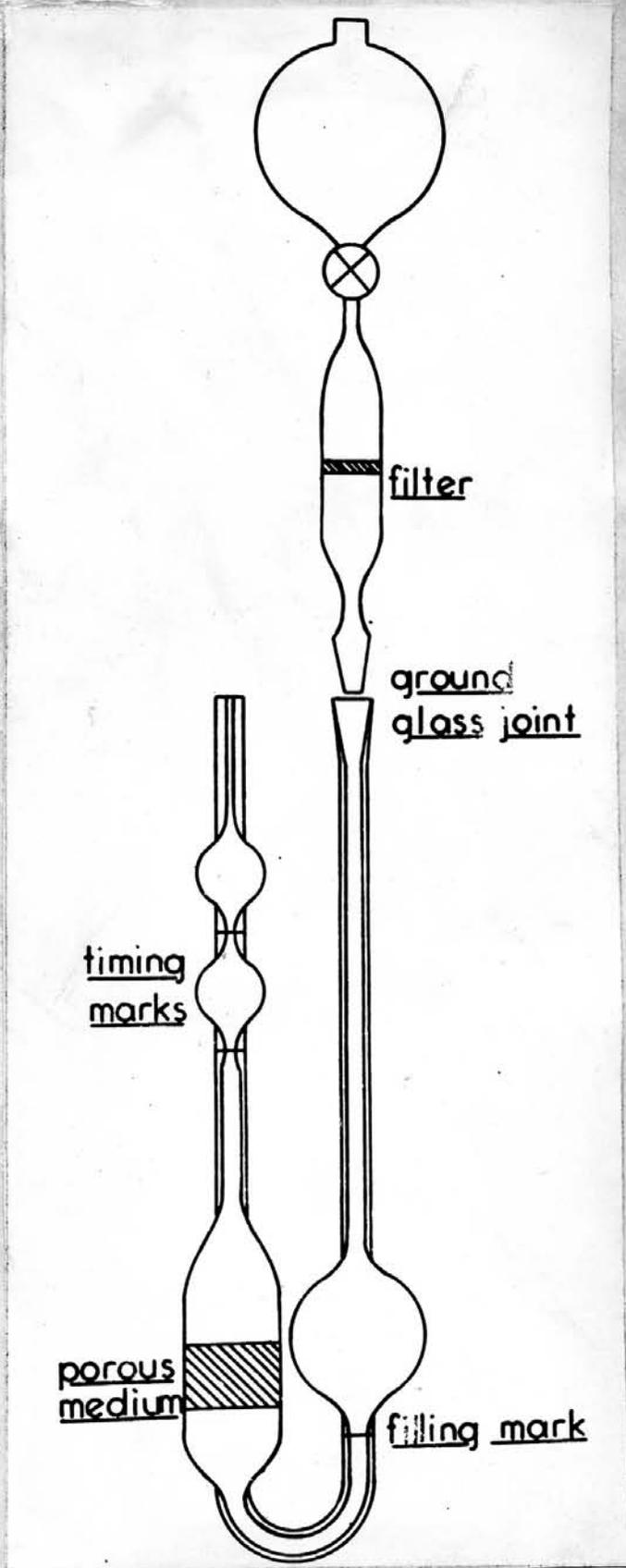


Рис. 3 Устройство аппаратов для относительного измерения жидкостепроницаемости типа вискозиметра Оствальда.

зиметра, то-есть когда известна вязкость и подлежит определению постоянная прибора.

Аппарат термостатируют и засасывают жидкость в левое колено. Затем снимают давление и измеряют продолжительность течения жидкости между моментом прохождения мениском отметок на левом мерном расширении.

Поскольку вязкость жидкости известна можно записать

$$\eta = k t = K T$$

где k, t - постоянная и время измерения вязкости

K, T - постоянная и время измерения проницаемости.

Тогда

$$K = k \frac{t}{T}$$

Если при измерении на двух жидкостях / T_1 и T_2 / величины K_1 и K_2 одинаковы, то можно заключить, что проницаемость определенная на этих двух жидкостях так-же одинакова. Аппарат был применен для целей выяснения влияния физико-химических свойств жидкости, помимо вязкостных, на величину коэффициента проницаемости определяемого из закона Дарси.

Следует заметить, что при таком способе исследования точность сопоставления повышается, поскольку отпадает необходимость выполнения каких бы то ни было замеров, кроме замера времени.

3. Аппарат постоянного объема для измерения газопроницаемости Схема аппарата показана на рис. 4. Он состоит из двух ~~стеклянных~~ стеклянных сосудов равного объема в соединенных друг с другом трубкой с впаиваемым в нее образцом искусственной пористой среды А и байпасом с зажимом Б. Разность давлений в сосудах, то-есть по обе стороны образца контролируется

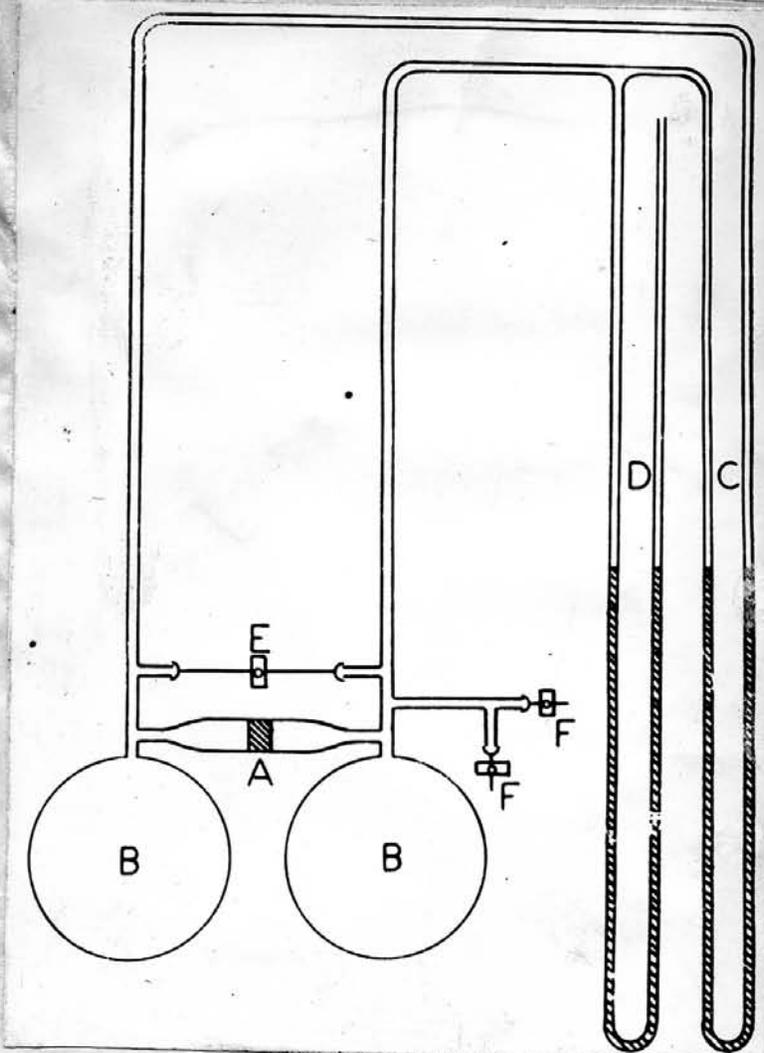


Рис.4 Схема аппарата постоянного объема для измерения газопроницаемости.

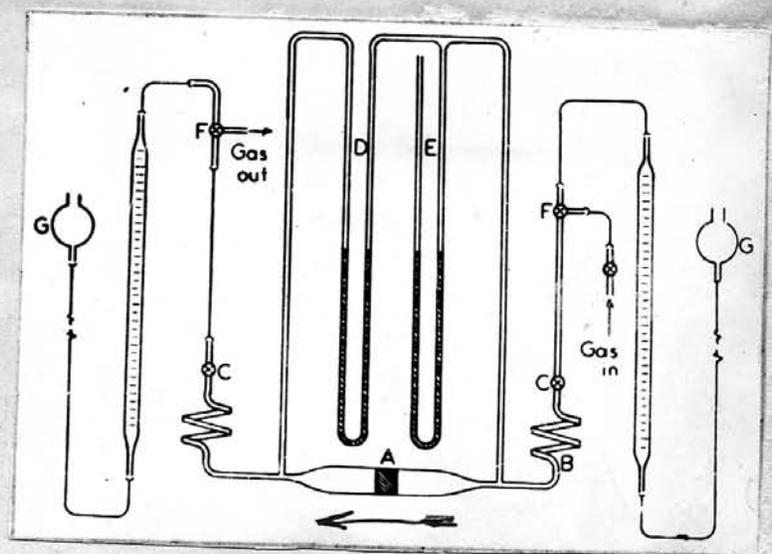


Рис.5 Схема аппарата для измерения газопроницаемости при стационарном режиме.

ртутным дифманометром С, давление в правом сосуде контролируется манометром Д. Правый сосуд имеет отводы для присоединения к источникам давления и вакуума. Сосуды термостатированы в водяной бане.

Для заполнения аппарата его эвакуируют и затем продувают выбранным для опытов газом, вновь эвакуируют и заполняют до заданного давления по манометру Д при открытом байпасе. Закрывают зажимы E . Изменяют давление в правом сосуде, например путем выпуска некоторого количества газа. Устанавливают заданный перепад давления по дифманометру С. Вследствие ~~из~~ создания начальной разности давлений в сосудах начинается процесс фильтрации, протекающий при постепенном снижении перепада давления вследствие выравнивания.

Наблюдения производят записывая показания дифманометра через заданные промежутки времени. После достижения некоторого минимума перепада прекращают наблюдения открывают байпас и записывают показания манометра установившееся после завершения процесса выравнивания давления и барометрическое давление

Если об'емы сосудов B равны, а об'ем манометрических трубок достаточно мал по сравнению с об'емом сосудов, то показания манометра D во время опыта почти не меняются, и измеряемое давление равно среднему избыточному давлению в системе.

Коэффициент проницаемости вычисляют по уравнению:

$$\lg(P_1 - P_2) + \lg C = \frac{2KA\bar{P}t}{\eta LV}$$

где: $/P_1 - P_2/$ - перепад давления в момент времени t

$P_a C (P_1 - P_2)$

C - постоянная

\bar{P} - среднее давление в системе

V - об"ем сосудов

A, L - сечение, длина образца

η - вязкость

При выводе сделаны следующие допущения:

1. Газ идеальный,
2. Об"ем манометрических трубок пренебрежимо мал,
3. Сосуды имеют равные об"емы

Аппарат позволяет изменять среднее давление в образце в области вакуума и при давлениях от атмосферного и несколько выше.

4. Аппарат для измерения газопроницаемости при стационарном режиме. Схема аппарат показана на рис.5 Трубка с образцом A и змеевиками C помещается в водяную баню. Давление на выходе и входе образца регулируется игольчатыми вентилями C . Разность давлений контролируется дифманометром D , давление до или после образца, в зависимости от направления течения - манометром E . Расход газа измеряют при комнатной температуре и атмосферном давлении бюреткой. Если среднее давление в образце выше атмосферного пользуются бюреткой на выходе образца; при этом газ поступает в бюретку через кран F , а в бюретке поддерживают с помощью уравнительной группы G , атмосферное давление.

Если среднее давление в образце ниже атмосферного, то включают бюретку на входе в образец. Перед началом опыта бюретку наполняют газом при атмосферном давлении, в дальнейшем

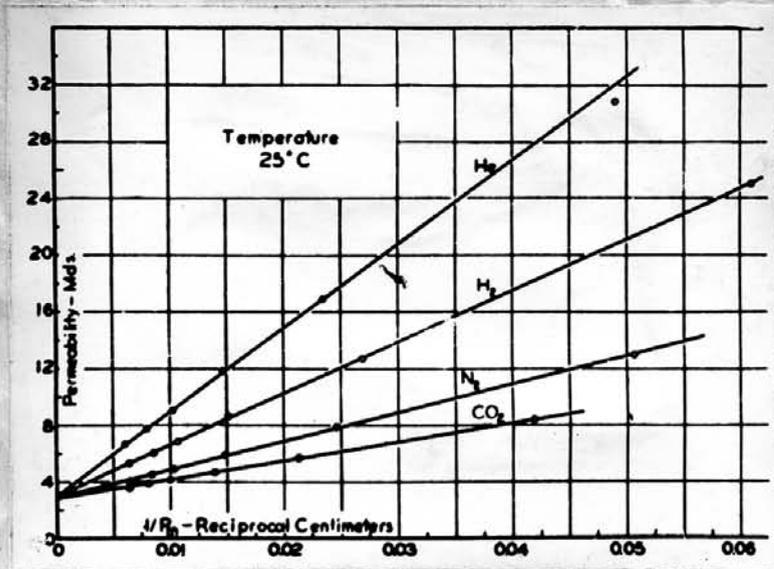


Рис.6 Проницаемость образца С-1 на гелии, водороде, азоте и углекислоты, 25°C.

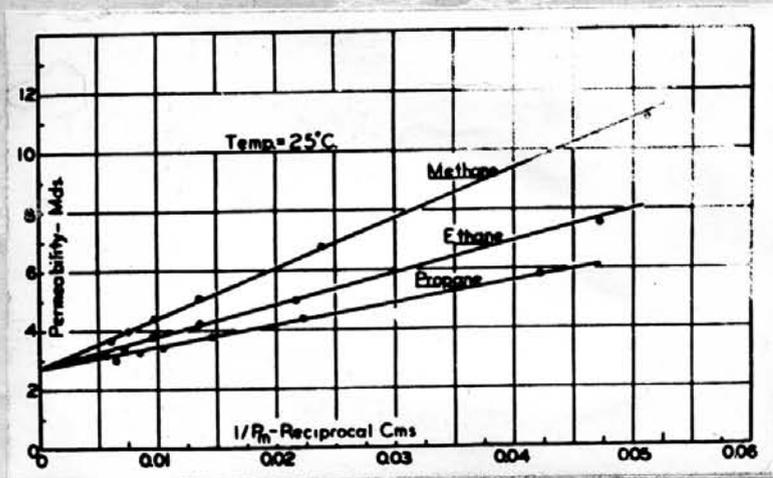


Рис.7 Проницаемость образца С-1 на метане, этане и пропане, 25°C.

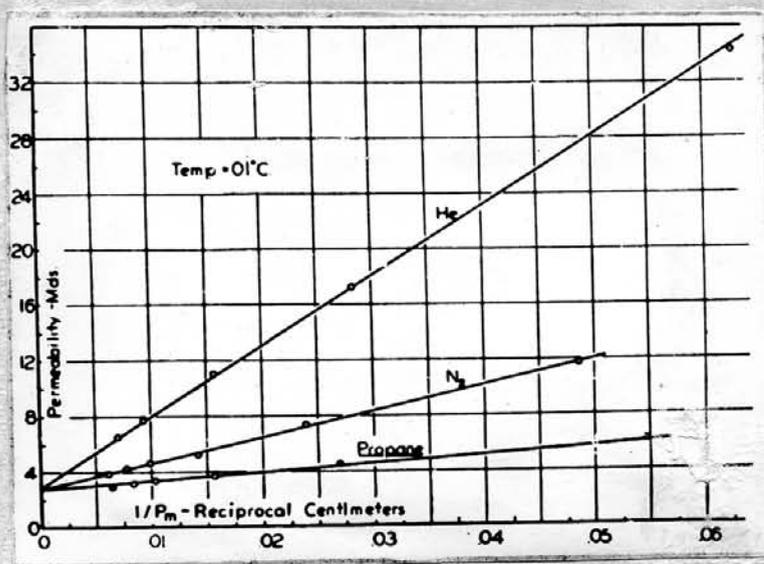


Рис.8 Проницаемость образца С-1 на гелии, азоте и пропане; 0,1°C.

поддерживаемом с помощью груши G .

Источник вакуума присоединяют к выходному крану, давление до и после образца регулируют вентилями С.

В качестве жидкости в бюретке *применяют* ртуть или дибутилфталат, как нелетучие жидкости, что имеет особое значение в случае включения бюретки на входе образца.

При включении бюретки на выходе можно использовать растворы NaCl.

В опытах были применены бюретки об"емом 25 и 100 мл.

Результаты опытов и их обсуждение

1. Полученные зависимости коэффициента газопроницаемости от $1/\bar{p}$, оказались линейными или близкими к линейным. При измерениях на различных газах или с данным газом при различной температуре зависимость $K=f(1/\bar{p})$ для данного образца при экстраполяции на $\bar{p} \rightarrow \infty$ давали одинаковое значение проницаемости, независимо от газа и т-ры. Это значение проницаемости рассматривалось как истинное и использовалась для корреляции с жидкостепроницаемостью.

Измерения выполненные на детально исследованном образце С-1 и образце С-3 дали прямолинейные зависимости $K=f(1/\bar{p})$ во всех случаях. При исследовании образца С-2 /того-же типа, что и С-1 и С-3/, но с более высокой проницаемостью/ получены искривленные зависимости. Образец Q-4 дал заметно искривленные зависимости, его проницаемость близка к проницаемости С-2, но последняя ниже, чем первая. Образцы Q-6 /37 мл/ и Q-3 /200 мл/ дали слегка искривленные зависимости.

Клинкенберг считал, что величина β для данного образ-

ца может изменяться с $1/\bar{P}$. Таким образом вероятнее получение искривленной зависимости, а не линейной. Это можно объяснить тем, что сечение капиллярных каналов в пористой среде не постоянно по длине. При этом условия уменьшение среднего давления приводит к переменной поправке на скольжение. Основным возражением против этого довода является то, что при низких давлениях изложенная концепция требует увеличения поправки, в то время как в действительности в этой области наблюдается уменьшение поправки - кривые $K - \frac{1}{\bar{P}}$ являются выпуклыми, а не вогнутыми. Полученные данные показывают, что постоянство " b " скорее присуще малопроницаемой среде, чем хорошо проницаемой. Этот вывод можно сделать и на основании данных Клинкенберга.

Уверенность в правильности концепции поправки на скольжение основывается на том, что величину газопроницаемости измерения на различных газах и при различных температурах будут одинаковыми, если одинакова длина свободного пробега молекул. Это устанавливается из результатов выполненных опытов. Так как длина свободного пробега молекул обратно пропорциональна давлению, то длина свободного пробега при данном давлении P равна длине свободного пробега при 1 ат. деленной на это давление. Поэтому условие равенства проницаемостей определенных на разных газах сводится к условию $\frac{C}{\bar{P}} = const$ /таблица 2/.

Если измерения выполнены при различных температурах, то равные проницаемости будут наблюдаемы при средних давлениях, находящихся в отношении обратном отношению температур. Это было установлено для гелия, азота и пропана в области $0,1 < t < 60^\circ C$ /таблица 3/.

Поправка на скольжение для данного газа будет тем больше,

чем ниже проницаемость как это следует из таблицы:

Образец	$K_1/K_\infty, \%$	$K_\infty, \text{мд}$
C_1-1	203	2,75
C_3	199	7,5
Q_2	125	
Q_6	126,2	37
Q_3	108,5	201

Интересно рассчитать средний радиус пор исследованных сред в данных о поправке на скольжение. Так для образца $Q-3$ исследованного на азоте при 25°C поправка на скольжение составляет 0,1185 при $\bar{P}=20\text{см}$ ртутного столба; ср. радиус пор определяется в 11,6 мк. Эта величина для образца с $K=200$ мд достаточно типична.

Можно ожидать, что значения среднего радиуса пор рассчитанного таким путем будут занижены из-за влияния пор наименьших размеров сильно завышающих поправку на скольжение.

Полученные результаты подтверждают положение о независимости величины проницаемости от перепада давления при измерениях в области вязкого течения. Это показывается очень отчетливо при измерениях в системе с постоянным объемом. Полученное уравнение основанное на законе Дарси приводит к пропорциональности между логарифмом перепада давления и временем. Типичные зависимости такого рода, полученные при шести значениях среднего давления, приведены на рис. 10 для азота и рис. 11 для пропана для широкой области числа Рейнольдса.

Дальнейшее подтверждение закона Дарси дается на рис. 16-18, на которых представлены зависимости $K - \frac{1}{\bar{P}}$ снятые при

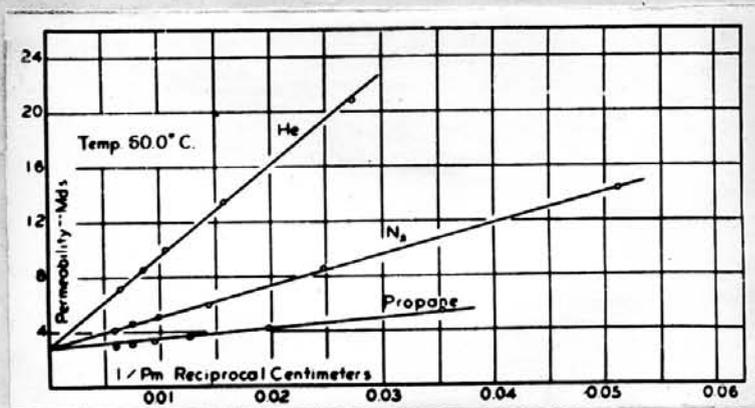


рис.9 Проницаемость образца С-1 на гелии, азоте и пропане; 50°С

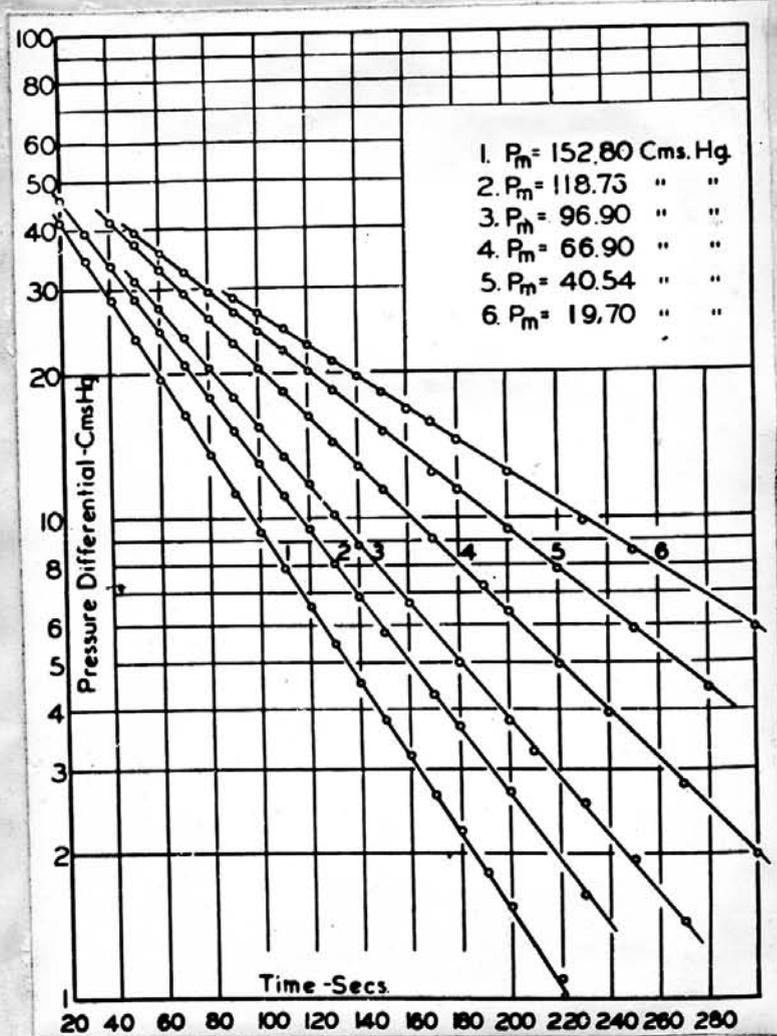


Рис.10 Образец С-1. Перепад давления в зависимости от времени при различных средних давлениях -результаты определения по схеме на рис.3. Азот.

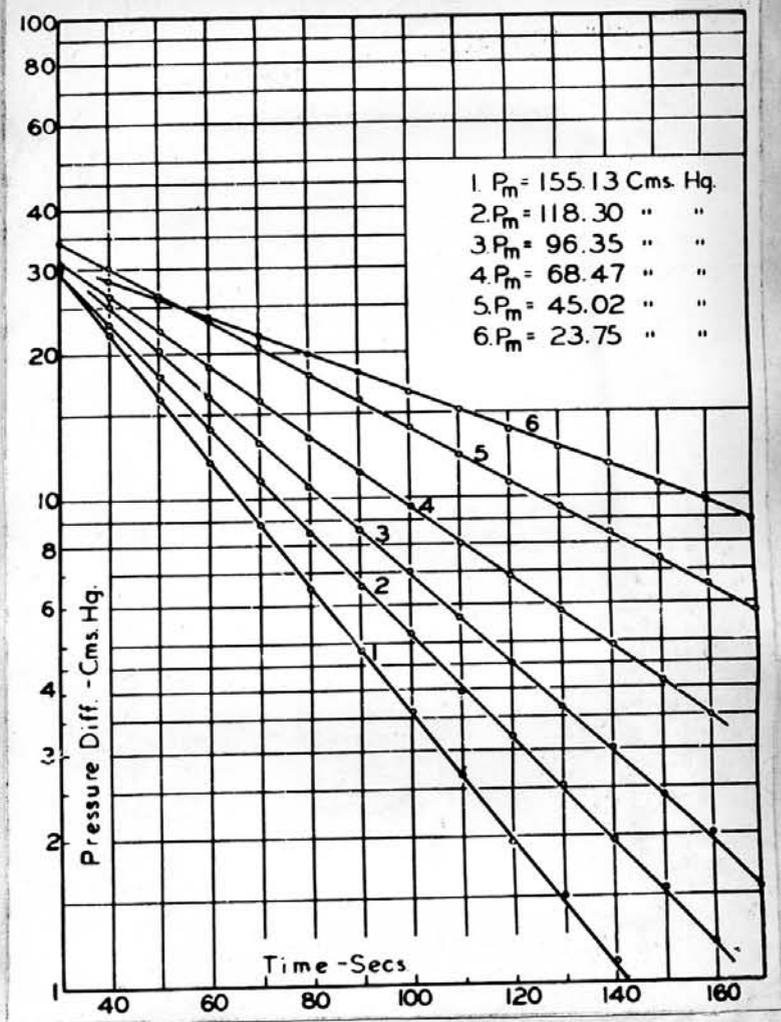


Рис. 11. Образец С-1. Перепад давления в зависимости от времени при различных средних давлениях результаты определения по схеме на рис. 3. Пропан.

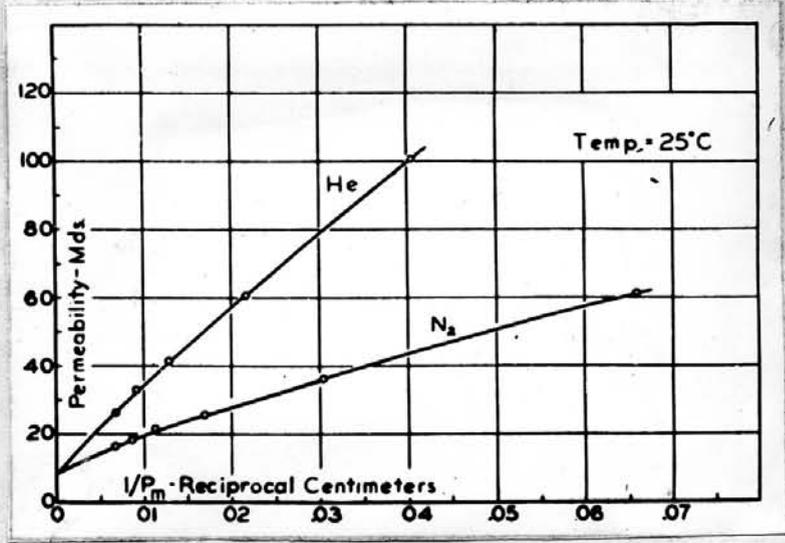


Рис. 12. Проницаемость образца С2 на гелии и азоте; 250°C.

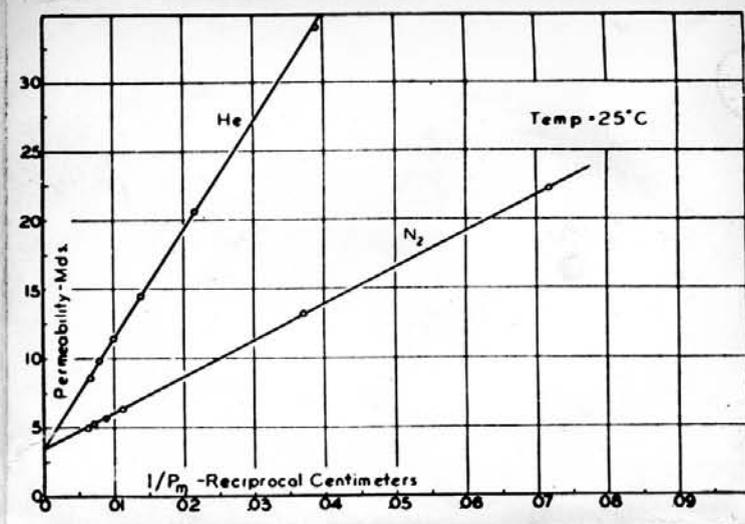


Рис. 13. Проницаемость образца Сз на гелии и азоте, 25°C

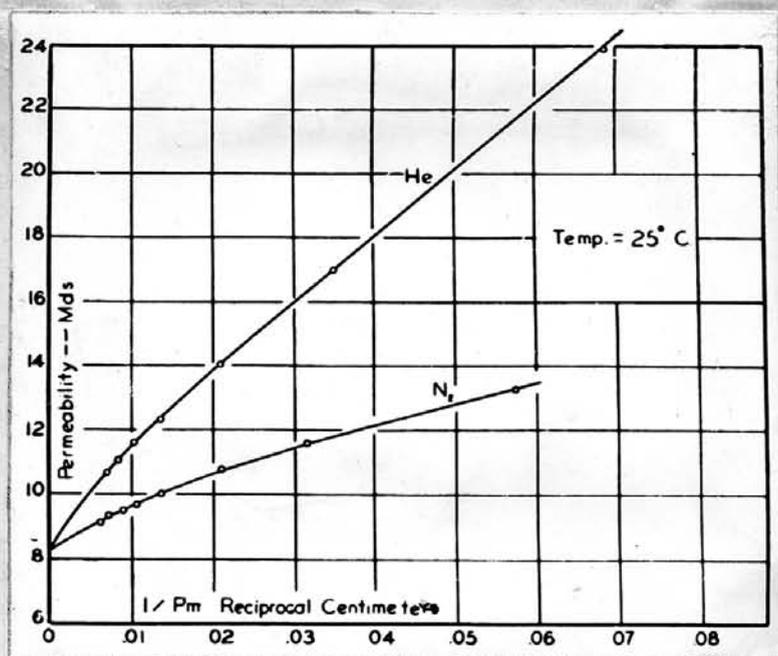


Рис. 14. Проницаемость образца 0-4 на гелии и азоте; 25°C

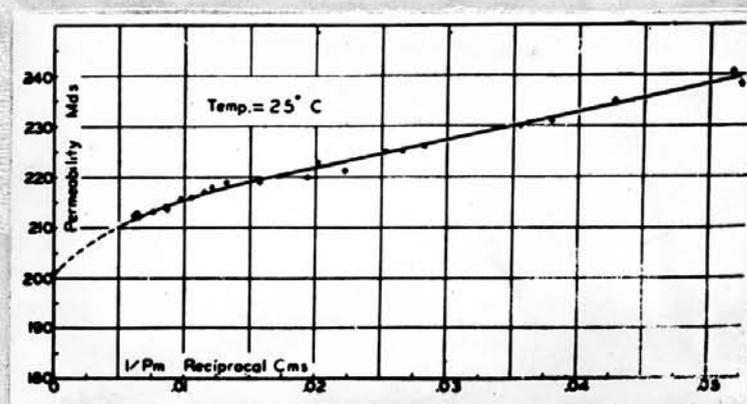


Рис. 15. Проницаемость образца 0-3 на азоте; 25°C

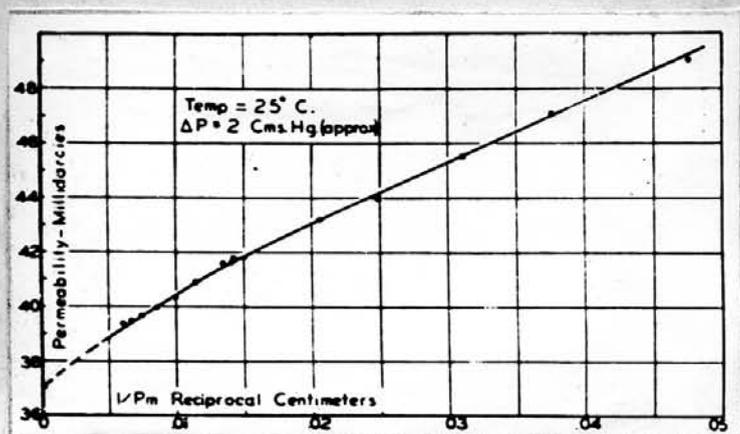


Рис.16. Проницаемость образца 0-6 на азоте; 25°C; перепад 2 см.ртутного столба

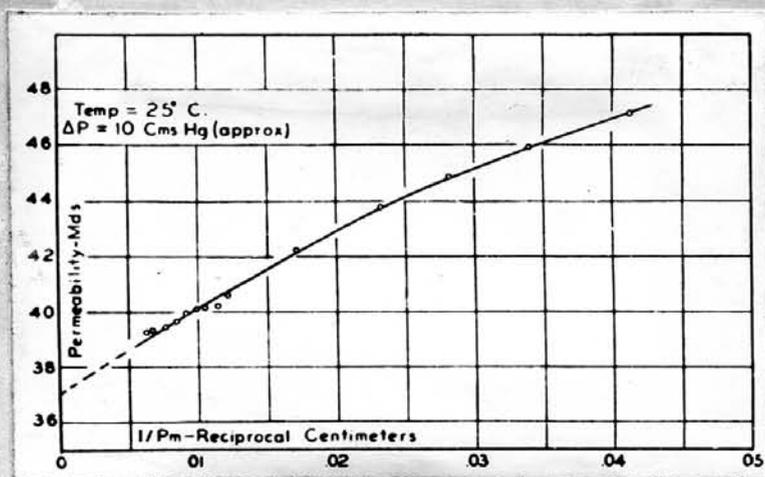


Рис.17. Проницаемость образца 0-6 на азоте; 25°C; перепад 10 см.ртутного столба

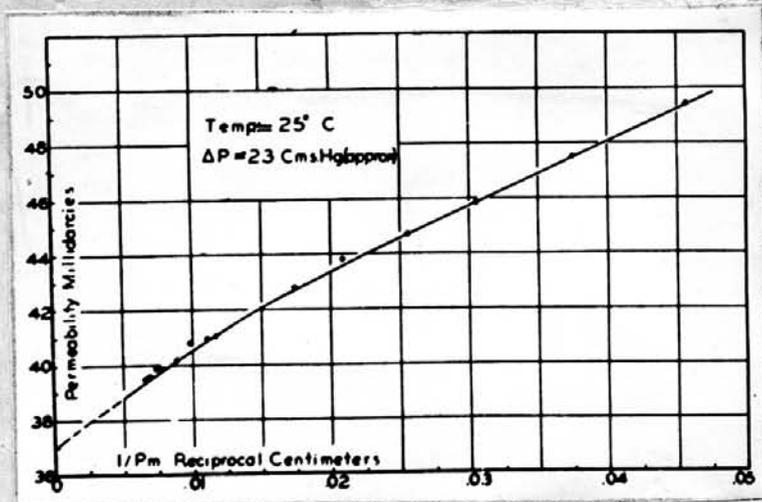


рис.18. Проницаемость образца 0-6 на азоте; 25°C; перепад 23 см.ртутного столба.

постоянном перепаде в 2, 10 и 23 см. ртутного столба - кривые при наложении совпадают с точностью до 1%.

Остается выяснить причины искривления зависимости $K - \frac{1}{\rho}$

Для этой цели были поставлены опыты изучения течения азота через прецизионные капилляры, радиус которых был измерен с высокой точностью путем заполнения ртутью и взвешивания. Капилляры монтировались в аппарате постоянного объема /рис. 4/. Результаты измерения расхода при различных средних давлениях обработаны по уравнению Пуайзеля и представлены на рис. 19 в виде зависимости вычисленного значения R^4 от $\frac{1}{\rho}$. На оси ординат показано и измеренное значение радиуса. Полученная зависимость оказалась криволинейной, подобно зависимости $K - \frac{1}{\rho}$. Затем длина капилляра была сокращена до $\frac{1}{3}$ и были выполнены три серии измерений при стационарном режиме. В каждой серии поддерживали постоянный перепад и изменяли среднее давление. Результаты опытов представлены на рис. 20. Лишь при наименьшем перепаде давления в 2 см. ртутного столба была получена линейная зависимость между R^4 и $\frac{1}{\rho}$, где R - вычисленная величина; экстраполированное значение R^4 оказалось несколько выше действительного. С увеличением перепада наблюдается искривление зависимости /см. кривые $\Delta P = 10$ и 23 см рт. столба/. Поскольку кривая на рис. 19 снята при различных и довольно высоких значениях перепада /от 40 до 15 см рт. столба/, возможно, что ее кривизна объясняется именно высокими перепадами. Это обстоятельство указывает на наличие кинетических потерь энергии. Тот факт, что кривизна возрастает с укорочением капилляра несомненно указывает на влияние длины. Поправки на концевой эффект и на изменение кинетической энергии по длине капилляра не достаточно велики для объяснения увеличения отклонений от

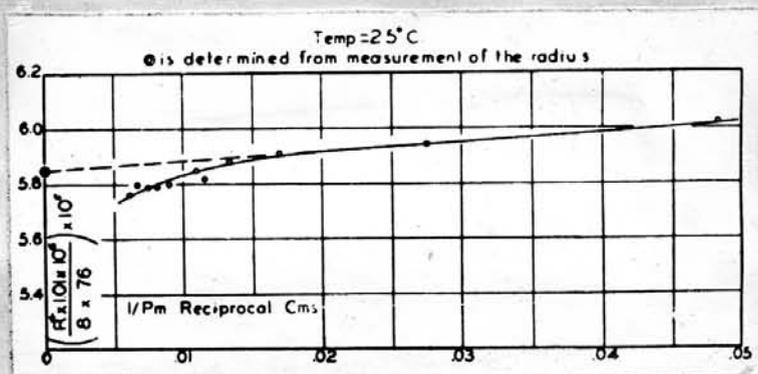


Рис.19 Зависимость величины R^4 от величины $1/P$; течение азота через капилляр.
 ● - из результатов измерения радиуса прямым путем

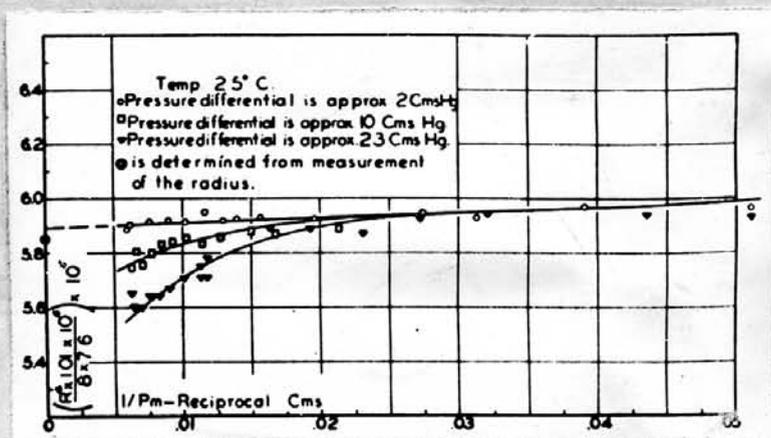


Рис.20 Зависимость величины R^4 от величины $1/P$; течение азота через капилляр.
 ○ - $P=2$ см рт.столба; □ - $P=10$ см;
 ▽ - $P=23$ см.
 ● из результатов измерения радиуса прямым путем.

прямой с укорочением капилляра.

В связи с этим возникает мысль с объяснениями искривления зависимости $K \sim 1/\bar{r}$ для пористых сред тем, что в последней каналы состоят из очень коротких капилляров.

Если это искривление для пористых сред связано с потерями кинетической энергии, то степень искривления должна зависеть от величины перепада давления, а истинное значение проницаемости должно быть ниже экстраполированного. Справедливо однако обратное соотношение: величина перепада не влияет на проницаемость, а экстраполированное значение проницаемости хорошо сходится с жидкостепроницаемостью.

Кроме потерь энергии вызванной наличием расширений и сужений в пористой среде имеются еще два вида пор кинетических потерь, которые поддаются учету: 1/ кинетическая энергия газа после прохождения пористой среды и 2/ изменение кинетической энергии вследствие расширения газа в среде при снижении давления. Уравнение:

$$Q_m = \frac{KA(P_1 - P_2)}{2L} \left[1 - \frac{\rho_m Q_m^2 \lg \frac{P_1}{P_2}}{\phi^2 A^2 (P_1 - P_2)} \right] \quad \dots 5$$

учитывает вторую поправку. Первая поправка учитывается ур-ем 5, в котором логарифмический множитель отсутствует.

Расчеты дают пренебрежимо малые величины порядка 10^{-6} для первой поправки и 10^{-7} для второй. Однако для неконсолидированных сред первая поправка, особенно в области переходного режима может оказаться существенной.

2. В таблицах 4-9 приведены результаты измерения жидкостепроницаемости.

Вывод Клинкенберга о равенстве истинной газопроницаемости и жидкостепроницаемости /если жидкость инертна/ подтвердился. Особенно хорошо совпали эти значения для образцов мембраны из пирекса с линейными зависимостями $K = \frac{1}{\rho}$

/Образец С-1: $K_{\infty} = 2,70$ мд-нафта и $K_L = 2,75$ мд; Образец С-3 $K_{C_6H_6} = 3,55$, $K_{H_2O} = 3,55$ мд, $K_{нафта} = 3,43$ мд и $K_{\infty} = 3,43$ мд/. Для кварцевых фильтров совпадение несколько хуже. Для образца -3 /у которого зависимость $K = \frac{1}{\rho}$ искривлена незначительно, согласие удовлетворительно - см. таблицу 6. Для образца Q-6 проницаемость определенная на бензине оказалась заниженной, что возможно связано с засорением пор этого образца при фильтрации бензина. В целом полученные данные хорошо подтверждают вывод Клинкенберга о равенстве K_L и K_{∞} .

На рис. 21 и 22 приведены графики $\Delta P = f(t)$ для образца С-3 на воде и образца Q-3 - на бензине при различных температурах, показывающие, что жидкостепроницаемость следует закону Дарси и не зависит от перепада и рода жидкости - во всяком случае в изученных пределах. Графики получены в опытах с аппаратом постоянного объема, то-есть по методике, когда логарифм перепада давления пропорционален времени, что и отвечает допущению применимости закона Дарси. Зависимости представленные на рис. 21-22 в полулогарифмических координатах действительно линейны.

На аппарате постоянного объема удобно выполнять измерения при различных давлениях. Некоторые результаты этих измерений приведены в таблице 4. В других опытах давление изменяли в больших пределах - от 2 до 100 см ртутного столба. Влияние давления не обнаружено, это позволяет заключить не столько об

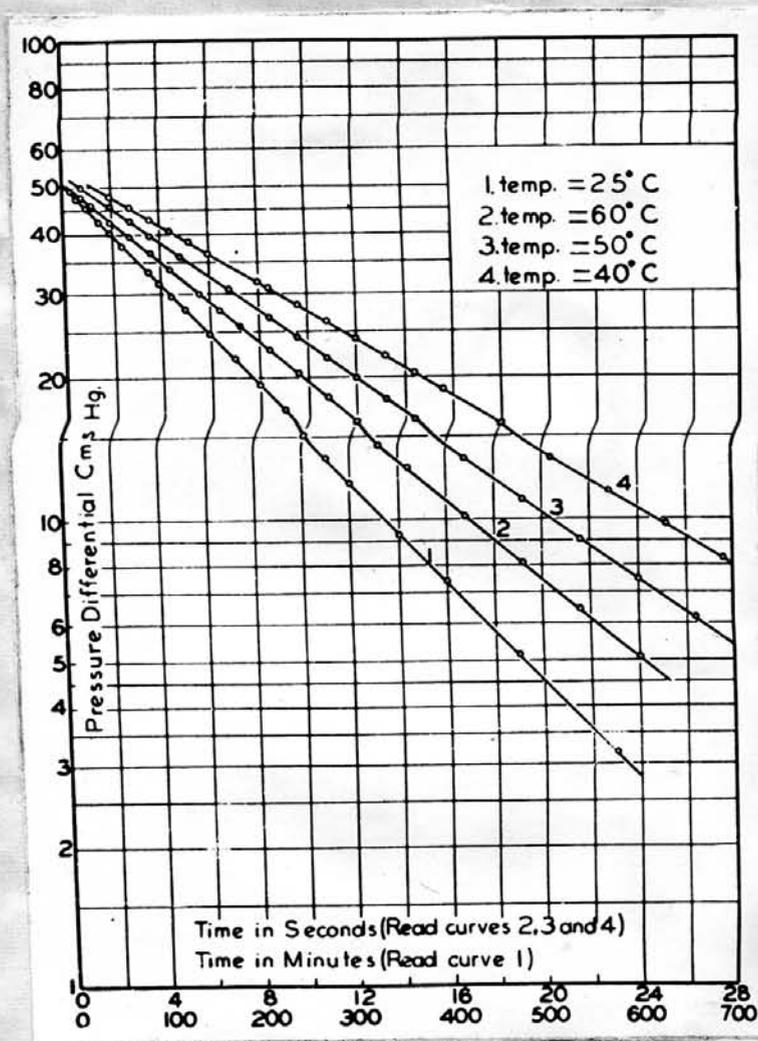


Рис.21 Образец С-3. Зависимость перепада давления от времени при различной температуры при фильтрации воды.

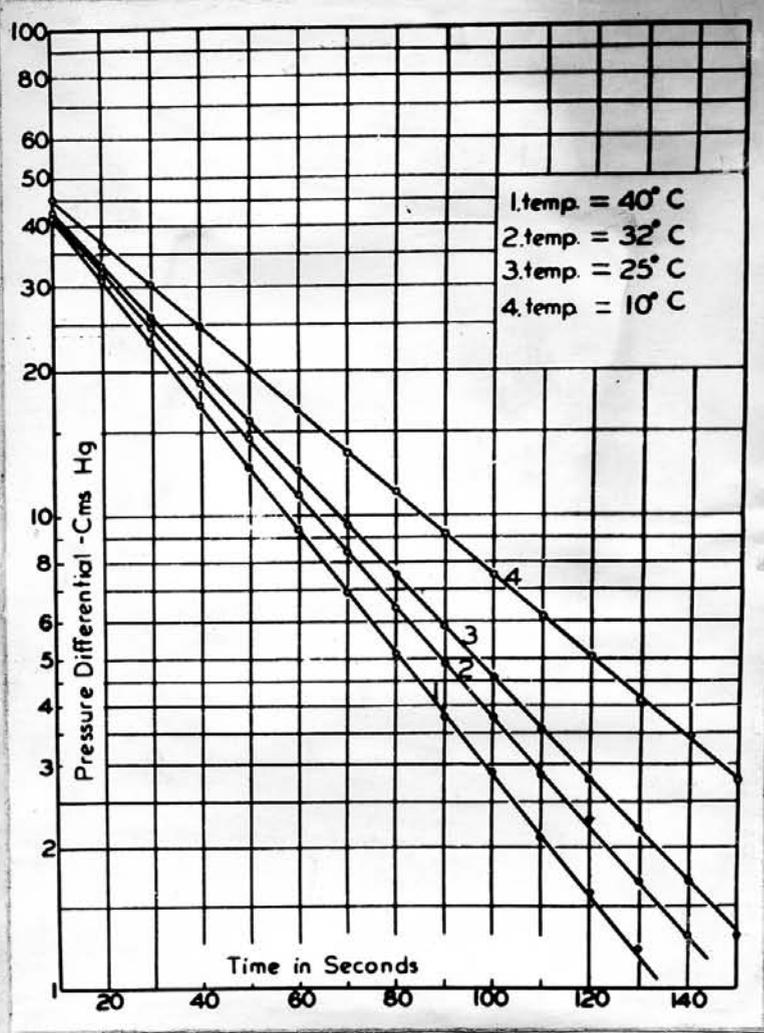


Рис. 22 Образец 0-3. Зависимость перепада давления от времени при различной температуре при фильтрации бензола.

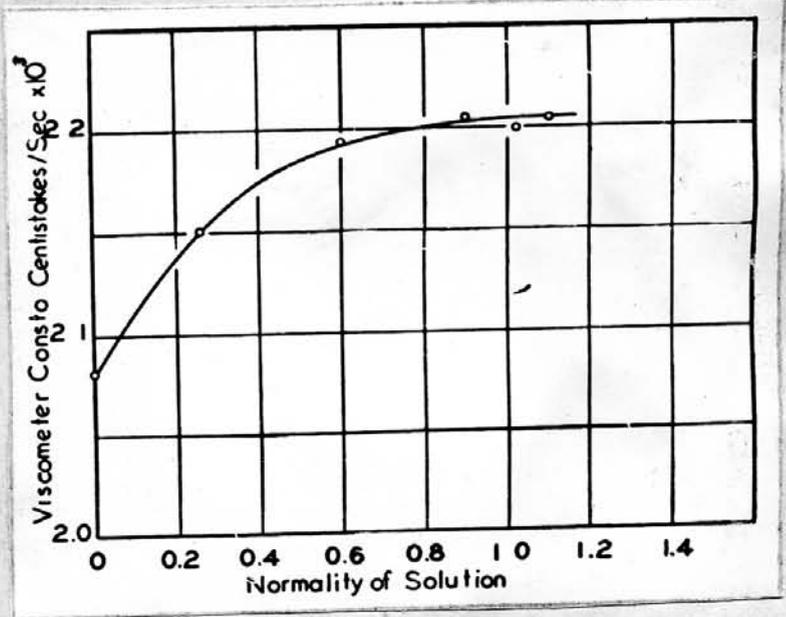


Рис. 23 Образец С-2. Зависимость условной проницаемости /определяемой как постоянная вискозиметра/ от концентрации хлорного натрия в водном растворе.

отсутствии влияния давления на жидкостепроницаемость, сколько о полноте удаления газа из системы.

3. Результаты опытов выполненных при различной температуре в пределах $0-60^{\circ}\text{C}$ /таблицы 4-5/ подтвердили независимость коэффициента проницаемости от температуры. Выводы Грюнберга и Ниссана о снижении проницаемости с увеличением температуры таким образом не подтверждается.

Вообще говоря следовало бы ожидать, что с повышением t -ры проницаемость возрастает вследствие термического расширения пор. Впрочем тепловое расширение кварца и стекла весьма мало.

4. В результате выполненных опытов установлена хорошая сходимость коэффициентов проницаемости определенных на воде, бензине и нефти. Опыты с водой свежедистиллированной из раствора марганцовокислого кальция дали несколько пониженные значения. Это можно было бы объяснить влиянием электрокинетического эффекта, однако на нефти /для которой этот эффект исключается/ были получены те же результаты, что и на воде, а добавление в воду небольших количеств HCl или CaCl_2 не приводит к повышению проницаемости.

5. Опыты выполненные с помощью аппарата типа вискозиметр обеспечивают высокую точность сопоставления проницаемости наблюдаемой при фильтрации различных жидкостей.

Из таблицы 7 следует, что для образца Q-2 с проницаемостью в 40° мд расхождения полученные при выполнении определений на весьма различных по природе и физическим свойствам жидкостях не превышает ошибок измерения. Влияния поверхностного натяжения, что постулировалось Грюнбергом и Ниссаном не установлено, хотя эта величина изменялась в пределах от 30 до 72 дин/см.

дин/см.

Не наблюдалось и уменьшения проницаемости из-за образования сорбционных слоев, что можно было бы ожидать в случае применения раствора стеариновой кислоты в бензине. Не отмечен и электрокинетический эффект, поскольку вода дала те же результаты, что и другие жидкости.

В таблице 8 даны результаты полученные на образце Q-3 /200 мд/ на различных жидкостях, также оказавшиеся одинаковыми.

В таблице 9 даны результаты полученные на образце Q-2 / 9 мд, см рис.12/. Для воды, бензола и раствора стеариновой кислоты получены близкие результаты, но для растворов $NaCl$ с различной концентрацией и буферных растворов с различной концентрацией водородных ионов наблюдаются определенные вариации. На рис.23 показано влияние концентрации /нормальность/ раствора. Подобная зависимость получена и для образца Q-6; для образцов же Q-3 и Q-2 этого не наблюдается. Отмеченное повышение проницаемости с ростом концентрации $NaCl$ было отмечено Грэнбергом и Ниссаном, но в большей степени. Можно полагать, что влияние концентрации солей в растворе проявляется при малой проницаемости и зависит от типа ионов и химического строения среды.

Буферные растворы были исследованы в том порядке, в котором они помещены в таблице 9. На рис.23 показана полученная зависимость с минимумом отвечающим нейтральному раствору. Выявленная связь не получила достаточного объяснения.

Вариация проницаемости в диапазоне $0 < pH < 10$, не превышает впрочем 5%. Влияющим фактором являются по всей вероятности также концентрации ионов вследствие присутствия солей и электропроводность.

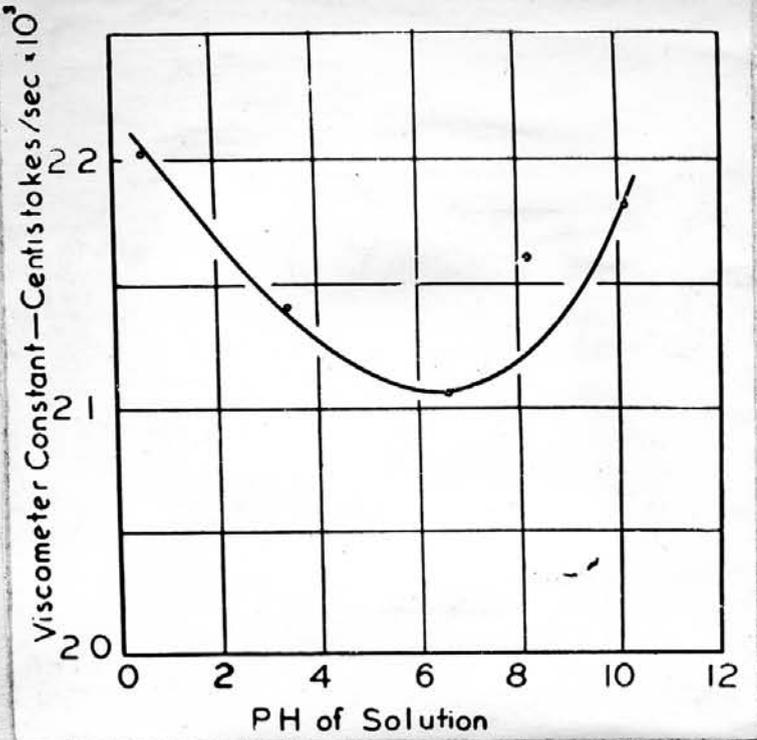


Рис.24 Образец С-2. Зависимость условной проницаемости /определяемой как постоянная вискозиметра/ от концентрации водородных ионов.

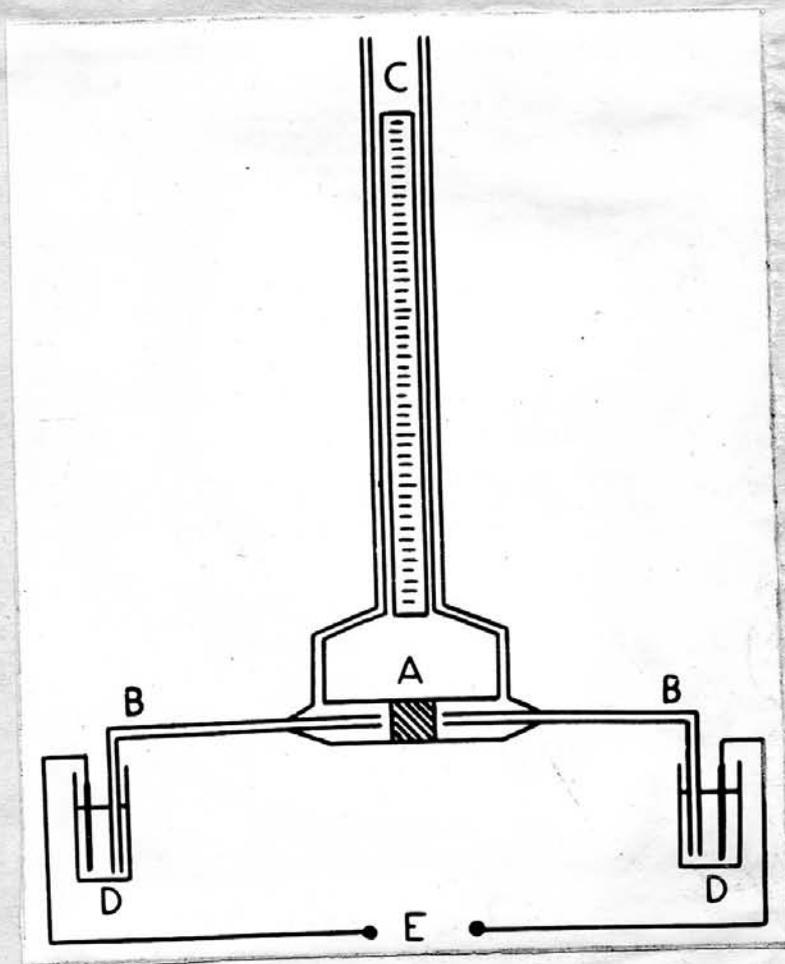


Рис.25 Аппарат измерения перепада давления на мембране при течении растворов с различной концентрацией водородных ионов.

Таблица № 1 Свойства исследованных фильтров

№	Диаметр частиц	D ₁		D ₂		K ₁	K ₂
	мм	см				мд	
-2	40-60	1.78	2.39	1.65	2.23	859	
-3	60-100	1.99	2.41	1.82	2.22	480	217
-4	1 часть, 40-60 9 частей, 100-170 5 частей, 170-200	2.22	2.42	1.95	2.15	13	10
-6	100-170	2.52	2.44	2.23	2.18	112	42

D-диаметр; индекс 1-до обжига, 2-после обжига,

K-проницаемость при 1 ат, индексы: 1-до заделки, 2-после заделки

Таблица № 2. Результаты исследования образца С-1, $t = 25^{\circ}\text{C}$

Газ	К, мм	$\frac{l}{\rho}$, см	С, см	$\frac{C}{\rho}$ см
He	8,0	0.00850	25.45/10 ⁻⁶ /	2.33 /10 ⁻⁸ /
H ₂	8.0	0.01385	1.74 17.44	2.41
N ₂	8.0	0.02560	9.29 ✓	2.38
CO ₂	8.0	0.03885	6.15 ✓	2.39
He	5.0	0.00355	27.45	0.974
H ₂	5.0	0.00560	17.44 ✓	0.977
N ₂	5.0	0.01090	9.29 ✓	1.013
CO ₂	5.0	0.01650	6.15 ✓	1.015

Таблица № 3. Влияние температуры на проницаемость

Газ	$t, ^{\circ}\text{C}$	К, мм	$\frac{l}{\rho}$, см	$\frac{P}{P_1}$	$\frac{T_2}{T_1}$
He	25.0	12.0	0.01525	.....	0.916
	0.1	12.0	0.01810	0.843	1.220
	60.0	12.0	0.01375	1.109	1.220
N ₂	25.0	8.0	0.02562	.....	0.916
	0.1	8.0	0.02825	0.907	1.220
	60.0	8.0	0.02290	1.119	1.220
C ₃ H ₈	25.0	4.0	0.01780	.....	0.916
	0.1	4.0	0.02110	0.844	1.220
	60.0	4.0	0.01640	1.085	1.220

Таблица № 4. Результаты определения *проницаемости* образца C_1
на нефти

Жидкость	$t, ^\circ\text{C}$	$\bar{P}, \text{ см Н}$	$K, \text{ мД}$
Нефть	25,0	97,5	2,71
	....	60,0	2,70
	....	31,5	2,72
	40,0	30,6	2,68
	....	99,0	2,68
	0,1	99,5	2,68
	...	30,5	2,70
	9,5	59,0	2,68
	60,0	57,5	2,72
	50,0	58,0	2,72

Среднее = 2,70 мД

Газопроницаемость /экстрапол./ = 2,75

Таблица 5 Результаты определения проницаемости образца
 C_3 на разных жидкостях в зависимости от t -ры

$t, ^\circ\text{C}$	Бензол	$K, \text{ мД}$	Нефть	вода
0,1	...		3,39	3,40
8,0	3,47		3,41	3,41
10,0	...		3,41	3,42
18,0	3,55		3,48	3,43
25,0	3,52		3,42	3,44
40,0	3,53		3,42	3,45
50,0	3,57		3,45	3,46
60,0	3,58			
Среднее	3,55		3,43	3,43

Таблица № 6. Результаты определения проницаемости ^{мости} на различных жидкостях в функции от температуры. Образец Q-
К, мд

Т°С	нафта	бензол	вода	четырёххлористый углерод
0.1	193.7	...	...	...
6.0	...	198.9	...	...
10.0	194.0	199.2	...	...
18.0	193.8	201.8	...	...
25.0	195.6	201.6	193.5	...
32.0	194.5	201.0	193.1	186.0
40.0	195.4	202.7	193.4	...
50.0	194.3	201.4	194.1	187.7
60.0	....	202.9	194.4	....
Среднее	194.8	201.1	193.7	186.8

Таблица 7. Результаты определения проницаемости образца как постоянной вискозиметра на различных жидкостях. Температура = 26°С

жидкость	вязкость сп	постоянная, ССТ/сек
Бензол	0.592	3.180 /10 ⁻³ /
Вода	0.8737	3.160
Бензол	0.592	3.137
10% раствор стеариновой кислоты в бензоле	0.822	3.134
1N NaCl	0.973	3.144
Раствор Tween 20	3.425	3.141
Нафта	0.432	3.158
Нефть Браздфорд	7.65	3.159
Вода	0.8737	3.145

Таблица № 8. Результаты определения проницаемости образца Q-3 как постоянной вискозиметра на различных жидкостях

жидкость	: $t, ^\circ\text{C}$	: вязкость, сп:	постоянная сст/сек
Вода	26.2	0.8700	1.638/10 ⁻³ /
1N NaCl	26.2	0.963	1.636
Бензол	26.2	0.592	1.614
20% раствор стеариновой к-ты в бензоле	26.2	1.072	1.591
буферный раствор: рН=0.88	26.0	0.886	1.601

Таблица 9. Результаты определения проницаемости образца С-2 как постоянной вискозиметра на различных жидкостях, $t=26^\circ\text{C}$.

жидкость	: вязкость, сп:	постоянная сст/сек
Вода	0.8737	2.081/10 ⁻³ /
1,10 N NaCl	0.974	2.204
Бензол	0.595	2.059
10% раствор стеариновой кислоты в бензоле	0.716	2.032
вода	0.8737	2.082
1.02 N NaCl	0.968	2.199
0.90 N NaCl	0.963	2.205
0.60 N NaCl	0.929	2.194 x
0.26 N NaCl	0.884	2.151 x
буферный раствор рН=3,45	0.882	2.141 x
" рН=10,18	0.890	2.182 x
" рН=6,63	0.888	2.106 x
" рН=0,60	0.867	2.202 +
" рН=8,22	0.905	2.161
" рН=11,5	0.900	2.800

x/Температура 26.3^oC

+/Температура 27.1^oC

ЮСТЕР С.Т.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ НА ОДНОРОДНОЙ ЖИДКОСТИ

YUSTER S.T.

HEMEGENEOUS PERMEABILITY DETERMINATION.

Drilling and Production Practice 1946,
p.356-363, 12 ref, 6 fig.

Перевод № 64, карт. 777

1. Воздухопроницаемость песчаников Брэдфорд и Венанго

После опубликования работы Клинкеберга /3/^х исследования влияния среднего давления на газопроницаемость были выполнены Круттером и Даем /5/ на 8 образцах песчаников Венанго / $d=20$, $l=25$ мм/ и Нильсеном, Смитом и Юстером /6/ на 25 образцах песчаников Брэдфорд / $d=57 \times 19$ мм, $l=70$ мм/. Большая часть этих образцов при исследовании воздухопроницаемости дала линейные зависимости $K - \frac{1}{p}$ /рис.1. Данные этих исследований обобщены в виде корреляций $\delta - K_{\infty}$ на рис.2. Существенно, что для различных формаций корреляции оказались различными; причины этого не ясны. Несомненно значительную роль играет форма пор и распределение пор по размерам.

2. Исследования Грюнберга и Ниссана

Эти авторы исследовали 9 образцов пород и 1 образец из спеченного пористогостекла. Газопроницаемость определялась только на воздухе. В опытах фильтрации жидкостей использовался только образец из пористого стекла. Воздухопроницаемость образца пород при среднем давлении 1, 15 атм составила: 0,00625 мд, 0,1592 мд, 0,1079 мд, 0,1910 мд, 0,1826 мд, 0,2530 мд, 3,540 мд, 22,240 мд и 25,300 мд; воздухопроницаемость образца пористого стекла - 155 мд.

Все опыты фильтрации воздуха были выполнены при атмосферном давлении на выходе образца. Линейных зависимостей между проницаемостью и величиной обратной среднему давлению эти авторы не получили. Возможно, что точность измерения расхода в этих опытах была недостаточно велика, так как использованная в опытах Клинкеберга давление изменялось от 1 см рт. столба до 20 кгс/см².

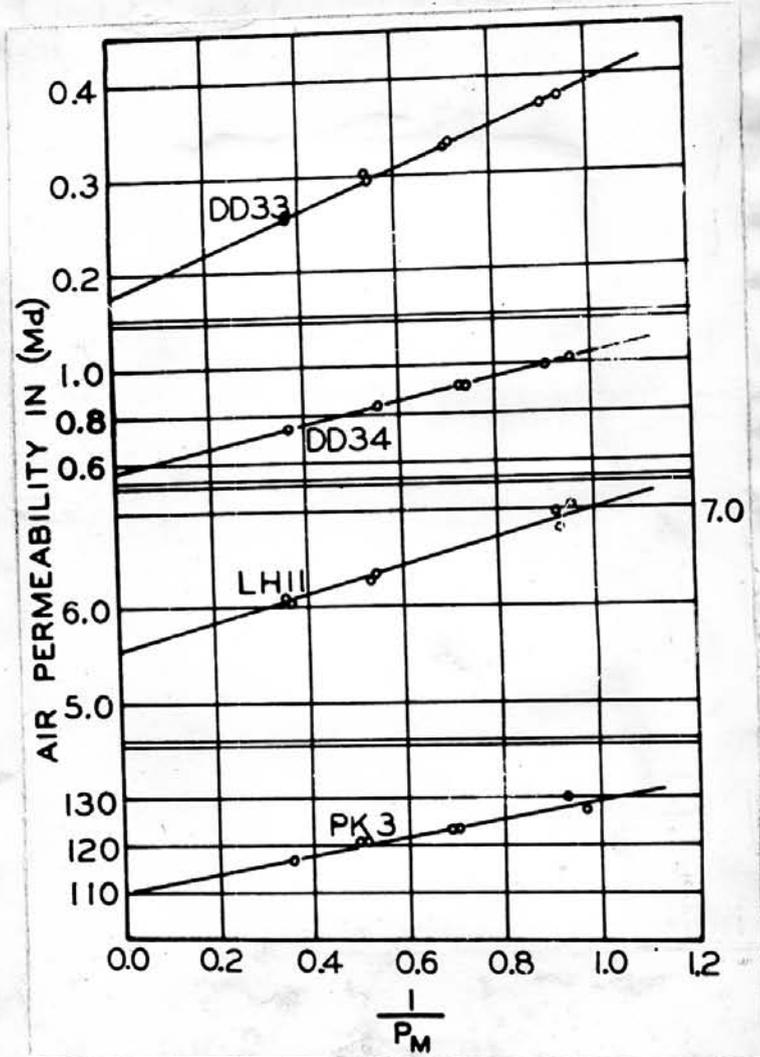


Рис. 1 Зависимость воздухопроницаемости от величины $1/P$ для песчаников Бредфорд

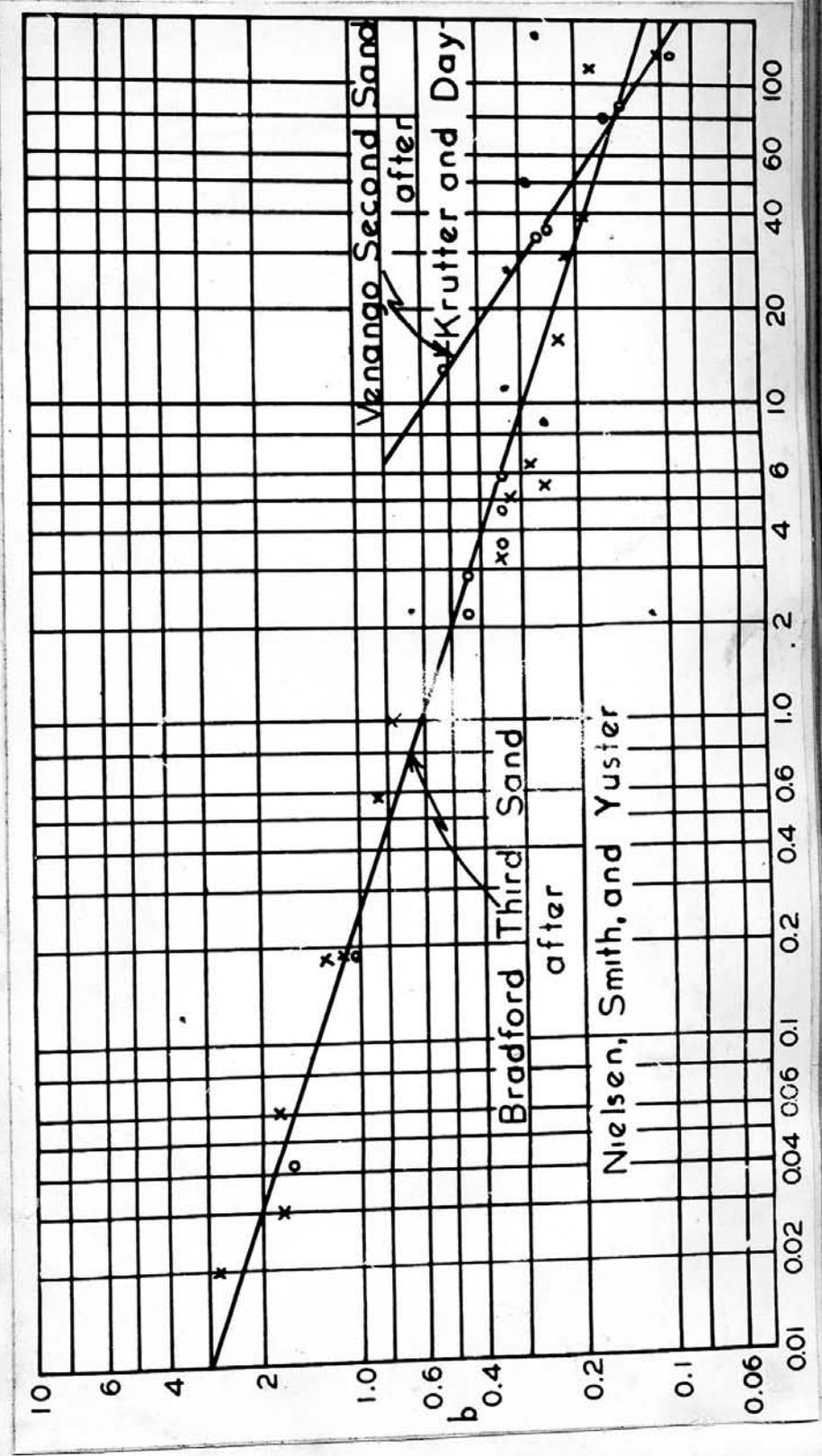


Рис.2 Корреляция $b - K_{\infty}$ для песчаников Брэдфорд по данным Нильсона, Смита и Джастера и песчаников Венанго по данным Круттера и Дэй.

ный ими реометр имел довольно высокий предел измерения.

Грюнберг и Ниссан применив анализ размерностей пришли к заключению, что воздухопроницаемость является функцией от-
ношей P_m^2/Q_a^2 и $P_m \Delta P / Q_a^2$, где ΔP - перепад давле-
ния, а Q_a - объемный расход воздуха при атмосферном давле-
нии. Поскольку на выходе образца поддерживалось атмосферное
давление величины ΔP и P_m изменяются одновременно и в
одном направлении. Можно полагать, что при таком ограничении
адекватная проверка теории такого рода невозможна. Даже с
указанной оговоркой между K и указанными отношениями не об-
наруживается отчетливо выраженной закономерности. Результа-
ты опытов выполненных в этой лаборатории при представлении
в ~~координатах~~ ^{выбранных Грюнбергом и Ниссаном} координатах также не дали удовлетворительной
закономерности. Этого следовало ожидать, поскольку полученные
результаты подтвердили наличие зависимости проницаемости
от среднего давления.

Исследование течения жидкости через пористую среду
Грюнберг и Ниссан выполнили на 4-х водных растворах. Они
нашли, что проницаемость уменьшается с увеличением темпера-
туры, что также следует считать ошибочным.

Из анализа размерности авторы пришли к некоторой без-
размерной величине вида $\mu^2 / \rho \sigma d$, где μ - вязкость жидкост-
ти, ρ - плотность, σ - поверхностное натяжение, d - диаметр
пор, контролирующий процесс фильтрации в пористой среде. Пос-
кольку для данного образца величина d постоянная, доста-
точно ввести величину $\mu^2 / \rho \sigma$. Откладывая на оси ординат
логарифм отношения истинной жидкостепроницаемости к теоре-
тической проницаемости, имеющей место когда это отношение = 1

и на оси абсцисс логарифм величины $\mu^2/\rho\delta$, они получили прямую линию, удовлетворяющую всем четырем исследованным жидкостям /0,960 N NaCl, 0,614 N NaCl, 2% раствор амилового спирта в воде и вода/. Представляется, что этот результат оправдывает допущение, что проницаемость есть функция данного отношения. Интересно заметить, что пределы этой величины на диаграмме авторов составляют от 0,9 до 6,0. Не ясно каким образом они добились этого интервала. Для воды величина $\mu^2/\rho\delta$ равна приблизительно $1,39 \cdot 10^{-6}$. Поскольку все жидкости использованные Грюнбергом и Ниссаном являлись водными растворами, можно полагать, что на самом деле вариация величин μ, ρ и δ была недостаточной для проверки обсуждаемой гипотезы. Клинкенберг, как известно, использовал 9 различных жидкостей с указанными свойствами изменяющимися в значительно более широких пределах, но не наблюдал расхождений в определениях проницаемости превосходящих ошибки опытов.

3. Исследование фильтрации через искусственные песчанники

В работе Кэльяуна и Юстера /3/ показано, что проницаемость определяемая на воде, нефти и бензоле не зависит от температуры. Возможно, что противоположное заключение сделанное Грюнбергом и Ниссаном связано с тем, что эти авторы не термостатировали воздухоприемник. Впрочем их оценка температурной вариации проницаемости по-видимому больше чем указанная погрешность.

На рис. 3 приведен график из работы /3/ подтверждающий результаты Клинкенберга. Было показано, что величины проницаемости при измерении на различных газах дают одинаковые

результаты если средние давления таковы, что длины свободного пробега молекул данных газов одинаковы. Поскольку длина свободного пробега молекул обратно пропорциональна числу молекул в единице объема можно заключить, что сохранение свободной длины пробега молекул при повышении температуры достигается при соответствующем повышении давления. При повышении температуры газопроницаемость по этой же причине должна увеличиваться, однако соответствующее повышение давления приводит к неизменности газопроницаемости.

В исследованной области давлений газопроницаемость экстраполированная на бесконечно большое давление оказалась независимой от температуры, что хорошо согласуется с основными положениями теории скольжения.

4. Течение солевых растворов через искусственные пористые среды

Исследуя течение водных растворов хлористого натрия через фильтр из пористого стекла Грюнберг и Ниссан обнаружили, что с увеличением концентрации NaCl до 0,614*N* и 0,960 *N*, проницаемость, составлявшая при фильтрации дистиллированной воды 155 мд, увеличилась соответственно на 10 и 15 мд.

Кельхаун и Юстер исследовав кварцевый фильтр проницаемостью 195 мд не обнаружили приращения проницаемости при фильтрации 1-нормального раствора хлористого натрия. Однако при фильтрации этого же раствора через кварцевый фильтр проницаемостью 27 мд наблюдалось приращение проницаемости на 4,7%, а через фильтр из пирекса с проницаемостью 9 мд - на 5,8%. Опыты Гендерсона в этой лаборатории подтвердили указанные наблюде-

ния-с повышением концентрации раствора проницаемость растет, как это показано на рис.4^x; наиболее резкое приращение наблюдается в начальной части кривой. Причины этого не ясны. Влияние температуры по данным этих опытов не велико-с увеличением температуры проницаемость несколько возрастает, что противоречит выводам Грюнберга и Ниссана.

Объяснения влиянию концентрации соли в растворе на величину проницаемости в настоящее время не найдено. Можно полагать, что явление связано с образованием потенциала течения, наводимого при фильтрации жидкостей определенного типа и тормозящего поток. Величина потенциала зависит от природы твердой фазы и жидкости, проводимости и диэлектрической проницаемости жидкости и наконец от скорости фильтрации.

Клинкенберг наблюдал проявления потенциала течения при фильтрации нитробензола через мембраны из спеченного стекла. Потенциал весьма мал в случае таких жидкостей как бензол или нефть и достигает максимума для воды. Бензол и нефть таким образом позволяют определить истинную жидкостепроницаемость-определения на воде должны дать несколько заниженные результаты.

Так, исследуя влияние рН раствора на проницаемость, Кальхаун и Юстер нашли, что проницаемость достигает минимума для нейтральной жидкости, что вообще говоря противоречит сказанному ранее, поскольку именно в этой точке потенциал течения достигает минимума. Объяснение этому явлению в настоящее время не дается. Можно заметить, что влияние ионной проводимости

x/На оси ординат отложено отношение времени истечения жидкости в вискозиметре и пермеаметре гравитационного типа по Кальхауну и Юстеру, при одинаковой температуре, что исключает влияние вязкости.

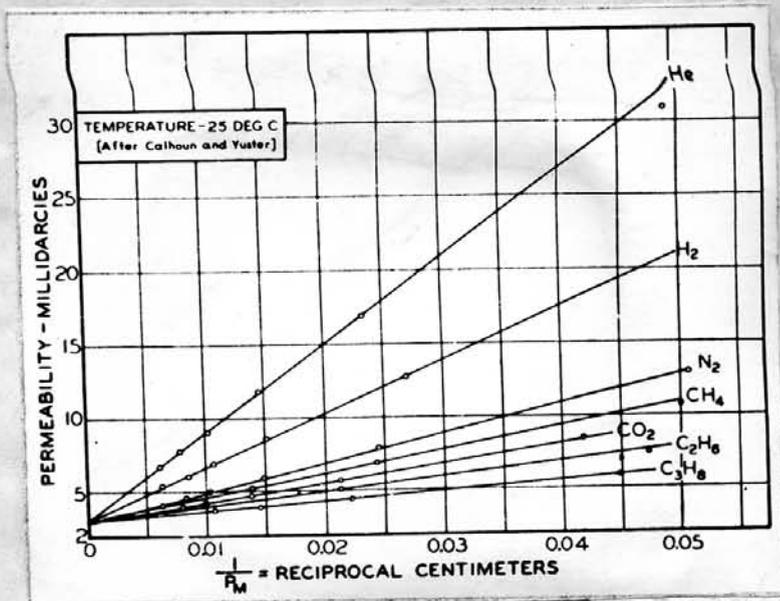


Рис.3 Результаты определения образца С₁ на различных газах по Кальхауну и Даастеру

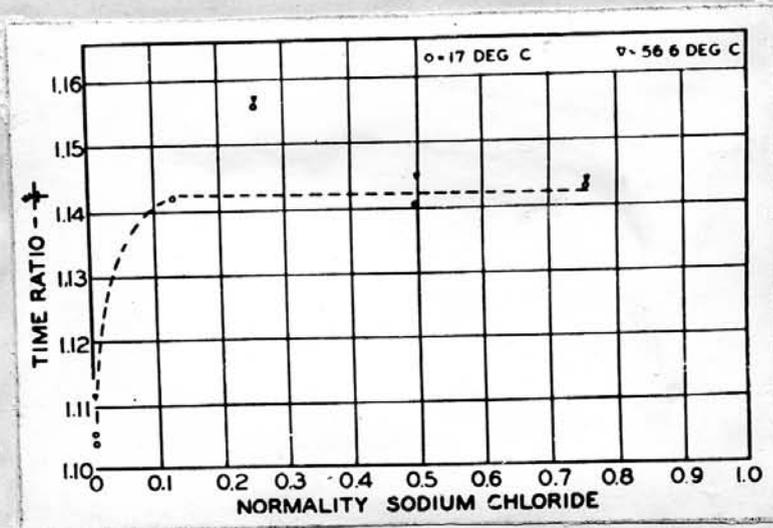


Рис.4 Условия водопроницаемости образца С₂ в зависимости от концентрации хлористого натрия.

увеличивается с уменьшением проницаемости.

5. Течение сопровождающееся изменением структуры порового пространства

Еще Фенчер с соавторами /2/ заметили, что при фильтрации воды через образцы наблюдается уменьшение расхода со временем, вследствие разбухания глинистых частиц. Смит, Кларк и Юстер /9/ изучая возможность использования солевых растворов для заводнения поставили серию опытов с различными образцами в присутствии и отсутствии нефти. Так, партия образцов песчаника Брэдфорд с проницаемостью от 0,65 до 77,5 мд была распределена на 8 пар равнопроницаемых образцов. Образцы были насыщены нефтью. Нефть вытесняли соленой водой из одного образца и дистиллированной из другого. После окончания опытов образцы экстрагировали и снова насыщали нефтью. Затем повторяли опыты вытеснения, причем тот образец, нефть из которого вытесняли в первом опыте соленой водой, становился объектом для опыта вытеснения пресной водой и наоборот. Оказалось, что скорость фильтрации соленой воды выше, чем дистиллированной. Остаточная нефтенасыщенность при вытеснении соленой водой значительно ниже, чем при вытеснении дистиллированной водой.

Для того, чтобы исключить влияние нефти некоторые образцы насыщали только солевыми растворами, после чего определяли их проницаемость на тех же растворах. Результаты представлены на рис. 5. В начале образец насыщали дистиллированной водой. Начальная скорость фильтрации достаточно точно отвечала ожидаемой величине рассчитанной по экстраполированной газопроницаемости, затем наблюдалось резкое снижение скорости и

затем стабилизация. Через 24 часа вновь обнаружилось снижение скорости. После замены свежей воды на соленую наблюдалось повышение скорости фильтрации, несмотря на то, что вязкость соленой воды была приблизительно на 40% выше дистиллата. С течением времени скорость фильтрации медленно приближалась к теоретической /отвечающей начальной проницаемости/. Затем образцы были экстрагированы и насыщены соленой водой. При фильтрации соленой воды скорость фильтрации была постоянной и соответствовала теоретической /с учетом вязкости/. При смене воды на дистиллированную наблюдалось резкое возрастание скорости фильтрации /соответственно уменьшению вязкости/, но затем фильтрация затухала.

На рис. 6 представлены результаты длительных опытов фильтрации той же жидкости, которой образцы были насыщены. Во всех случаях скорость фильтрации соленого раствора медленно растет, стремясь достичь теоретической, а скорость фильтрации дистиллированной воды падает. Согласно данным работы /1%/ песчаники Брэдфорд содержат иллит, что было установлено рентгенографически и термографически, а иллит несколько разбухает в присутствии пресной воды. Различие фильтрационных скоростей солевых растворов и дистиллированной воды нельзя объяснить только присутствием глинистых минералов, так как в присутствии нефти указанное различие заметно возрастает.

6. Течение в случае разбухания глини

Истинная проницаемость пород слагающих заметное количество бентонитовых глин не может быть определена путем фильтрации воздуха через экстрагированный и высушенный образец. Джонстон и Биссон /11/ исследовали около 1200 образцов при

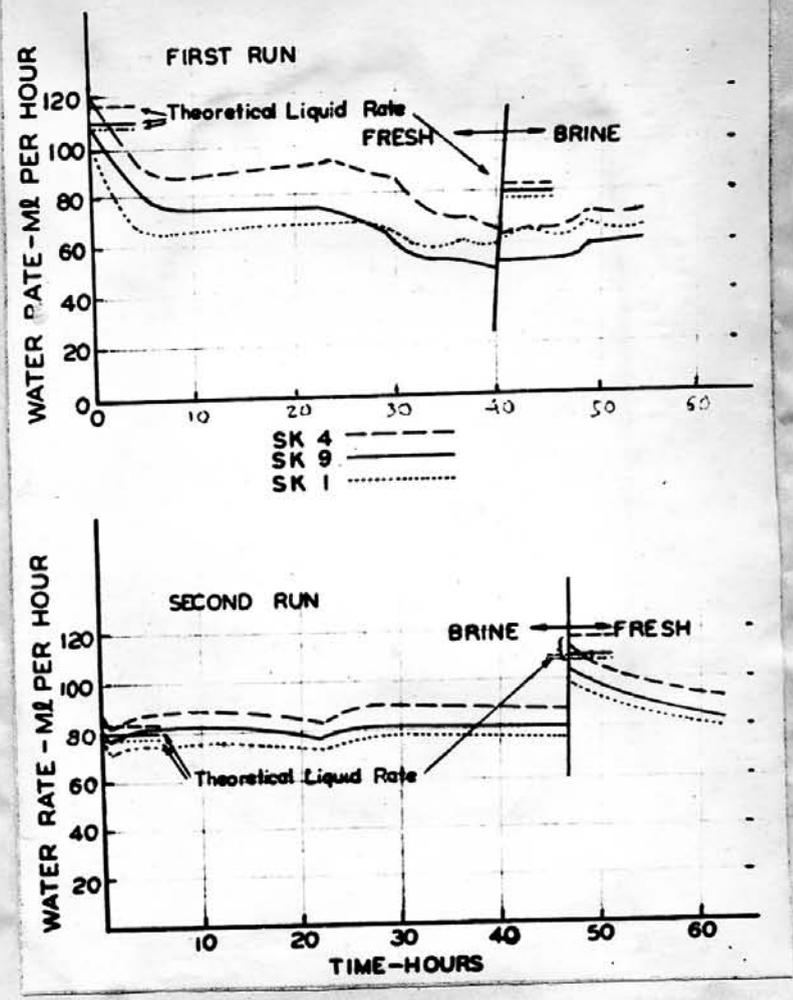


Рис. 5 Изменения скорости фильтрации в зависимости от времени при фильтрации дистиллированной и соленой воды.

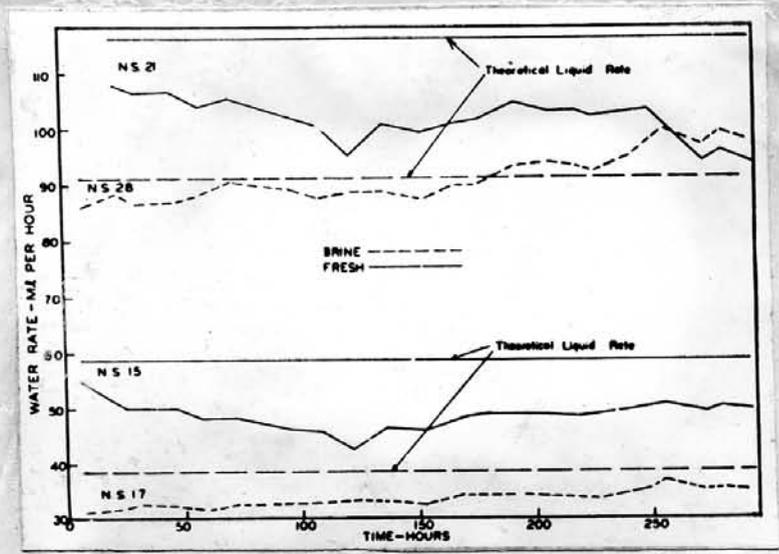


Рис. 6 Изменение скорости фильтрации в зависимости от времени при фильтрации дистиллированной и соленой воды.

фильтрации воздуха, соленой и пресной воды. Для определения воздухопроницаемости были использованы экстрагированные керны. После определения воздухопроницаемости образцы продувались и насыщались раствором хлористого натрия, имеющего общую концентрацию ионов как у пластовой воды. Образцы выдерживались в воде приблизительно 2 часа для достижения равновесного состояния в системе. Затем водный раствор вытесняли дистиллированной водой, в течение приблизительно 24 часов для достижения нового равновесного состояния, после чего производили измерение проницаемости. Было найдено, что отношение воздухопроницаемости и проницаемости измеренной на соленой воде лежит в пределах от 3.000 до 1, а отношение проницаемости на пресной воде к проницаемости на соленой составляет от 0 до 1. Исследуя влияние солености на проницаемость эти авторы обнаружили систематическое уменьшение проницаемости с уменьшением солености в указанных пределах. Эти результаты показывают бесполезность выполнения измерения проницаемости на воздухе для решения многих задач разработки залежи.

7. Влияние pH на фильтрацию.

Брестон и Джонсон /12/ изучали влияние pH на проводимость воды нефтесодержащими песчаниками-неэкстрагированными образцами песчаников Брэдфорд, Бартлесвилль и Сиггинс. Образцы имели осевые сверления для осуществления радиальной фильтрации. Для исследования были использованы пластовые воды и искусственные водные растворы рекомендованные для заводнения. Кислые растворы готовили путем прибавления соляной кис-

лоты до $pH=2,5$, основные растворы путем добавления гидрата окиси натрия до $pH=8,5$. Кроме того использовали растворы хлористого натрия и хлористого кальция. Хлористый кальций вызывал отложения частиц в порах. Наиболее высокую проводимость показали подкисленные воды и воды содержащие хлористый натрий; основные растворы дали пониженное значение проводимости.

З а к л ю ч е н и е

Проницаемость пористых сред зависит от жидкости, на которой производят определение, даже если никаких реакций между твердой фазой и жидкостью не происходит. Из этого следует, что обычное определение проницаемости на воздухе может приводить к получению неверных данных. Если желательно получить величину идеальной проницаемости, то достаточно прибегнуть к определению воздухопроницаемости с введением поправки на давление по Клинкенбергу. Такое определение можно считать адекватным лишь для инертных пород. Однако степень инертности может быть определена только путем сравнения воздухо и жидкостепроницаемости. Так как значительная часть нефтяных песчаников реагирует с водными растворами, то практически определение проницаемости следует производить на пластовой воде или же на воде рекомендуемой для осуществления процесса заводнения. Джонстон и Биссон допускают применение искусственного раствора вместо пластовой жидкости. Это может обеспечить стабильную фильтрацию, но не получение истинного значения проницаемости.

1. API Code No. 27: "Standard Procedure For Determining Permeability of Porous Media" 2nd edn., Apr. (1942).

2. FANCHER G.H., J.A. LEWIS and K.B. BARNES "Some Physical Characteristics of Oil Sands". Penn. State Coll. Mineral Ind. Exp. Sta. Bull. No. 12, 65-167 (1933).

3. KLINKENBERG L.J. "The Permeability of Porous Media to Liquids and Gases" Dril. and Product. Practice, 200 (1941).

4. KUNDT A. and WARBURG. ~~1896~~ Poggendorfs Ann. Physik, 155, 377, and 525 (1875).

5. KRUTTER H. and DAY R.J. "Modification and Permeability Measurements" Oil Weekly 104 (4), 24 Dec. 29. (1941).

6. NIELSEN R.F., K.W. SMITH and S.T. YUSTER. -Progress Report No. 74, to the Bradford District Research Group, Jan (1942).

7. GRUNBERG L and NISSAN A.H. "The Permeability of Porous Solids to Gases and Liquids" J. Inst. Petrol. Tech. 29 (236) 193-225, Aug. (1943).

8. CALHOUM J.C., Jr. and YUSTER S.T. "A Study of the Flow of Homogeneous Fluids through Ideal Porous Media" Dril. and Product. Practice. (1946).

9. SMITH K.W., A.P. ELARK and S.T. YUSTER "Brines as Flooding Liquids" Proceedings of the Seventh Secondary Recovery Conference, The Pennsylvania State College, Nov. (1942).

10. BATES T.F., R.M. FRUVER and S.T. YUSTER "The Clay Content of Oil Sands" Producers M 10 (10) 16-19. Aug. 1946.

11. JOHNSTON N and BEESON C.M. "Water Permeability of Reservoir Sands" Am. Inst. Mining Met. Engrs. Petroleum Tech., May (1945).

12. BRESTON J.N. and W.E. JOHNSON "Effect of pH on Water-Intake Rate of Oil Sands" Producers M. 9 (12) 19-23. Oct (1945).

РАЙДЕР Х.М.

О ФОРМЕ ПОР ПЕСЧАНИКОВ

RYDER H.M.

CHARAKTER OF PORES IN OIL SANDS

World Oil, April 1948, p. 129-134, 10 ref,
8 fig.

Перевод № 61, карт. 775

Определение формы и размеров пор с удовлетворительной точностью не может быть произведено путем изучения куска или шлифа под микроскопом, вследствие двумерности отображения. Размеры и форма зерна влияют на размеры и форму пор, но не определяют последних однозначно. Хорошее приближение может дать изучение слепков воспроизводящих форму порового пространства, что впервые было осуществлено Наттингом^{х/} в 1929 г.

Такие слепки были приготовлены и для песчаников Брэдфорд. Исследование их под микроскопом дало интересные результаты. Поры в основном оказались очень тонкими и сравнительно широкими, плоскими. Они имеют беспорядочную ориентацию и образуют трехмерную сетку, включающую малые пустотки; строение среды в целом очень напоминает строение печеного хлеба. Многие поры имеют раскрытие порядка 1 мк и меньше при ширине в пределах 30-200 мк. Именно эти поры составляют значительную часть порового объема и следовательно их форма и размеры контролируют проницаемость этих песчаников..

Интересно отметить, что изучение слепков с образцов с проницаемостью от долей до сотен мд не привело к обнаружению связи между проницаемостью и числом пор на единицу площади или шириной пор; основным контролирующим фактором является раскрытие пор.

Представление об указанной особенности формы пор дают также стереоскопические изображения и шлифы.

Эта форма пор находит подтверждение в корреляции на рис.

5. Проводимость капиллярной трубки & круглых сечений зависит

х/ Образец насыщают расплавленным церезином и после затвердения помещают в плавиковую кислоту, раз"едающую песчинки и не реагирующие с церезином.

от четвертой степени радиуса капилляра, как это следует из закона Пуайзеля. В случае канала щелевидного сечения проводимость зависит от третьей степени раскрытия щели /2,3/. Из теории скольжения по Клинкенбергу /4/ следует, что $\frac{4c\alpha}{r} = \frac{6}{\rho}$ таким образом постоянная $\frac{6}{\rho}$ обратно пропорциональна радиусу капилляра.

Для песчаников Брэдфорд вместо радиуса следует ввести размер раскрытия щелевидных пор.

Таким образом для песчаников с круглыми порами проводимость /проницаемость/ должна быть пропорциональна четвертой степени величины $\frac{1}{\rho}$, для песчаников с щелевидными порами - третьей степени этой величины.

Исследование воздухопроницаемости песчаников Брэдфорд при различных средних давлениях позволило представить корреляцию $K_L - \frac{1}{\rho}$ -линейную в билогарифмических координатах. Зависимость $K_L = A(\frac{1}{\rho})^n$ характеризуется показателем степени 2,91. Юстер /5/ также исследовавший песчаники Брэдфорд приводит значения K_L и ρ для которых показатель степени составляет 2,96. Оба значения очень близки к 3. Это объясняется щелевидной формой пор.

Для песчаников Венаго исследованных Круттером и Дзем /7/ показатель степени равен 1,46 для песчаников исследованных Клинкенбергом /см. источник 4 таблица 9/-2,78. Образцы исследованные Клинкенбергом имели различное происхождение, поэтому рассеяние точек выше чем для песчаников Брэдфорд и указанная величина показателя степени не может быть

 Из указанного соотношения следует $r = \frac{4c\alpha}{\rho}$ следовательно $r = \frac{c}{\rho}$, где c - некоторая постоянная зависящая от природного газа / $c \sim 1$ /.

K_L - 2,91

надлежащим образом пояснена.

Сравнение корреляций хорошо поясняет влияние формы пор на проницаемость. При одинаковых размерах пор песчаники Клинкеберга имеют проницаемость в 5 раз меньшую проницаемости песчаников Брэдфорд и следовательно число пор на единицу площади нормальной к направлению расхода у песчаников Брэдфорд будет в пять раз меньше. При равной проницаемости поры песчаников Клинкеберга примерно в два раза больше по размерам, чем поры песчаников Брэдфорд. При проницаемости в 20 мд размеры пор песчаника Брэдфорд и Венаго одинаковы. При большей проницаемости поры песчаника Венаго имеют большие размеры, чем поры песчаника Венаго, при меньшей проницаемости имеет место обратное соотношение.

Природа поверхностей пор

При экстрагировании бутиловым спиртом, четыреххлористым углеродом и пентаном песчаники Брэдфорд остаются коричневыми. Если после нормального экстрагирования пентаном произвести повторное длительное экстрагирование свежим пентаном, то будет получено небольшое количество почти твердого совершенно черного экстракта, песчаник же сохранит светлокоричневый оттенок; последующая обработка соляной кислотой не скажется на изменении цвета ни песчаника, ни кислоты. Только обработка хромовой кислотой позволит снять окраску песчаника. Следует заметить, что образцы поднятого керна немедленно помещали для предохранения от окисления в сосуд с пентаном.

Изложенное показывает, что песчаник Брэдфорд окрашен органикой /еще Паттинг показал, что хромовая кислота удаляет коричневый /сорбированный/ слой углеводородов; соли железа

удаляются обработкой соляной кислотой. Эта органика состоит из сложных полярных соединений селективно адсорбированных на поверхности пор, в результате чего песчаник превратился в гидрофобную среду. Гидрофобная поверхность в сочетании с малым раскрытием пор /1 мк и ниже/ обеспечивает весьма благоприятные условия для осуществления процесса заводнения.

РАЙДЕР Х.М.

ОБ АБСОЛЮТНОЙ, ЭФФЕКТИВНОЙ И КАЖУЩЕЙСЯ
ПРОНИЦАЕМОСТИ

RADER H.M.

PERMEABILITY ABSOLUTE, EFFECTIVE, MEASURED.

World Oil, May 1948, p.173-177,
13 ref, 4 fig.

Перевод № 62, карт. 776

Определение проницаемости

Абсолютная проницаемость зависит только от строения пористой среды и может быть выражена как некоторая функция характерного размера среды. В работе /1/ было предложено, в качестве фундаментального, определение: $K = Cd^2$

Делались попытки определить проницаемость как функцию пористости. На рис. 1 приведено сопоставление результатов измерения этих величин для 500 образцов отобранных из песчаника Брэдфорд на небольшой сравнительно площади, через каждый фут из 29 скважин /средний девон, Пенсильвания/. Проницаемость измеряли по Клинкенбергу. Пунктиром показана усредняющая кривая. Прямая А аппроксимирует усредняющую кривую с ~~интересной~~ удовлетворительной точностью до 20 мд; уравнение этой прямой $K = 5,7 e^{-0,749}$; -19% образцов имеют проницаемость менее $0,25 K$ и более $4K$, где K -значения вычисленные по этому ур-ию; 48% образцов имеют проницаемость меньше $0,5K$ и более $2K$. Приведенная корреляция вряд ли может быть использована для каких-нибудь практических целей.

Проницаемость и размер зерен

Выражение проницаемости через размеры зерен может дать удовлетворительные результаты для искусственных неконсолидированных материалов, но не пород. Для песчаников Брэдфорд удалось получить лишь корреляцию с таким-же разбросом точек как и на рис. 1 /3/.

Размеры и форма пор.

Изучение влияния размеров пор на основании величины поправки на скольжение /4/ привело к ур-иям регрессии:

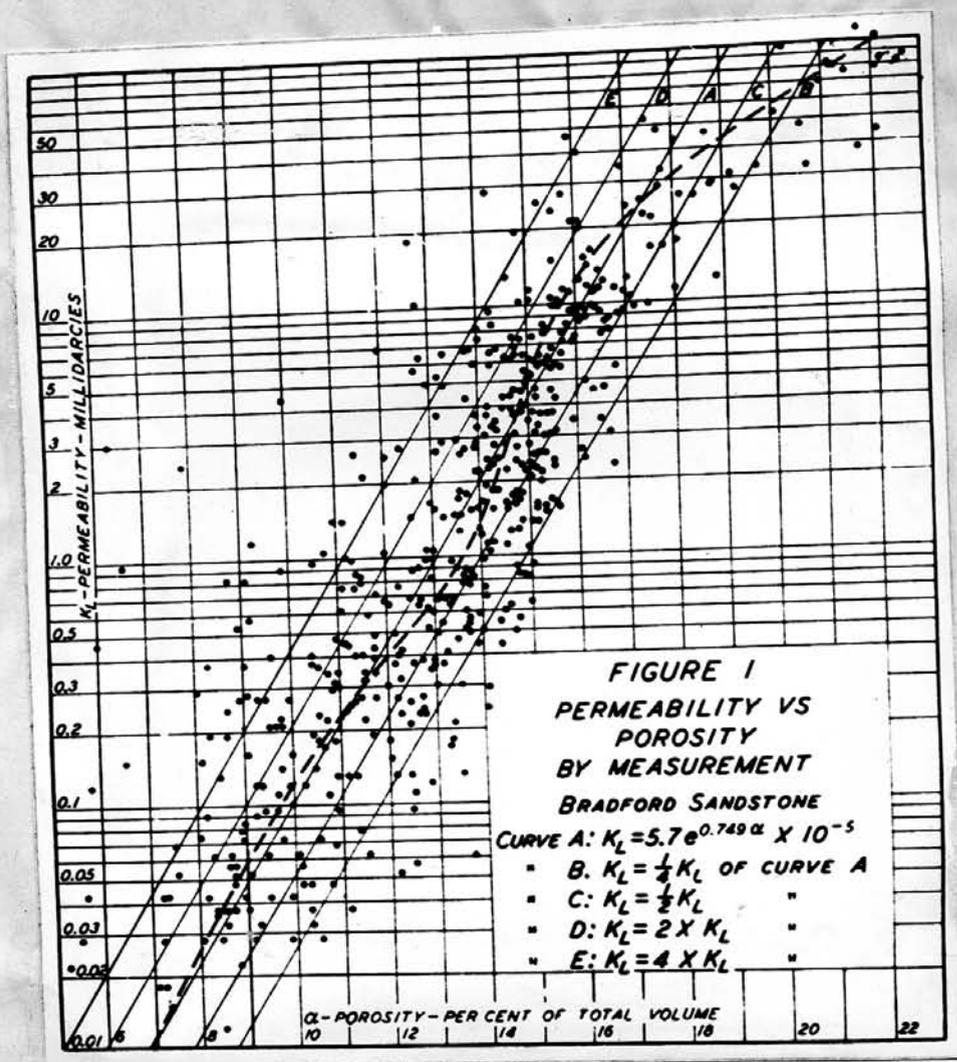


Рис. 1 Сопоставление проницаемости и пористости для песчаников Брэдфорд.

Песчаники Брэдфорд: $K=1,0 d^{2,905}$
 -"- Венаго: $K=4,70 d^{1,495}$
 -"- Исследованные
 Клинкенбергом $K=0,25 d^{2,777}$

Здесь величины d измеряются в условиях единицах, по порядку близких к 1 мк.

Показатель степени ⁻ⁿ зависит от формы поровых каналов.

Расход жидкости через круглые капилляры пропорционален четвертой степени радиуса, через каналы с плоскопараллельными стенками - третьей степени расстояния между стенками /5/.

Арнелл /13/ измерял расход газа через неконсолидированные среды из зерен различной формы. Обработка его данных приводит к величинам: $n = 1,610$ для угловатых зерен, дробленый кварц / и $n = 0,526$ для сферических зерен. Сообразуясь с этими данными можно заключить, что поры песчаников Венаго подобны порам образованным угловатыми зернами слегка округленными в результате цементации. С другой стороны можно заключить, что влияние процесса цементации для песчаников Венаго и Брэдфорд весьма различно.

Величина n заключена в пределах 0,5-4,0 и определяется степенью кривизны стенок и направлением искривления /выпуклые стенки или вогнутые/:

- Капиллярные трубки круглого сечения /максимальная вогнутость/ $n = 4,0$
- Плоскопараллельные стенки $n = 3,0$
- Пустоты между острыми угловатыми зернами $n = 1,6$
- Пустоты между круглыми зернами $n = 0,5$

Поры с плоскопараллельными стенками характерны для песчаников Брэдфорд /4/. Образование таких пор связано с разрас-

танием вторичного кварца на первичных зернах в процессе уплотнения или на стадии диагенеза. Это явление не необычно и поры подобной формы могут быть выявлены во многих песчаниках. Уентворе /6/ обнаружил очень тонкие и широкие трещины в проницаемой лаве, а Имбт и Эмисон /7/ в оолитах.

Изложенное показывает, что определение абсолютной пористости через структурные размеры должно учитывать форму пор.

Для газов величина K определяемая законом Дарси не является постоянной, но зависит от среднего давления. При очень низких давлениях, когда длине свободного пробега молекул больше характерного размера пор зависимость проста: $K = \frac{m}{P} + n$. При высоких давлениях возможны отклонения от указанной зависимости /рис. 2 и 3/. Это обстоятельство должно быть учтено при определении эффективной проницаемости.

Адсорбция

При фильтрации жидкостей явление сорбции /не играющее сколько-нибудь заметной роли при фильтрации газа/ может привести к заметному изменению проходного сечения пор. Литературные указания по этому вопросу часто противоречивы. Бёлкли /8/ считает, что заметного влияния на проницаемость сорбированные слои не оказывают и что истинной причиной вызывающей затухание фильтрации наблюдаемое рядом авторов является засорение каналов посторонними частицами содержащимися в жидкости. Клиненберг /2/ не обнаружил проявления сорбции в своих опытах фильтрации различных жидкостей через пористые срепки, также как и Кэльхаун и Юстер /9/ в опытах с кварцевыми фильтрами высокой проницаемости. Однако на образце пористого кварца 9 мд и мембране пористого стекла 42 мд Кэльхаун и Юстер /9/ заметили, что при переходе от пресной воды к соленным растворам про-

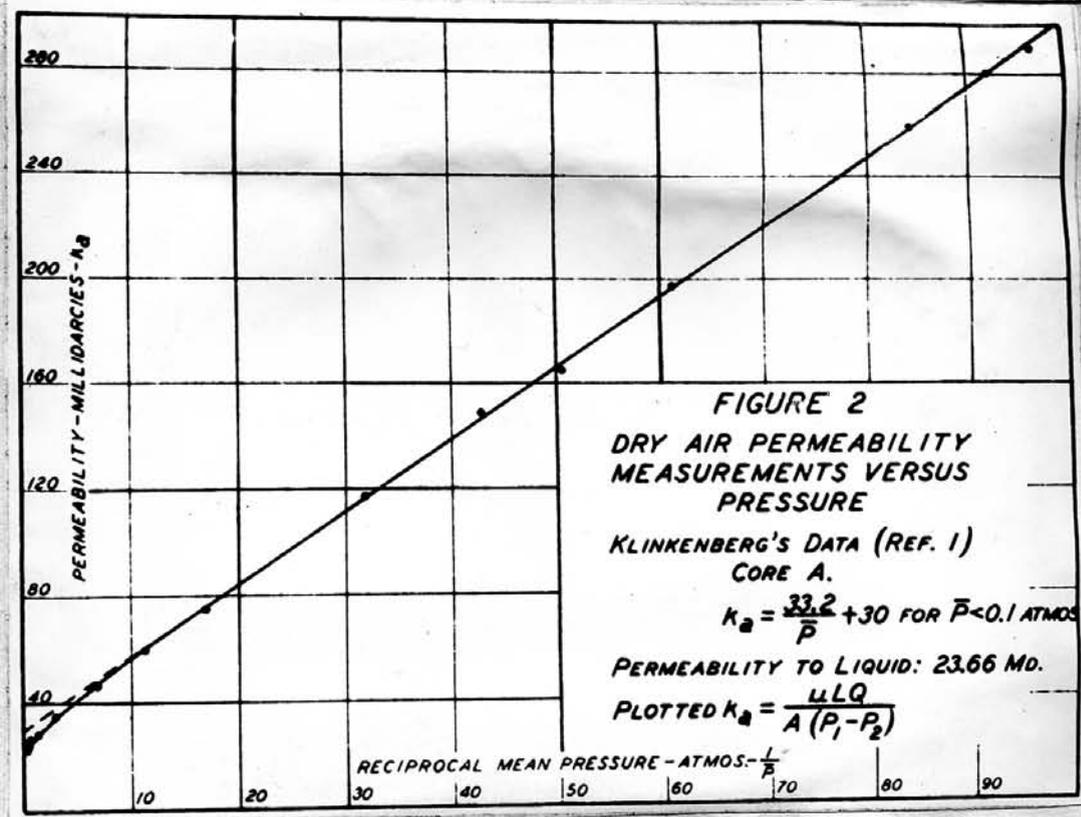


Рис.2 Зависимость кажущейся проницаемости от величины обратной среднему давлению в образце.

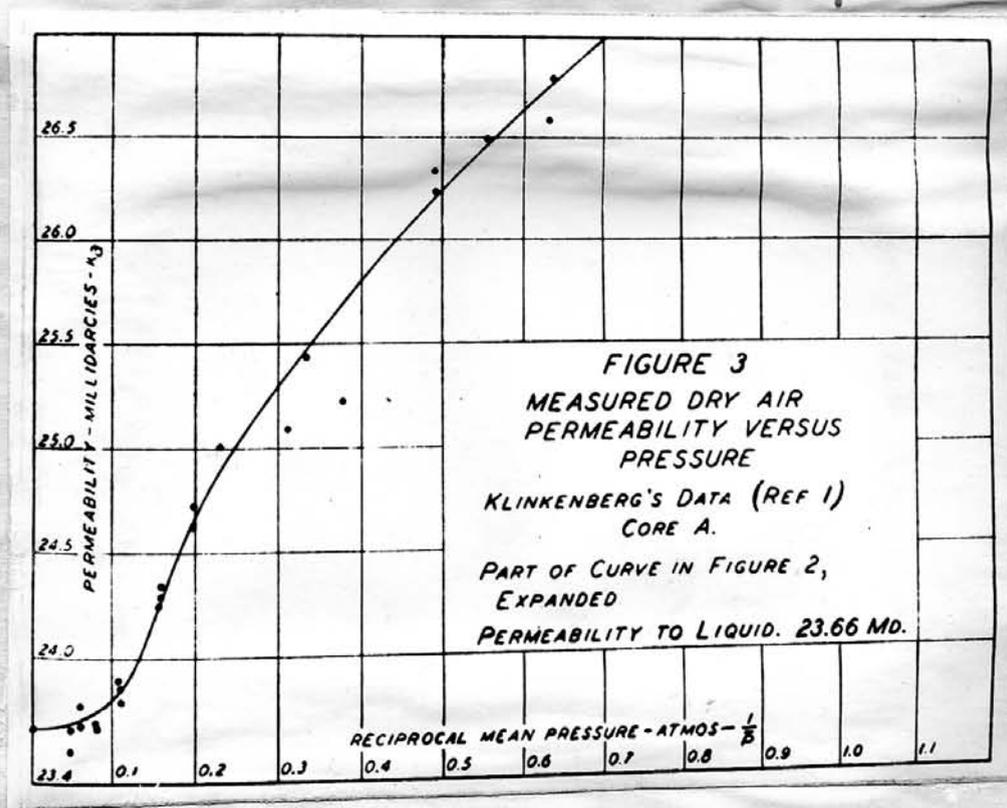


Рис.3 Зависимость кажущейся проницаемости величины обратной среднему давлению в образце-часть кривой по рис.2 в области высоких давлений

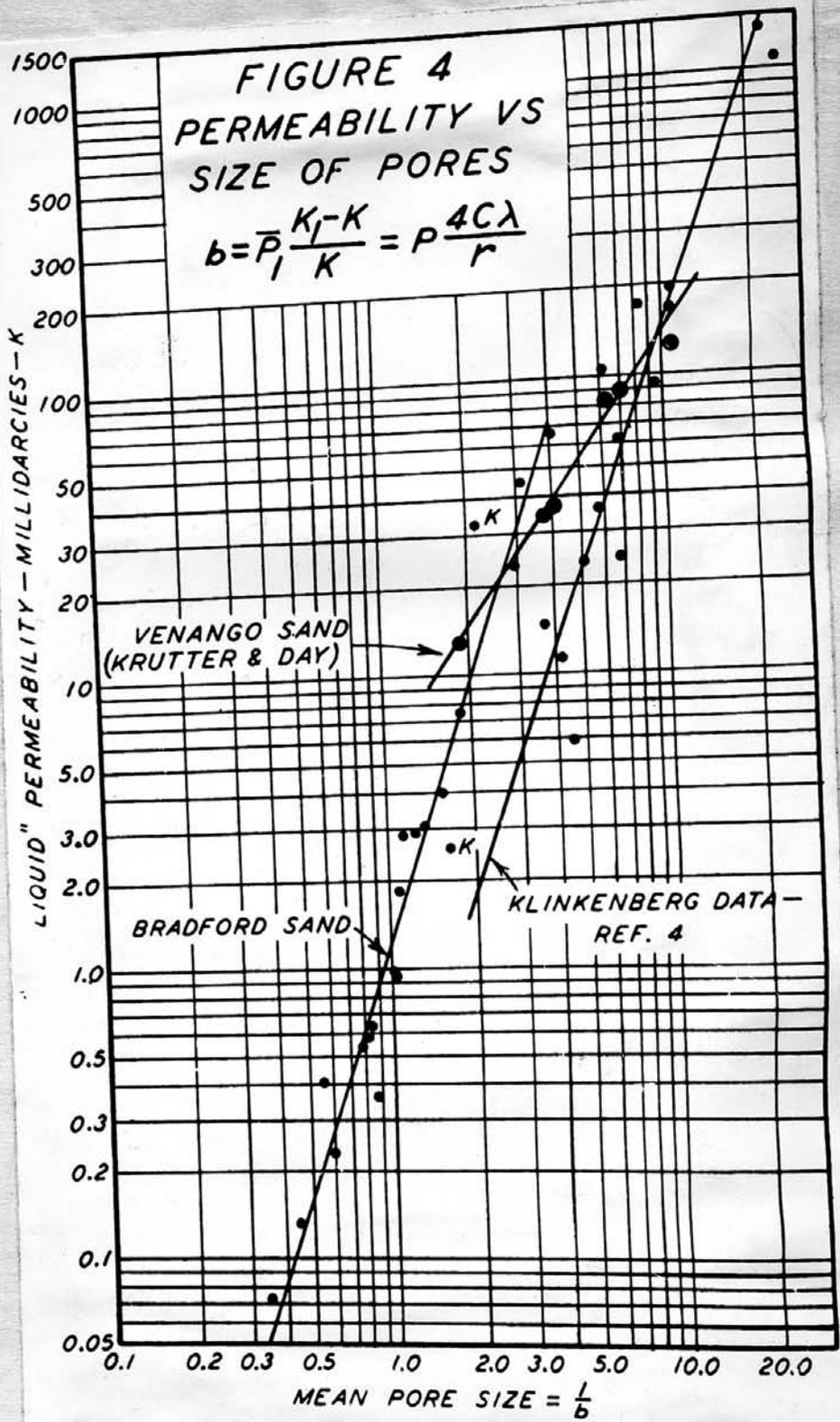


рис.4 Корреляция между проницаемостью и средним размером пор $\left(\frac{1}{b} \right)$.

ницаемость увеличивается примерно на 5%.

Грюнберг и Ниссан /10/ считают, что в результате сорбции сечение каналов уменьшается. Такое же мнение высказывает и Уентворс, наблюдавший затухание фильтрации воды до нуля в своих опытах с образцами лавы /влияние потенциала течения в этих опытах исключено/. Это^T автор нашел, что толщина слоя адсорбированной воды составляет до 0,0124-0,0119 мм.

Нуттинг исследовал течение жидкости через длинные до 1 м капилляры. Он нашел, что при течение нефти /40° АНИ/ через стеклянную трубку радиусом 0,4 мм постепенно образуется сорбированный слой нефти толщиной 0,0029 мм /расчитанный по уменьшению радиуса/. Если стеклянная трубка толщиной 0,1 мм находилась в воде, то толщина сорбированного слоя увеличивалась на 0,0065 мм. Подобное явление наблюдалось на 15 парах жидкостей из исследованных 30, но в меньшей степени. Нуттинг об"ясняет увеличение толщины слоя /при достаточно малой толщине стенок/ при наличии внешней жидкости специфическим влиянием стекла, подобным действию стеклянного электрода при измерении pH. По Нуттингу адсорбция анионов с одной стороны тонкой стеклянной перегородкой приводит к сорбции катионов, вообще электроположительных материалов на другой сторону перегородки.

В другой работе /12/ Нуттинг показал, что в системе вода-нефть-силиций возникают силы адсорбции, приводящие к образованию эмульсии. Подобные силы используются во флотационном процессе обогащения руд. Можно полагать, что в песчаных коллекторах, где в контакте находятся нефть, вода и кварц должны возникать значительные силы адсорбции. Именно этими силами об"яс-

няется происхождение прочно сорбированного слоя углеводородах на зернах песчаников Брэдфорд.

Значительная часть пор песчаников Брэдфорд имеет раскрытие порядка $1 \text{ мк} / 4 /$. Образование тонких сорбированных слоев в каналах может вызвать заметное снижение проходного сечения. Уэйтворс показал, что в каналах с малым раскрытием сорбированный слой имеет меньшую толщину, чем в каналах с большим раскрытием, но относительное влияние его на погрешность может быть столь же значительным. Из этого следует, что внешний слой сорбированных молекул удерживается непрочно и может быть "смыт" движущейся жидкостью при достаточной скорости, что возможно и объясняет наблюдения не подтверждающие изменений толщины сорбированного слоя.

Для песчаников Брэдфорд при заводнении рекомендуют скорости фильтрации /промышленные/ порядка $1 \cdot 10^{-4} \text{ см/сек}$. Гринберг и Ниссан свои опыты производили со скоростями такого же порядка, Уэйтворс доводил скорость до $1 \cdot 10^{-2} \text{ см/сек}$, Наттинг же в своих капиллярах допускал еще большие скорости, впрочем его капилляры имели сравнительно большие размеры, в результате чего скорость у стенки была достаточно мала.

В результате образования сорбированных слоев размеры поровых каналов, а иногда и число последних, уменьшаются и эффективная проницаемость снижается.

На скорость фильтрации тех или иных жидкостей влияет природа поверхностей поровых каналов. Некоторые песчаники в результате образования сорбированных слоев углеводородов гидрофобизируются и становятся проницаемыми для воды, подобно тому, как гидрофильные песчаники с поверхностями сорбированными

воду хорошо проницаемы для нефти.

Таким образом для определения эффективной проницаемости важно воспроизведение природных условий.

В ы в о д ы

1. За абсолютную проницаемость следует принимать экстраполированную на $P = \infty$ величину газопроницаемости /по Клиненбергу/ с учетом возможного искривления зависимости $K - \frac{1}{P}$ в области высоких давлений. Для некоторых хорошо изученных песчаников имеются корреляции $\phi - K$, которые можно использовать для введения поправок к единичным измерениям.

2. За эффективную проницаемость следует принимать проницаемость измеренную на данной жидкости при данных условиях. Эти условия должны быть оговорены при выдаче информации. Различают воздухопроницаемость, газопроницаемость, воздухопроницаемость, нефтепроницаемость. Можно выработать коэффициенты для пересчета из одних условий в другие.

3. Отношение эффективной проницаемости к абсолютной может быть названо относительной проницаемостью.

РОЗЕ В.Д.

ПРОНИЦАЕМОСТЬ И СКОЛЬЖЕНИЕ ГАЗА

ROSE W.D.

PERMEABILITY and GAS-SLIPPAGE PHENOMENA

Drilling and Production Practice, 1948,
p.209-217, 15 ref, 7 fig.

Перевод № 65, карт.677

Введение

Концепция скольжения газа при его ламинарном течении в капиллярных трубках—явление вытекающего из кинетической теории газов и известного со времени Максвелла /13/, привела Клинкенберга к ур-ию связывающему истинную K_L / и кажущуюся K_g / проницаемости:

$$K_g = \frac{K_L \beta}{\bar{P}} + K_L$$

где: β — постоянная для данной среды, зависящая от длины свободного пробега молекул $\bar{\lambda}$ и равная

$$\beta = \frac{4c\bar{\lambda}}{r} \bar{P}$$

где: $c \sim 1$; r — средний радиус пор; \bar{P} — среднее давление в среде.

Ур-ие /1/ основано на динамической аналогии пористой среды и пучка капиллярных трубок. Оно обосновано опытами Клинкенберга /1/ и подтверждено работами Круттера и Дея /2/, Кэлхауна и Востера /3/, Востера /9/. Отклонения от закона Дарси при ламинарном течении изучали также Ходжинс, Флуд и Деси /5/, Арнелл /6/ и Грюнберг и Ниссан /7/. Наиболее ранние работы в этом направлении принадлежат японским исследователям — Шамешиме /8/ и особенно Адзуми /4/, во многом предвосхитившим *выводы* Клинкенберга.

Целью настоящей работы является выявление необходимости учета явления скольжения при изучении относительной газопроницаемости. Кроме того будут рассмотрены некоторые аспекта поправки на скольжение.

Уравнение Адзуми

Адзуми основывается на том, что если длина свободного пробега молекул мала по сравнению с диаметром капиллярной трубки, то действительно уравнение Пуайзеля:

$$Q = \frac{\pi r^4 \bar{P} \Delta P}{8L\mu P} \quad \dots 2a$$

Если же длина свободного пробега велика, то имеет место течение по Кнудсену:

$$Q = \frac{4}{3} \sqrt{\frac{2\pi RT}{M}} \cdot \frac{r^3}{L} \cdot \frac{\Delta P}{P} \quad \dots 2b$$

Здесь:

Q - расход газа при давлении P

r, L - радиус и длина капилляра

μ - вязкость газа

ΔP - перепад давления

\bar{P} - абсолютное среднее давление

M - молекулярный вес газа

R - газовая постоянная

В области некоторых промежуточных давлений, когда длина свободного пробега молекул того же порядка, что и диаметр капилляра можно допустить:

$$Q = \frac{\pi r^4 \bar{P} \Delta P}{8\mu L P} + C \frac{4}{3} \sqrt{\frac{2\pi RT}{M}} \cdot \frac{r^3}{L} \cdot \frac{\Delta P}{P} \quad \dots 2c$$

C - безразмерный коэффициент близкий к 1.

Полагая, что пористая среда может быть заменена моделью из пучка капиллярных трубок состоящих из коротких трубок различного диаметра Адзуми пришел к уравнению:

$$\psi(Q) = \frac{\rho Q L \mu}{\Delta P A} = K_L \left(\bar{p} + \frac{32}{3\pi} \sqrt{2\pi} \frac{\mu c}{r} \sqrt{\frac{RT}{M}} \right) \quad \dots 3$$

где:

A - сечение среды

r - средний радиус

$$K_L = \frac{\pi r^4}{8A}$$

Согласно закону Дарси:

$$K_g = \frac{\psi Q}{\bar{p}} = \frac{\rho Q L \mu}{\bar{p} \Delta P A}$$

Тогда, принимая во внимание ур-ие /3/:

$$K_g = \frac{K_L}{\bar{p}} \left(\frac{32}{3\pi} \sqrt{2\pi} \frac{\mu c}{r} \sqrt{\frac{RT}{M}} \right) + K_L \quad \dots 4$$

Из ур-ий /1/ /1а/ и /4/, найдем:

$$\bar{\lambda} \sim 2.13 \frac{\mu}{\bar{p}} \sqrt{\frac{RT}{M}} \quad \dots 5$$

Из ур-ие /5/ не противоречит кинетической теории газов; так из закона распределения Максвелла следует /15/:

$$\lambda = 2.02 \frac{\mu}{\bar{p}} \sqrt{\frac{RT}{M}}$$

Ур-ие /5/ позволяет сформулировать условия, при которых кажущаяся проницаемость найденная при фильтрации различных газов будет одинакова:

$$\frac{\bar{p}_1}{\bar{p}_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2} \sqrt{\frac{T_1 M_1}{T_2 M_2}} \quad \dots 6$$

Адзуми представил результаты своих опытов в виде зависимости $\psi(\alpha)$ от \bar{P} . Таким образом тангенс угла наклона зависимости вычерченной по Адзуми эквивалентен отрезку на оси ординат графика Клинкаберга. Строя зависимость по Адзуми необходимо отнестись со вниманием к области низких давлений, в которой длина свободного пробега молекул велика по сравнению с расстоянием между стенками капилляра. С другой стороны при построении зависимости Клинкаберга должна быть соблюдена осторожность в области высоких давлений. Это позволяет заключить, что при детальных исследованиях полезно строить графики обоих типов с целью подтверждения тех или иных аномалий.

Так, на рис. 1 приведены данные Грюнберга и Ниссана /7/ перестроенные в координатах Адзуми и достаточно хорошо усредненные согласно ур-ию /3/. Между тем обычно эти данные на основании построений в координатах Клинкаберга рассматривают как несогласные с ур-ием /1/.

На рис. 2 приведены данные Арнелла /6/ в координатах Адзуми подтверждающие независимость проявлений скольжения от перепада давления.

Рис. 3 показывает, что данные Ходжинса с соавторами /5/ удовлетворительно укладываются на прямые линии по Клинкабергу в том числе и данные полученные в опытах с парами $C_2H_5/20$, обнаруживших по источнику гистерезис.

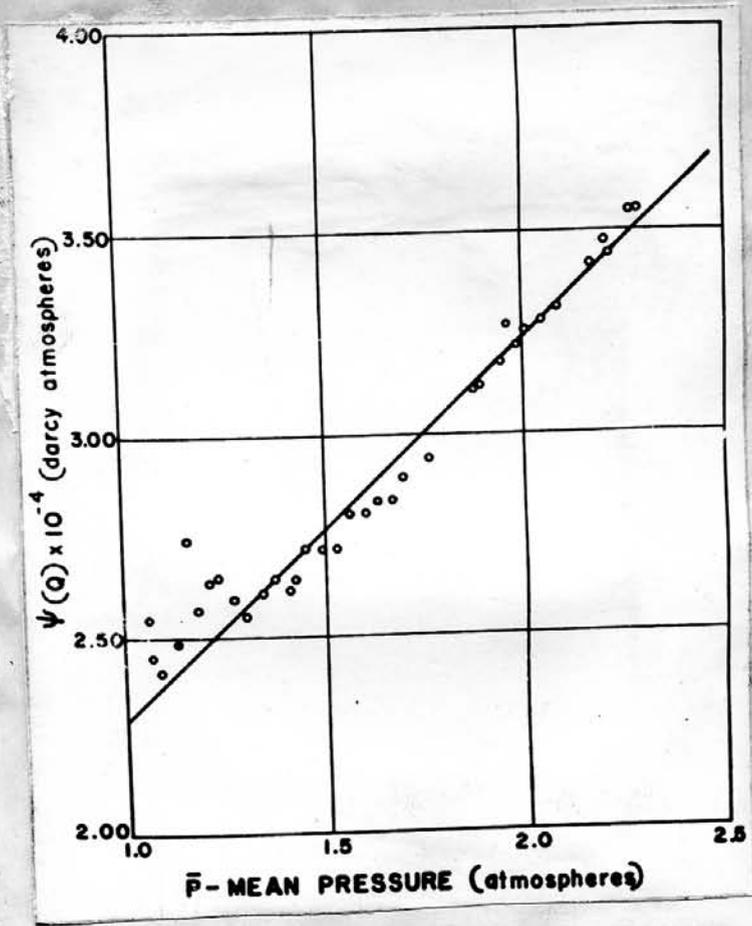


Рис.1 Зависимость кажущейся проницаемости от среднего давления в образце—данные Грюнберга и Ниссана в координатах, предложенных Адзуми.

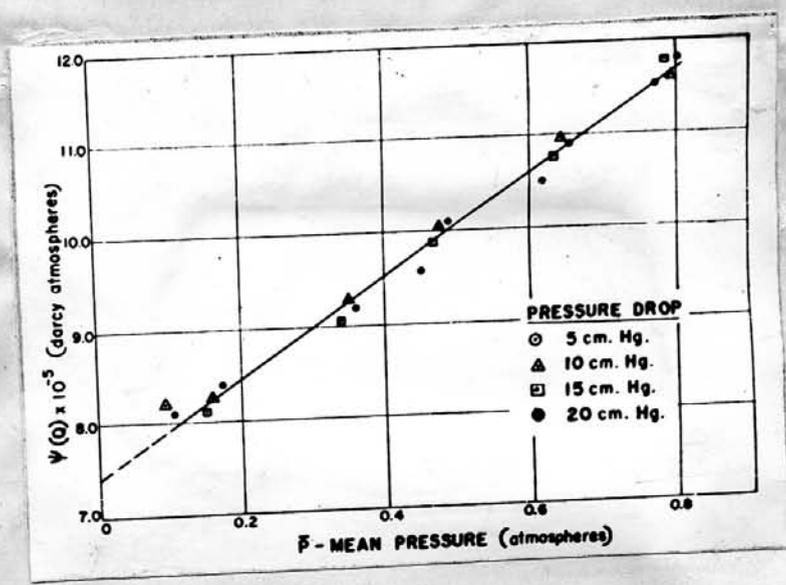


Рис.2 Зависимость кажущейся проницаемости от среднего давления в образце—данные Ариелла в координатах, предложенных Адзуми.

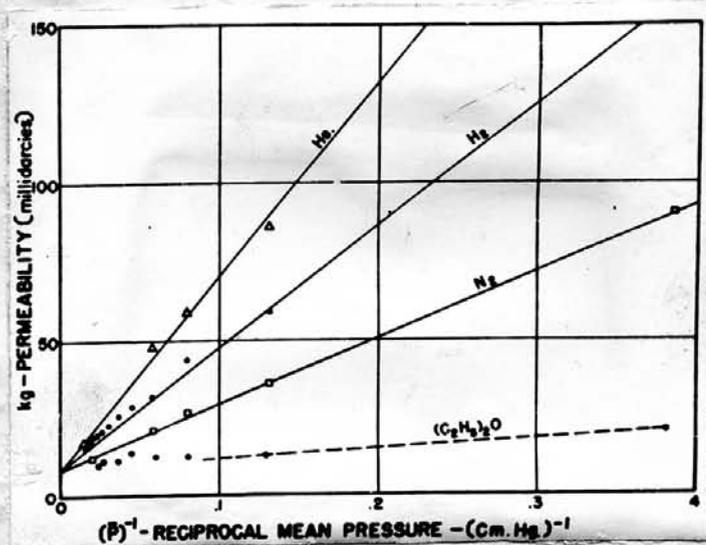


Рис. 3. Зависимость кажущейся проницаемости от среднего давления в образце-данные Ходженса с соавторами.

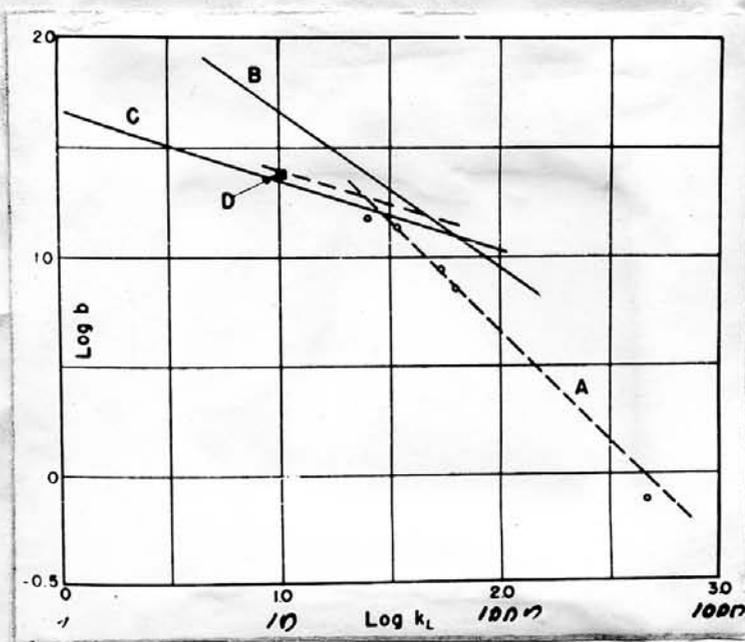


Рис. 4 Корреляция В - К /В-см. ртутного столба, К-мд./

Кривая А-данные полученные на искусственных образцах, кривая В-данные Круттера и Дзя /2/; кривая С-данные Юстера /9/, кривая Д-данные исследования того же типа, что и приведенные в табл. 2, точки отвечают данным приведенным в табл. 2.

Опыты автора

Результаты опытов автора с шестью образцами искусственной пористой среды и одним образцом песчаника приведены в таблицах 1 и 2. Образцы насыщали пластовой водой, затем снижали водонасыщенность медленным испарением и при различной насыщенности измеряли газопроницаемость, изменяя среднее давление в образце и устанавливая минимально возможные перепады давления; последнее обеспечивало сохранение равновесных условий между фазами в образце.

По данным таблицы 2 приведены графики $K = f(1/\bar{p})$ на рис. 5 и зависимость $lg v - lg K$ на рис. 4; на последнем для сравнения представлены результаты других исследователей. Как следует из таблицы 2 относительная газопроницаемость не зависит от среднего давления в образце с точностью в пределах экспериментальных ошибок.

На рис. 6 представлена зависимость относительной газопроницаемости образца песчаника от водонасыщенности, не обнаруживающая влияния давления и природы газа. На рис. 7 приведены прямые K от $1/\bar{p}$, пересекающиеся с осью абсцисс примерно в одной и той же точке для данного газа.

Все сказанное позволяет заключить, что при любом значении газонасыщенности эффективная газопроницаемость подчиняется уравнению Клинкенберга:

$$K_{eg} = \frac{K_{e\epsilon} v_{\epsilon}}{\bar{p}} + K_{e\epsilon}$$

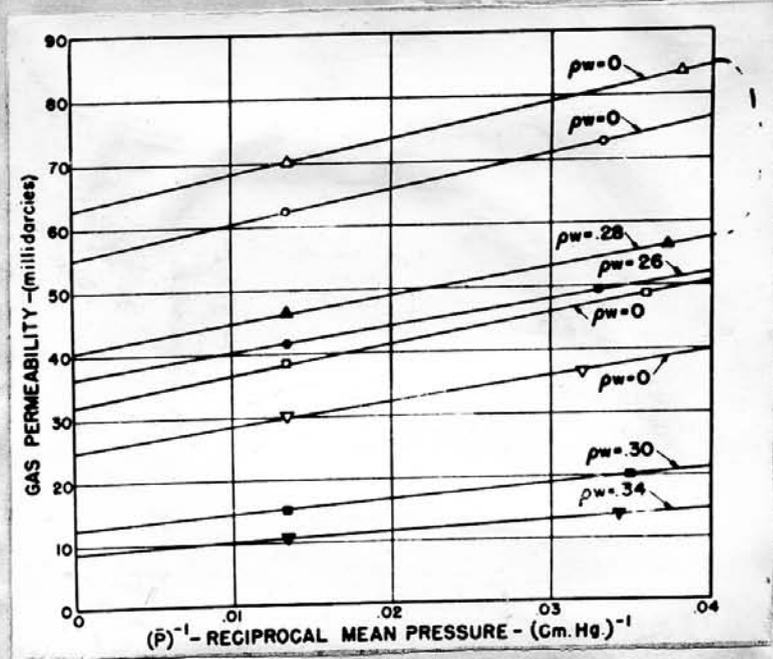


Рис. 5 Кривые кажущаяся проницаемости в зависимости от величины $1/\bar{P}$ при различной насыщенности /по данным таблицы 1/.

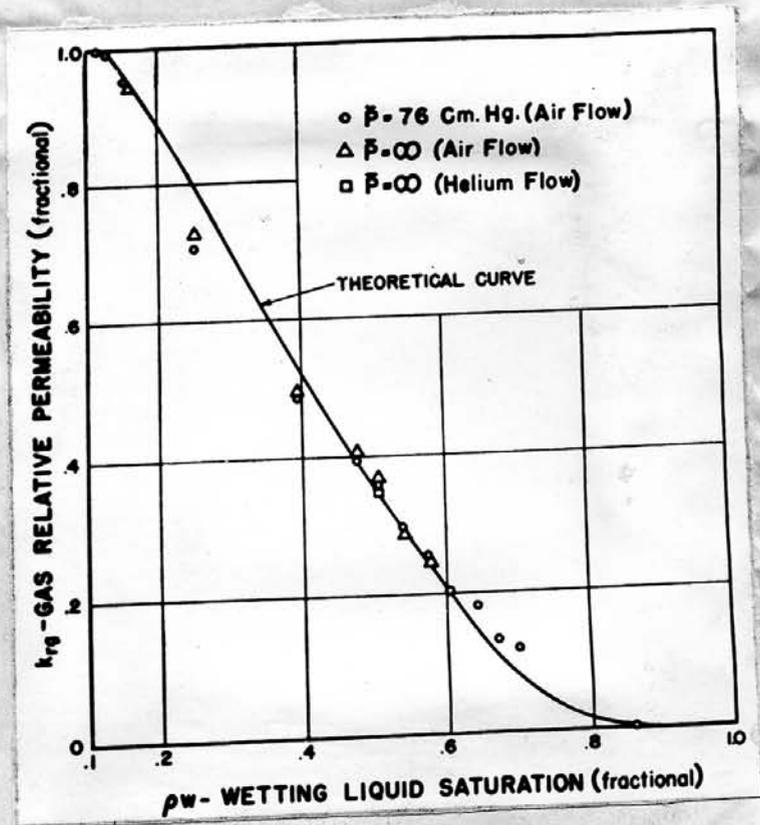


Рис. 6 Относительная газопроницаемость в зависимости от водонасыщенности по данным таблицы 2

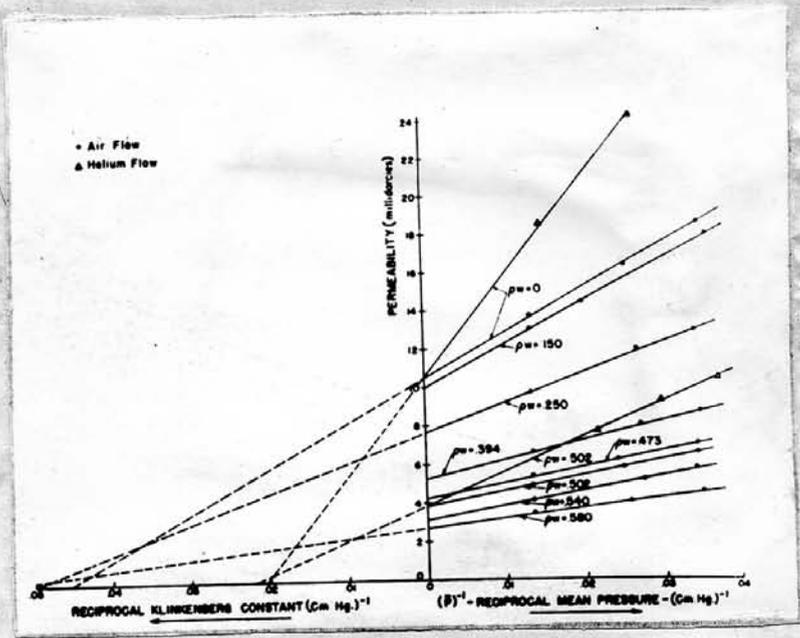


Рис. 7 Кривые кажущейся уд. и эффективной проницаемости в зависимости от величины $\frac{1}{P}$ по данным таблицы 2.

На графике показаны отрезки на оси абсцисс пропорциональные величине $\frac{1}{B}$.

где

$$b_e = \frac{4c\bar{\lambda}\bar{P}}{r_e}$$

Здесь: K_{eL} — экстраполированное на $P = \infty$ значение газопро-
цаемости K_{eg}

r_e — средний радиус пор насыщенных газом.

Из сопоставления ур-ий /1/ и /7/ следует:

$$K_{rg} = \frac{K_{eg}}{K_g} = \frac{K_{eL}\bar{P} + b_e K_{eL}}{K_L\bar{P} + b K_L} \quad \dots 8$$

Это ур-ие можно преобразовать:

$$K_{rg} = K_{rL} \left(\frac{r_e + 4c\bar{\lambda}}{r + 4c\bar{\lambda}} \right) \frac{r}{r_e} \quad \dots 9$$

или

$$K_{rg} = K_{rL} \frac{\bar{P} + b_e}{\bar{P} + b} \quad \dots 10$$

где

$$K_{rL} = \frac{K_{eL}}{K_L}$$

Эту величину можно рассматривать как относительную про-
цаемость по отношению к несмачивавшей жидкой фазе.

Полученные результаты позволяют упростить ур-ие /9/ и /10/

до:

$$K_{rg} = K_{rL}$$

Поскольку оказалось, что относительная газопроницаемость не
зависит от длины свободного пробега молекул. Таким образом можно
полагать, что $r_e = r$ и $b_e = b$ и, или, что величина $4c\bar{\lambda}$ мала по

сравнению с r_e и r . Последние условия действительно выдерживаются для коллекторов с проницаемостью выше 1 мд. При обычно встречающихся пластовых давлениях величины $4 c \lambda$ не превосходят 0,25 мк, тогда при $K=1$ мд $r = 1$ мк, но для хороших коллекторов $r = 10$ и даже 50 мк.

Эта аргументация приводит к выводу о том, что величина не может быть значительна. Еще Маскет /см. дискуссию по работе Клинкенберга/ заметил, что подобные рассуждения приводят к занижению величин δ по сравнению с экспериментальными. Это расхождение можно объяснить неполнотой информации о величинах влияющих на величину среднего радиуса в ур-ии для определения δ . Во всяком случае можно для осторожности заключить, что во введении поправки на скольжение газа при двухфазном потоке нет необходимости, тогда как эта поправка мала при однофазном потоке газа.

С другой стороны даже если при однофазном потоке поправка на скольжение значительна, то, как это показывает ур-ия /9/ и /10/, условие примерного равенства величин r и r_e , а также δ и δ_e приводит к пренебрежению поправкой на скольжение при определении относительной газопроницаемости при произвольно выбранном среднем давлении.

Некоторые теоретические соображения по рассматриваемому вопросу приведены в работе автора /11/.

Таблица 1. Результаты исследования синтетических образцов

δ	Кед. мд		Кед. мд		Кед. мд		Пористость	δ , см Н _г
	$\bar{P}=74$ см Н	$\bar{P}=25$ см Н	$\bar{P}=\infty$	Относительная проницаемость	1.00	0.222		
0.34	30.1	40.1	24.9	1.00	1.00	0.357	1.00	15
0.30	10.7	14.5	8.9	0.355	0.361	1.00	0.357	14
0.26	38.3	50.5	31.9	1.00	1.00	1.00	0.235	9
0.28	15.3	21.1	12.9	0.401	0.416	0.405	0.405	7
0.15	62.5	76.3	55.2	1.00	1.00	1.00	0.239	1
0.14	41.8	51.8	36.5	0.669	0.680	0.661	0.661	0.6
0.15	70.0	85.2	63.0	1.00	1.00	1.00	0.245	0.6
0.15	46.2	57.5	40.5	0.660	0.675	0.644	0.287	0.6
0.15	60.3	60.3	60.3	1.00	1.00	1.00	0.301	0.6
0.15	45.3	45.2	45.2	0.732	0.749	0.750	0.301	0.6
0.15	46.9	47.5	46.5	1.00	1.00	1.00	0.301	0.6
0.15	34.8	35.0	34.6	0.743	0.737	0.744	0.301	0.6

Таблица № 2. Результаты исследования песчаников

ΔW на возду- хе	$(\bar{p})^{-1}$, (см Hg) ²	$K_e, \text{мг}$	$(\bar{p})^{-1}$	K_e	$(\bar{p})^{-1}$	K_e	$K_{\text{г}} \text{ при } (p) = 0,135$	$K_{\text{ср.}} \text{ отрезок на оси К}$	$K_{\text{пл}}$	v_e см/мг
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0.0332	18.7	0.0270	16.8	0.0135	13.71	1.00	10.5	1.00	22.5
0.050	...	...	...	...	...	13.7	1.00	...	...	...
0.082	...	...	...	...	...	13.6	0.995	...	...	...
0.111	...	...	...	...	...	13.7	1.0	...	...	...
0.126	...	...	...	...	...	13.6	0.995	...	...	...
0.150	0.0367	18.0	0.0202	14.4	0.0136	13.0	0.950	10.0	0.950	22.5
0.250	0.0345	12.9	0.0267	11.9	0.0135	9.7	0.708	7.6	0.724	20.5
0.394	0.0350	8.65	0.0272	8.0	0.0134	6.6	0.483	5.2	0.495	19.0
0.473	0.0346	7.0	0.0242	6.2	0.0134	5.4	0.395	4.2	0.401	19.0
0.502	0.0345	6.55	0.0251	5.8	0.0135	4.9	0.358	3.85	0.365	20.3
0.519	...	...	...	...	...	4.7	0.346	...	...	...
0.7540	0.0342	5.7	0.0275	5.1	0.0135	4.1	0.299	3.1	0.295	23.8
0.578	0.0352	4.7	0.0257	4.0	0.0135	3.5	0.256	2.7	0.257	19.0
0.606	...	...	...	...	...	2.8	0.204	...	...	...
0.642	...	...	...	...	...	2.5	0.183	...	...	...
0.670	...	...	...	...	...	1.8	0.131	...	...	...
0.701	...	...	...	...	...	1.65	0.120	...	...	...
0.860	...	...	...	...	...	0	0	...	...	...
на гелии										
0				24.2	0.015	18.5	1.00	10.6	1.00	49.7
0.502	0.0375	8.2	0.0259	7.1	0.0195	6.3	0.350	3.90	0.368	46.0

Все величины проницаемости / K_e / даны как средние из 2-5 измерений выполненных при различных градиентах давления в пределах 0,1-2,5 см рт. столба. Влияния градиента не обнаружено. Расход газа ~ 1 мл/мин.

ХЭЙД Дж., Дж. Мак МАХОН, Р. НИЛЬСЕН и С. ЮСТЕР

ИЗУЧЕНИЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОРОД ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ
ОДНОРОДНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

HEID J.C., J.J. McMAHON, R.F. NIELSEN and S.T. YUSTER

Study of the Permeability of Rocks to Homogenous Fluids

Drilling and Production Practice, 1950, p. 230-
246, 7 ref, 9 fig.

Перевод № 66, карт. 755

Введение

Целью исследования являлось изучение проницаемости песчаников различных продуктивных площадей США и искусственных пористых сред, а также влияния давления, размеров пор и типа пород на результаты определения.

Для получения дополнительной информации, полезной для установления корреляций были произведены, помимо измерений необходимых для получения экстраполированных по Клинкенбергу величин проницаемости, также измерения пористости и определения среднего размера пор по скорости пропитки. Кроме того на части образцов были произведены прямые измерения жидкостной проницаемости на нефти, воде и водных растворах.

Работа была выполнена по заданию Подкомиссии правил № 27 АНИ.

Подготовка образцов.

Образцы имели форму цилиндров диаметром 1-2 см и были выбурены из керна алмазными коронками. Оси цилиндров располагались в плоскости напластования. После маркировки образцы экстрагировались в сокслетах нефтью в течение 48 часов и затем высушивались при 105°С в течение 24 часов. Высушенные образцы зачехлялись люцитом, для чего их помещали в цилиндрическую матрицу диаметром 1-³/₄" . Загружали в матрицу порошок люцита, вставляли плунжер и поднимали т-ру до т-ры 105°С при давлении 14 ат. Включали нагрев, поднимали давление до 70 ат и выдерживали это давление до тех пор пока т-ра не понижалась до 45°С. Извлекали зачехленный образец и алмазной пилой срезали торцы люцита. Образец осматривали при увеличении 20х и убеждались в отсутствии трещин, плотности

зачехления, отсутствии проникновения люцита в поры и чистоте торцов.

Определение пористости

Обработка образца алмазным инструментом обеспечивала возможность определения внешнего его объема вычислением по размерам. Для определения порового объема взвешивали сухой образец и образец насыщенный нефтью. Насыщение производили после вакуумирования образца до давления меньше 1 мм рт. столба. Быстро удаляли нефть с поверхности образца и помещали последний в сосуд с крышкой для взвешивания.

Из данных о весе сухого насыщенного образца и плотности нефти вычисляли поровый объем.

Определение скорости капиллярной проницки

Помещали образец на насыщенную пористую прокладку из х/б ткани или кисеи. Жидкость насыщающая прокладку засасывалась в образец капиллярными силами. Измеряли промежутки времени необходимые для появления жидкости на верхнем торце, покрытия жидкостью половины поверхности торца и наконец покрытия жидкостью всего торца. Среднее значение из этих трех определений принимали за время капиллярного поднятия жидкости.

Измерение проницаемости на жидкости

Кернодержатель состоял из двух люцитовых фланцев между которыми помещали зачехленный образец, герметезированный на торцах прокладки. Уплотнения достигали с помощью стяжных болтов. Фланцы имели отверстия для присоединения к источнику давления и приборам. Расход жидкости измеряли бюреткой или микропипеткой. Образец насыщали жидкостью под вакуумом так-же как и при опре-

делении пористости.

Использованная в опытах нефть характеризовалась как "гептан". Для подготовки ее фильтровали через колонку наполненную активизированным алюминием, силикагелем и активированным углем. Очищенную нефть тщательно деаэрировали.

При определениях на воде и водных растворах соли контролировали изменение проницаемости во времени.

Измерение воздухопроницаемости

Аппарат для измерений воздухопроницаемости при различных давлениях не отличался от описанного в работах /6/ и /7/. Выходное давление стабилизировали чувствительным регулятором, расход воздуха регулировали вентилем тонкой регулировки на выходе из образца и измеряли многопредельным реометром. Давление измеряли ртутным и водяным манометрами. При исследовании плотных образцов когда расход составлял менее $0,1 \text{ см}^3/\text{сек}$ использовали капиллярную пипетку с каплей воды в качестве поверхности раздела, что позволило измерять проницаемость до $0,005 \text{ мд}$.

Расчетные формулы

1/Соотношение между величиной δ и радиусом капилляра:

$$r_{\delta} = \frac{4c\lambda_m P_m}{\delta}, \text{ см} \quad \dots 1$$

где: $c \approx 1$.

λ_m - длина свободного пробега молекул при P_m , см.

r_{δ} - радиус капилляра, см

Для воздуха: $r_{\delta} = 0,376/\delta$ /вообще $\lambda_m P_m \sim \text{const}$!

2/Соотношение между радиусами пор, пористостью и проницаемостью:

$$r_p = 8,85 \times 10^{-6} \sqrt{\frac{K}{\mu}}, \text{ см} \quad \dots 2$$

K - проницаемость, мд;

χ - пористость, в долях единицы.

Это соотношение легко выводится из законов Пуайзеля и Дарси при допущении, что среда моделируется пучком капилляров постоянного радиуса.

Из сравнения ур-ий /1/ и /2/ следует, что " δ " обратно пропорционально корню из K . Это положение будет обсуждено при рассмотрении экспериментальных данных.

3/Соотношение между радиусом пор и скоростью капиллярной пропитки.

Комбинируя ур-ие капиллярного всасывания с ур-ием Пуайзеля найдем, что скорость капиллярного поднятия поверхности раздела в капиллярной трубке радиуса r_c составляет:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{r_c^2}{8\mu l} \left(\frac{2\gamma \cos \theta}{r_c} - \rho g l \right) \quad \dots 3$$

где:

γ - поверхностное натяжение;

θ - краевой угол;

μ - вязкость;

ρ - плотность;

g - ускорение силы тяжести.

Второй член биннома в скобках мал. Пренебрегая им и интегрируя найдем:

$$r_c = \frac{2\mu L^2}{\gamma \cos \theta} \cdot \frac{1}{t} \quad \dots 4$$

где t - время необходимое для вертикального перемещения поверхности раздела на высоту L .

В ур-иях /3/ и /4/ все величины имеют размерность в системе CGS.

Обсуждение результатов

Воздухопроницаемость. Было исследовано по методике Клиненберга 164 образца коллекторов и 11 искусственных образцов. Результаты измерений приведены в таблице 1 и 2. Для характеристики точности экстраполяции приведен рис.1 с графиками $K = f\left(\frac{1}{P_m}\right)$ для нескольких образцов.

На рис.2 представлена корреляция $K_L - b$; методом среднего /175 точек/ получена зависимость:

$$\underline{b = 0,777 K_L^{-0,39}} \quad \dots 5$$

Из ур-ий /1/ и /2/ следует, что показатель степени должен быть - 0,5. Расхождение вызвано в известной мере тем, что поровые каналы не являются цилиндрами постоянного сечения как это допускалось при выводе ур-ия /4/.

Значительный разброс точек может быть частично объяснен ошибками опытов, особенно ошибками в определении величин в принимающих иногда завышенные значения. Уже небольшие погрешности измерения K при различных давлениях могут привести к значительным ошибкам в определении b . Это особенно относится к высокопроницаемым образцам, когда поправка на давление является величиной того-же порядка, что и ошибка измерения K .

Основной причиной разброса точек является различие распределений пор. Так, если значительная часть фильтрационного потока движется по одному или нескольким непропорционально широким каналам, то коэффициент b для такого образца будет сильно занижен. Образцы с пониженной пористостью при данной проницаемости будут иметь заниженные значения b .

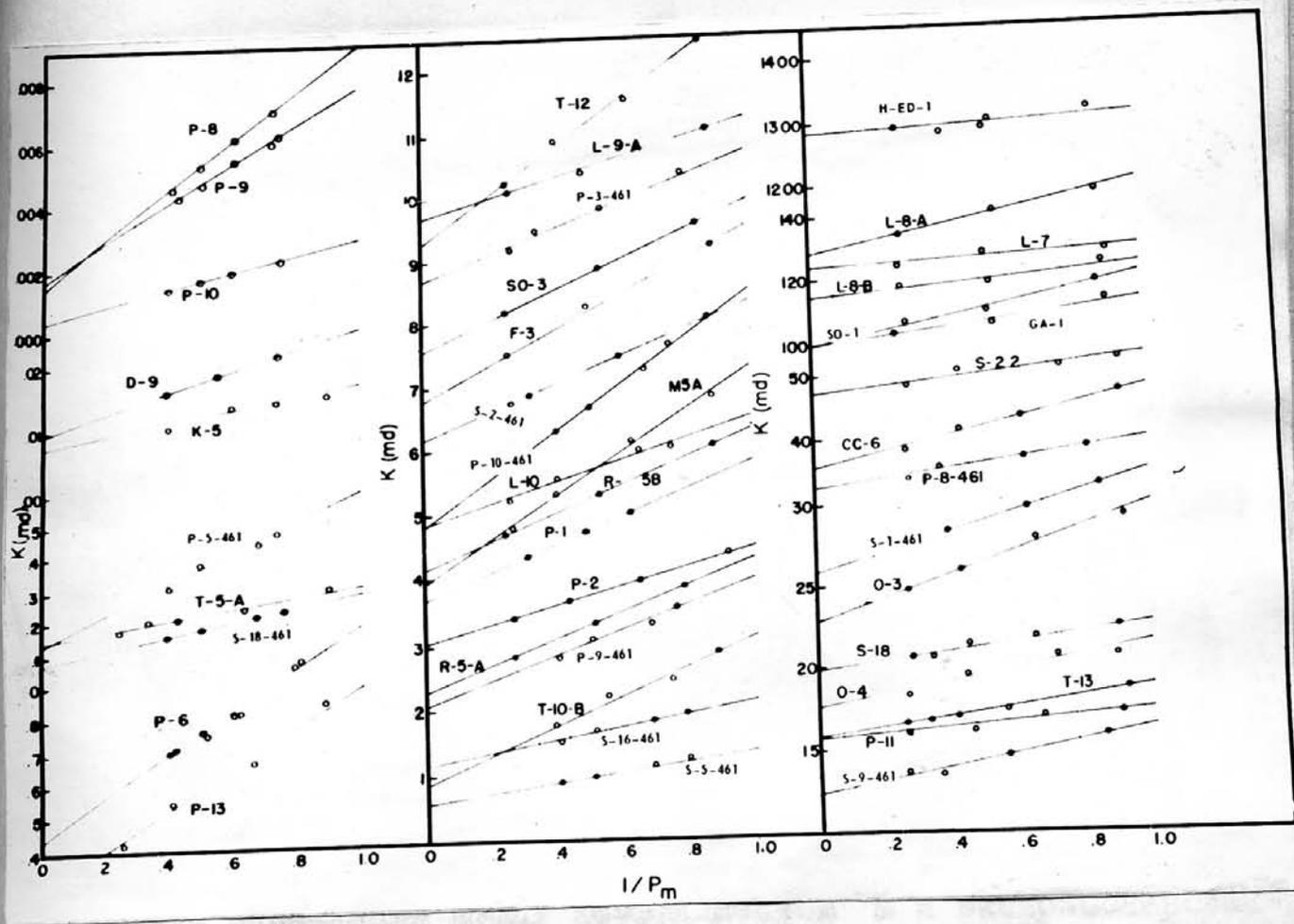


Рис. 1 Примеры экстраполяции проницаемости по Клинкенбергу

Для изучения причин значительной вариации δ были сопоставлены значения средних радиусов пор вычисленных тремя путями - по ур-ям /1/, /2/ и /4/.

Соотношение между r_c /уравнение 4/ и K_2 найденное методом среднего получено в виде:

$$\lg r_c = 0,609 \lg K_2 - 0,454 \quad \dots 6$$

На рис.3 представлено сопоставление отклонений $\lg r_c$ от величин вычисленных по ур-ию /6/ и отклонений $\lg \delta$ от величин вычисленных по ур-ию /5/. Отклонения не коррелируются.

Как указывалось и как можно заключить из ур-ий /1/ и /2/ образцы с пониженной пористостью при данной проницаемости должны иметь пониженные величины "б". Следует ожидать и обратного. Тогда если на рис.2 исправить проницаемость с учетом пористости то разброс точек вероятно уменьшится. Для изучения этой возможности было найдено соотношение между $\lg \delta$ и радиусом пор вычисленным по проницаемости и пористости:

$$\lg \delta = -0,8693 \lg r_f - 0,6062 \quad \dots 7$$

Сумма абсолютных отклонений экспериментальных величин $\lg \delta$ от величин вычисленных по ур-ию /7/ составляет 436,16, а от величин вычисленных по ур-ию /5/ составляет 381,93. Таким образом корректировка проницаемости по пористости не уменьшает расстояния величин "б".

На рис.4,5 и 6 представлены корреляции $r_c - r_f$; $r_c - r_f$; $r_c - r_b$. Эти корреляции также характеризуются большим разбросом. Из рис.4 следует, что средние значения r_b сравнительно близки средним значениям r_f .

Для оценки δ вариации проницаемости в куске породы было

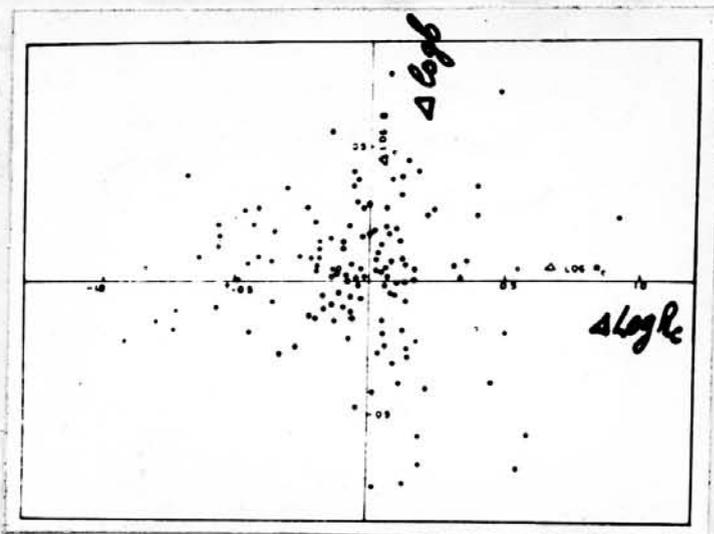


Рис.3 Сопоставление расхождений экспериментальных и вычисленных величин $\lg b$ и расхождений экспериментальных и вычисленных величин $\lg R_c$

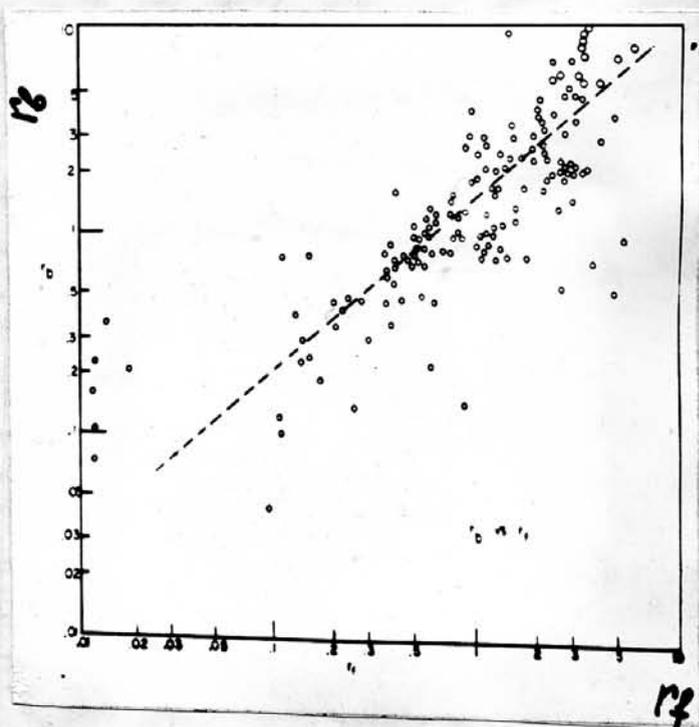


Рис.4 Корреляция $\lg b - \lg R_c$

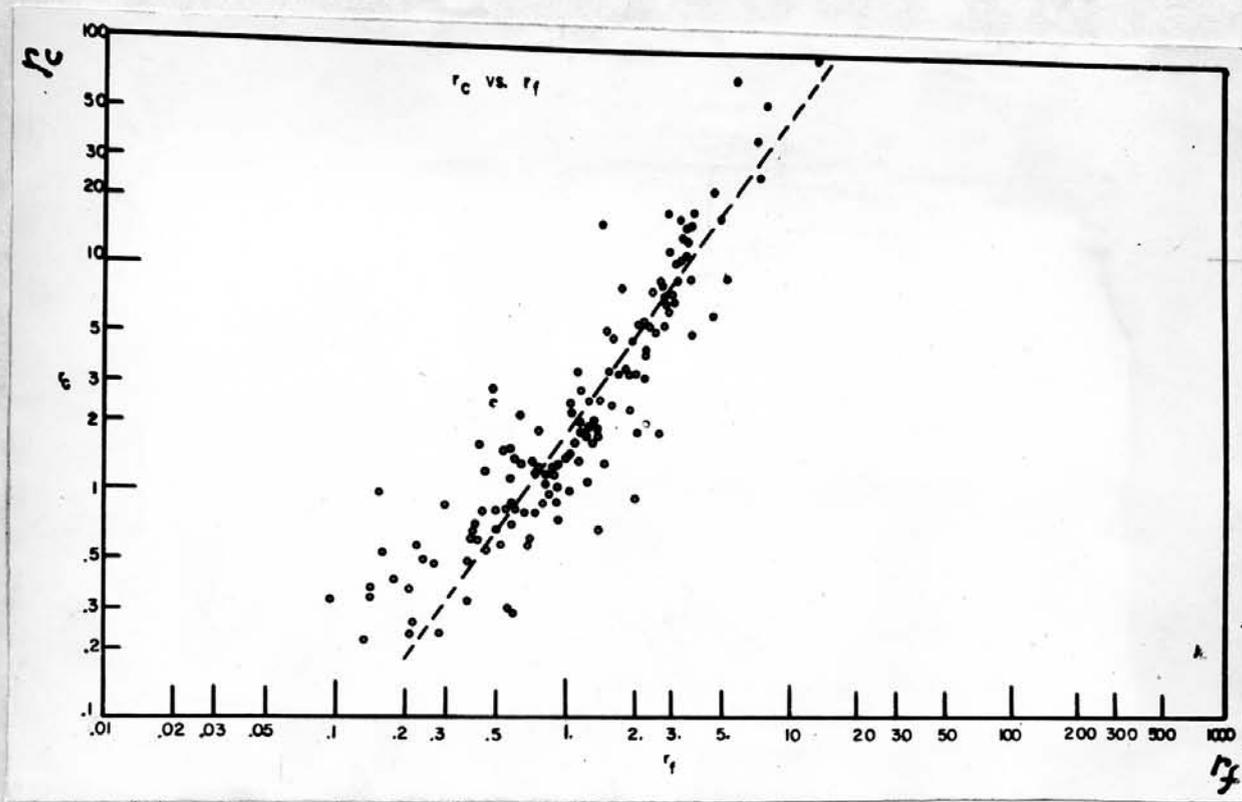


Рис. 5 Корреляция $r_c - r_f$

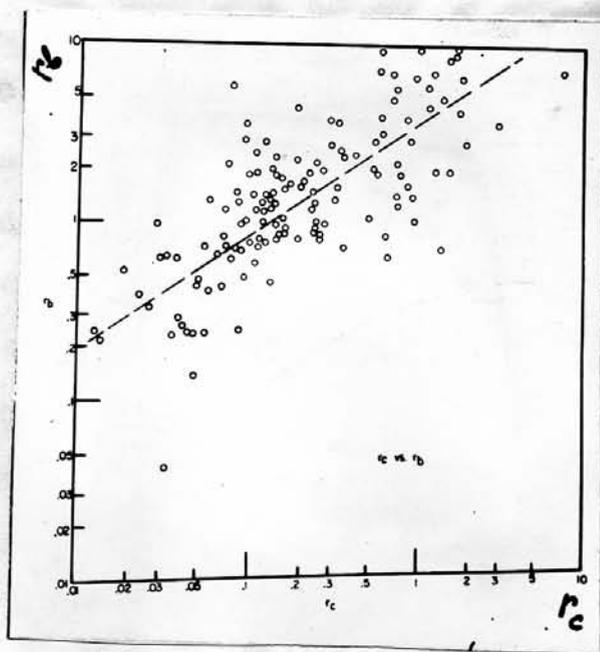


Рис. 6 Корреляция $r_c - r_c$

выбрано по одному образцу песчаника и искусственной среды, длиной по 5,5 см. Из этих образцов были нарезаны образцы длиной 0,8 см. Образцы нарезанные из песчаника имели проницаемость от 0,8 до 70,2 мд из искусственной среды от 3,37 до 1,31 мд., при этом образцы с крайними значениями проницаемости не принадлежали противоположным концам исходных кусков. На расстоянии в 2 см проницаемость изменяется больше чем на 100%.

Жидкостепроницаемость

В качестве жидкости не реагирующей химически с веществом пород была выбрана нефть.

Результаты определений на нефти выполненные на случайной выборке из 17 образцов приведены в таблице 3 и сопоставлены с проницаемостью K найденной экстраполяцией. Расхождения не превосходят ошибок определения.

Результаты исследования проницаемости на солевых растворах представлены на рис. 7-9 в виде графиков зависимости K от времени. На осях ординатах нанесены точки отвечающие величине K найденным экстраполяцией воздухопроницаемости. Отмечается асимптотическое снижение проницаемости со временем. При фильтрации воды наблюдается большие снижения проницаемости, чем при фильтрации солевого раствора. Начальная проницаемость в общем хорошо сходится с величиной K . Два искусственных образца также обнаружили затухание фильтрации.

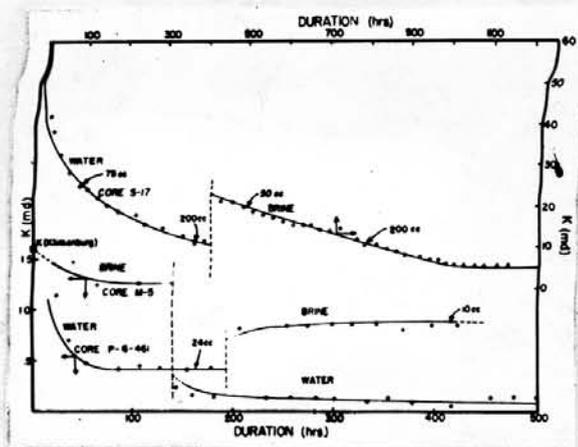


Рис. 7. Кривые изменения проницаемости в зависимости от времени для песчаников при фильтрации воды и соленых растворов.

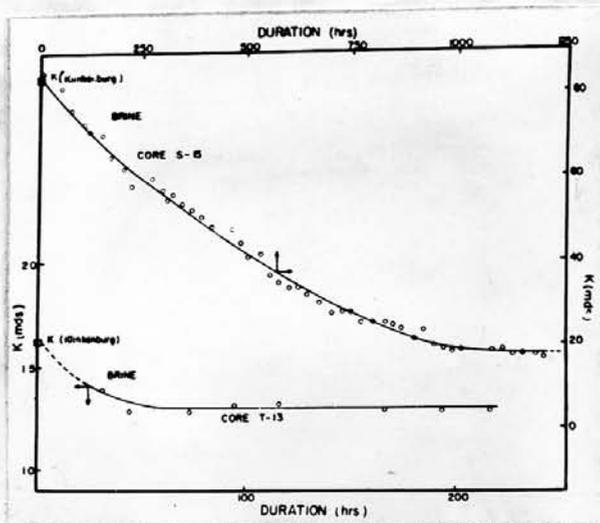


Рис. 8. Кривые изменения проницаемости в зависимости от времени для песчаников при фильтрации соленых растворов.

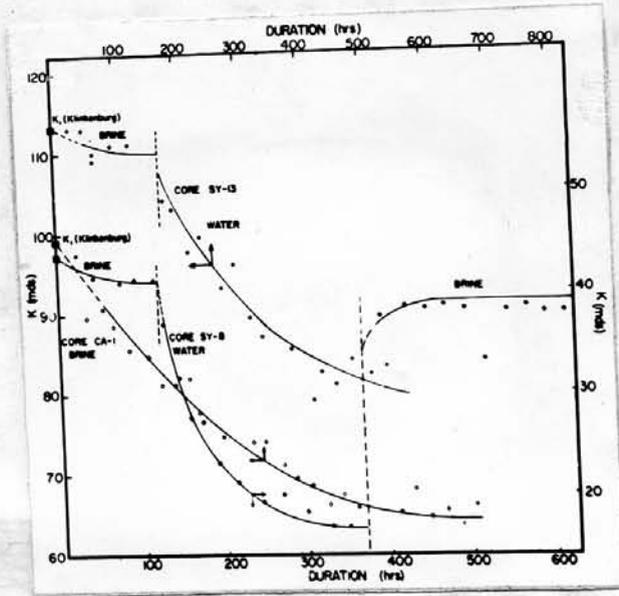


Рис.9 Кривые изменения проницаемости в зависимости от времени для одного природного и двух искусственных образцов насыщенных водой и раствором.

Броунскомб И.Р.

Обсуждение работы Хэйда Дж. с соавторами- Изучение проницаемости пород при фильтрации однородных жидкостей.

Приведена корреляция $K_L - b$ для песчаников Луизианы и Техаса /рис.1/

$$b = 0,840 K_L^{-0,30}$$

Для сравнения приведена корреляция Хэйда с соавторами.

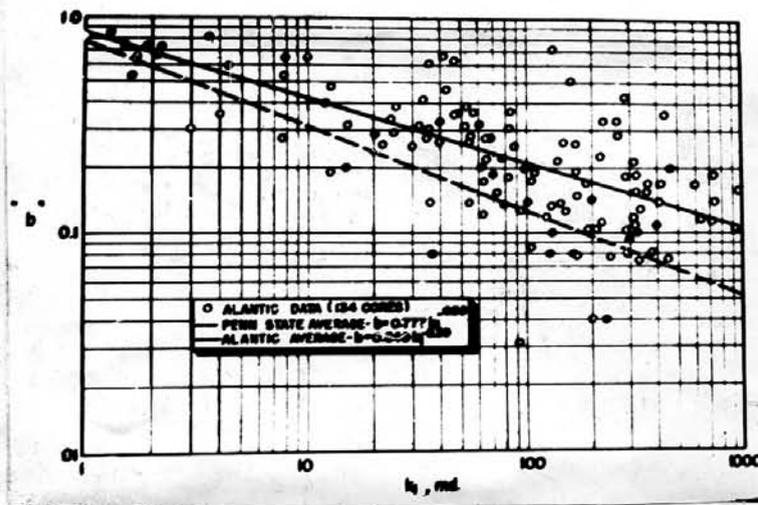


Рис. Корреляция между коэффициентом "b" и экстраполированной по Клинкенбергу проницаемостью.

Таблица I. Физические свойства песчаников Брэдфорд, графство
Мак Кин, Пеннсильвания.

К, мд	ρ	ν	$\rho_c, \text{мк}$
49,5	0.153	0.293	3.08
187	0.154	0.154	7.25
8.6	0.127	0.244	0.821
11.	0.142	0.318	1.25
0.135	0.104	3.407	....
2.3	0.123	0.609	0.632
27.	0.155	0.315	2.33
33.	0.132	0.394	2.60
2.1	0.118	0.857	0.488
4.85	0.121	0.773	0.915
26.	0.133	0.250	1.78
6.2	0.112	0.339	0.798
10.9	0.116	0.404	0.984
9.6	0.125	0.313	1.25
0.61	0.119	0.618	0.377
0.72	0.121	1.125	0.263
11.8	0.136	0.391	1.25
16.5	0.159	0.303	1.39
12.5	0.120	0.304	1.22
24.	0.164	0.417	2.29
21.	0.152	0.248	1.60
4.4	0.134	0.420	0.680
4.6	0.117	0.303	0.845
174.	0.183	0.205	7.79
12.	0.134	0.317	1.29
1.16	0.118	0.819	0.233
4.1	0.121	0.354	0.582
0.075	0.070	2.667	....
23.7	0.160	0.162	1.46
24.	0.150	0.521	2.09

Таблица 2. Физические свойства песчаников на нефти

K_e , мд.	:	β	:	b	:	ρ_c , мк
0.0072		0.028		1.05		∞∞∞
82.7		0.133		0.161		4.16
216.0		0.171		0.116		9.39
6.75		0.147		0.407		1.19
48.7		0.194		0.191		2.64
41.5		0.173		0.458		0.68
18.2		0.158		0.132		0.992
80.		0.187		0.525		3.56
21.5		0.129		0.395		1.40
67.5		0.203		0.359		4.95
85.5		0.157		0.105		0.95
532.0		0.205		0.0179		23.5
300.0		0.197		0.0467		15.0
87.5		0.167		0.0971		5.82
2.7		0.127		0.574		0.624
15.7		0.142		0.102		0.767
58.0		0.153		0.164		3.45
20.0		0.125		0.135		1.21
612.0		0.140		0.0525		75.6
323.0		0.151		0.0774		15.0
500.0		0.200		0.014		15.3
100.0		0.155		0.215		2.06
0.94		0.151		0.585		0.324
171.0		0.139		0.199		9.07
174.0		0.142		0.0892		10.9
366.0		0.163		0.0137		18.9
51.0		0.108		0.176		2.40
30.0		0.137		0.166		1.87
249.0		0.164		0.0562		11.8
256.0		0.174		0.0468		14.1
11.7		0.164		0.265		1.34
0.44		0.145		1.61		0.530
0.22		0.142		3.22		∞∞∞
167.0		0.203		0.0976		8.13
1,285.0		0.054		0.0272		96.8
∞∞∞		0.140		0.210		∞∞∞
17.7		0.224		0.0068		1.42
1,475.0		0.181		0.199		43.9
42.2		0.251		0.058		2.15
860.0						9.50

1	2	3	4
965.0	0.139	0.140	32.3
425.0	0.141	0.740	17.90
2.58	0.139	0.450	0.699
0.435	0.105	1.48	0.410
0.30	0.122	1.68	0.348
9.45	0.166	0.291	0.582
10.0	0.163	0.480	0.612
105.0	0.173	0.124	5.97
224.0	0.200	0.200	12.4
302.0	0.200	0.0761	13.7
0.0095	0.051	1.63	....
0.215	0.0052	2.02	....
0.54	0.010	0.841	....
0.0015	0.0081	5.07	....
0.0017	0.0091	3.50	....
0.00044	0.00044	5.30	....
91.0	0.103	0.725	1.86
10.25	0.200	0.326	2.29
15.7	0.208	0.484	1.83
7.95	0.184	0.495	1.57
7.2	0.198	0.417	1.55
9.6	0.208	0.490	1.42
1.35	0.208	0.933	0.575
2.8	0.118	0.518	0.840
1.6	0.140	1.310	0.878
4.0	0.143	0.826	1.28
21.0	0.149	0.452	2.56
85.0	0.171	0.432	6.23
272.0	0.137	0.540	13.7
201.0	0.120	0.194	5.34
28.7	0.133	0.237	1.68
25.5	0.131	0.245	1.93
145.0	0.151	0.179	7.22
112.0	0.129	0.303	7.22
2.3	0.115	0.870	6.677
4.2	0.122	0.512	0.710
7.6	0.156	0.368	1.39
0.60	0.111	0.836	0.234
0.25	0.202	8.80	0.338
10.1	0.332	0.506	0.985
92.0	0.165	0.0869	1.87
35.5	0.148	0.366	1.81
152.0	0.150	0.132	8.73
271.0	0.163	0.0388	16.6
27.5	0.169	0.142	2.94

1	2	3	4
47.5	0.162	0.116	3.55
65.0	0.130	0.138	4.88
119.0	0.133	0.193	7.83
92.5	0.123	0.200	5.45
88.0	0.116	0.0567	7.74
86.0	0.118	0.0232	5.45
56.0	0.097	0.241	3.22
52.5	0.180	0.171	1.38
181.0	0.146	0.0177	10.9
189.0	0.140	0.0664	11.2
214.0	0.134	0.0421	9.56
119.0	0.129	0.0672	7.15
124.0	0.129	0.0403	5.70
128.0	0.113	0.180	7.86
115.0	0.114	0.0783	6.92
9.70	0.093	0.155	1.04
11.8	0.091	0.212	1.00
4.90	0.112	0.336	0.73
99.5	0.191	0.136	3.59
67.0	0.212	0.134	5.34
84.0	0.221	0.238	8.21
119.0	0.256	0.151	3.42
58.0	0.211	0.043	16.1
1.30	0.078	0.492	...
2.35	0.109	0.702	...
22.0	0.103	0.522	1.11
0.145	0.064	0.9700	0.234
0.170	0.067	1.31	0.378
0.015	0.034	1.80	...
9.30	0.110	0.323	1.08
0.850	0.096	2.76	0.476
1.07	0.065	0.530	...
9.30	0.111	0.398	0.89
15.8	0.099	0.190	1.36
8.0	0.101	0.269	1.29
3.70	0.0916	0.568	0.30
3.05	0.095	0.458	2.43
4.20	0.101	0.381	0.29
2,110.0	0.268	0.023	58.3
276.0	0.253	0.058	18.0
330.0	0.242	0.0909	17.2
350.0	0.234	0.20	15.6
126.0	0.190	0.174	4.54
1.55	0.223	0.807	0.49
1,035.0	0.330	0.111	29.4
4.80	0.193	0.521	0.549
5.90	0.187	0.543	0.82
4.60	0.122	0.544	0.86

Таблица 3. Результаты исследования проницаемости образцов
на нефти

№№: ПП:	K_e , мД	K , мД / на нефти/	ΔP , ат	K_{ϕ} , мД
1	24.0	24.0	1.80	
2	20.0	20.2 19.5 19.7	0.29 0.83 1.26	19.80
3	26.0	26.3 25.1	0.095 0.055	25.70
4	18.5	15.8 15.6 15.6	0.73 1.37 1.78	15.70
5	27.0	24.7 24.6	0.59 1.16	24.65
6	41.5	41.1	0.20	
7	12.0	12.1 11.75	0.41 0.53	19.90
8	2.6	2.31 2.1	0.84 0.95	2.20
9	85.0	83.0	0.05	....
10	58.0	58.8 59.2	0.39 0.595	59.0
11	27.5	23.8 23.5	0.20 0.29	23.65
12	20.0	20.2 19.5 19.7	0.29 0.83 1.26	19.80
13	18.2	17.3	0.59	
14	49.5	47.3 50.6	0.13 0.41	48.9
15	33.0	32.0 32.1 33.3	0.98 0.41 0.22	32.50
16	24.0	24.5	1.80	....
17	45.5	45.4 45.9	0.18 0.60	45.65

ОЛЕ Э.Л.

**ВЛИЯНИЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РУДНЫХ ТЕЛ
В ИЗВЕСТНЯКАХ И ДОЛОМИТАХ.**

Часть 1. Сокращенный перевод № 63, карт. 717

OHLE E.L.

**THE INFLUENCE OF PERMEABILITY ON ORE DISTRIBUTION IN
LIMESTONE AND DOLOMITE.**

Economic Geology, vol. 46, № 7, Nov. 1951
pp. 667-706.

Работа Оле посвящена изучению проницаемости известняков и доломитов Восточного Теннесси предпринятому в целях выявления закономерностей распределения месторождений цинковой руды.

Перевод содержит лишь краткое описание аппаратуры и методики и, частично, обзор литературы посвященной изучению влияния различных факторов на отклонения от законов Дарси.

Аппаратура и методика

Устройство аппарата для измерения проницаемости на газе показано на рис.1. Аппарат состоит из баллона /1/, манифольда /2/ с вентилями и образцовым манометром на 2000~~0~~ или 200 ф.кв. д., регулирующего вентиля /3/, осушителя /4/, кернодержателя /5/ и газомера /6/. Детали устройства кернодержателя показаны на рис.2. Соединительные трубки высокого давления имеют внутренний размер 1/16".

Осушитель выполнен в виде толстостенного цилиндра с внутренним диаметром 38 мм и высотой полости в 300 мм. Для сушки использовали силикагель или хлористый кальций, благодаря большому об"ему этот сосуд играет также роль аккумулятора, облегчающего регулирование давление газа.

Кернодержатель представляет собой стальной цилиндр длиной 80 мм и наружным диаметром 62 мм. Рабочая полость кернодержателя имеет внутренний диаметр 32 мм. Способ присоединения трубопроводов к кернодержателю показан на рис.2.

Образцы как правило имели толщину 10 мм; половина образцов имела диаметр 25,4 мм, остальные-28,6 мм. Устройство кернодержателя позволяло вставлять образцы диаметром 28,6 мм и длиной до 15 мм. Желательно, чтобы разность диаметров расточенной части кернодержателя и образца составляла бы по меньше мере

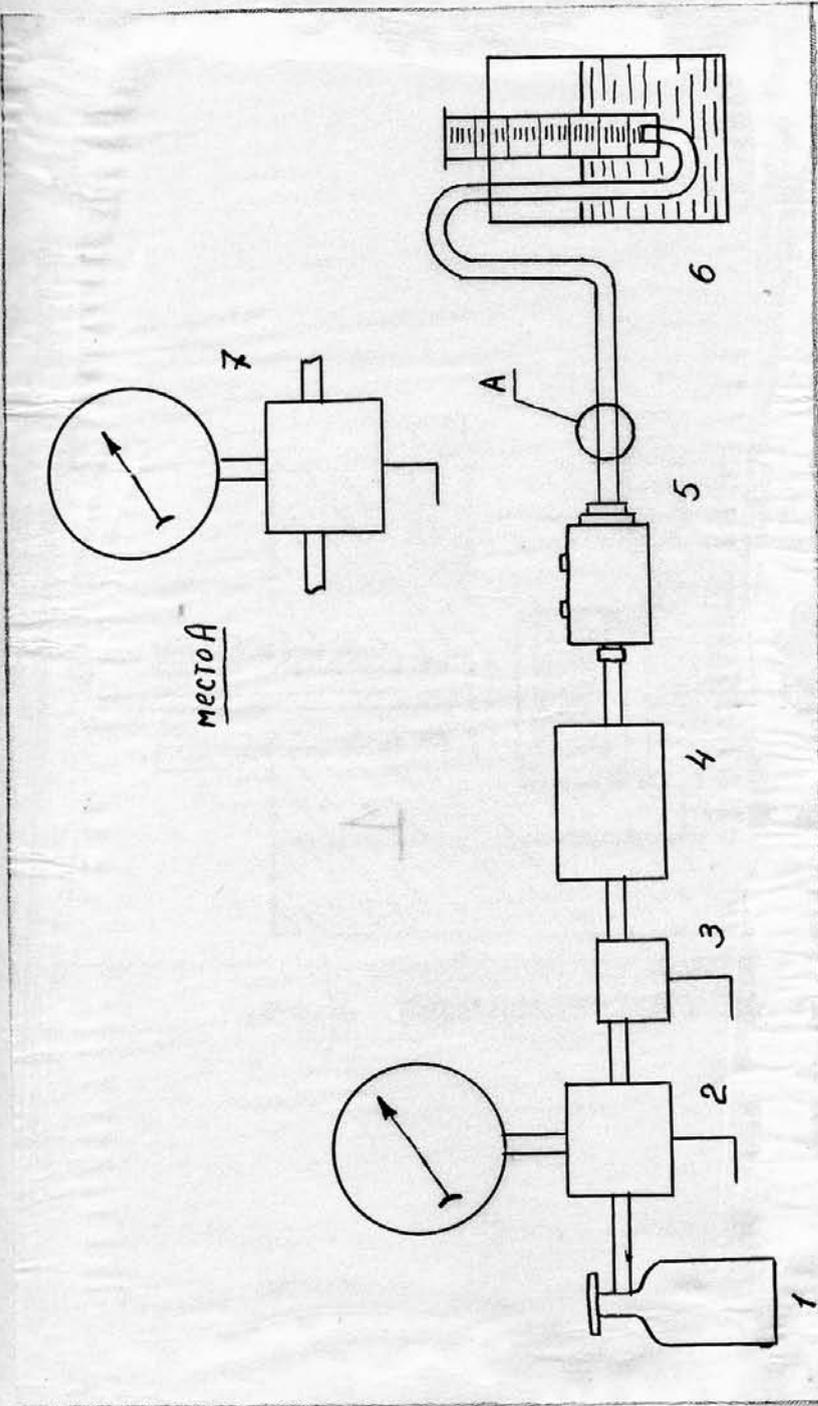


Рис. 1 Схема аппарата для определения газопроницаемости по Оле

1-баллон с газом; 2-манифольд с манометром; 3-вентиль; 4-сушигель; 5-кернодержатель; 6-газомер; 7-манифольд с манометром

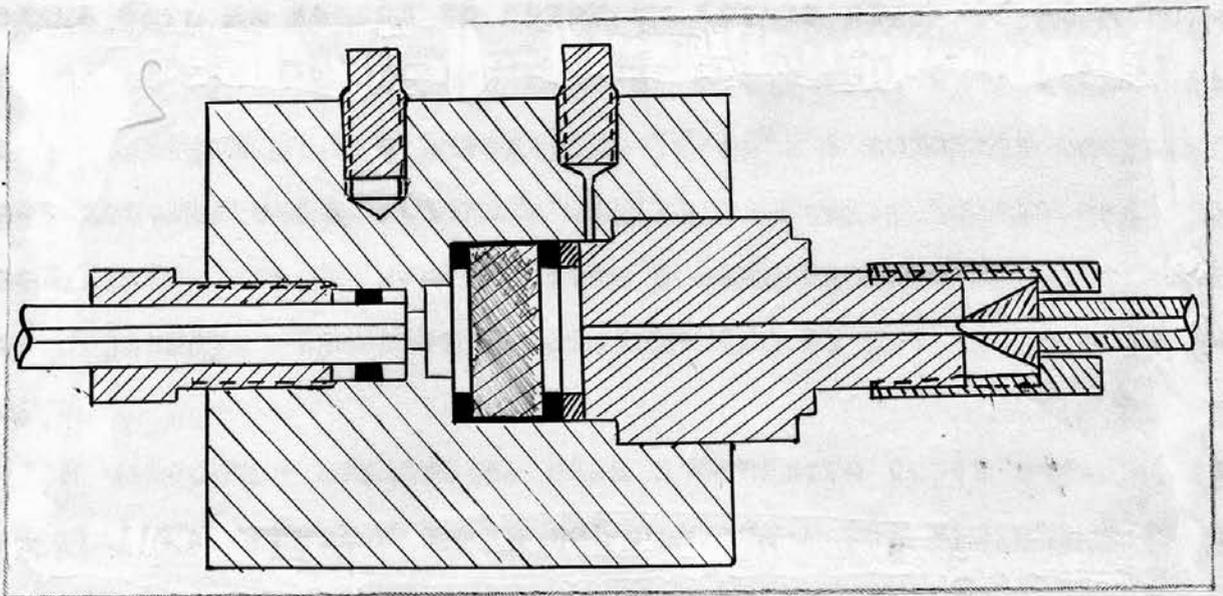


рис.2 Кернодержатель по Оле

3,2 мм, предпочтительнее 4,8 мм; иначе возникают затруднения при герметизации боковой поверхности образца.

После ряда испытаний остановились на следующем способе герметизации: боковую поверхность образца заворачивали в несколько слоев липкой ленты из целлона, затем образец вставляли в отверстие резиновой манжеты, наружный диаметр которой был равен внутреннему диаметру рабочей плоскости кернодержателя. Длина манжеты должна быть на несколько сотых мм больше длины образца. Торцы образца с краев уплотняли тонкими резиновыми прокладками, наружным диаметром 31,8 и внутренним 13/16". С выходной стороны образца дополнительно помещали медную прокладку. Надежность этого уплотнения была проверена путем вставления стеклинного диска имеющего размеры образца—при давлении 100 ат утечки не обнаруживалось.

Для измерения количества газа прошедшего через образец применяли градуированный цилиндр об"емом 100 и 250 куб.см. Для наименее проницаемых образцов в качестве газомера использовали бюретку. Перед измерением цилиндр или бюретку заполняли водой и помещали в опрокинутом виде в сосуд с водой. Газ поступающий из кернодержателя вытеснял воду из образца.

Перед помещением образца кернодержатель систему продували газом.

Продолжительность периода измерения назначали в пределах от 30 секунд до нескольких часов в зависимости от расхода жидкости.

Измерение расхода производили при давлении перед образцом в 20,40,60,80 и 100 ат. Обычно начинали измерение при 20 ат, затем увеличивали давление до максимума указанными ступенями и

повторяли измерения при снижении давления. Для очень плотных образцов приходилось повышать давление до 130 ат. На выходе образца, при данном способе измерения расхода газа, давление было равно барометрическому.

Если полученная зависимость между расходом и давлением представлялась нерегулярной, опыты повторялись. Около 10% образцов были подвергнуты контрольному определению.

Для выполнения измерения на разных газах заменяли баллон с газом, а затем производили продувку системы.

Для выполнения опытов при постоянном перепаде давления и переменном среднем давлении между кернодержателем и коллектором помещали манифольд с регулирующим вентилем и манометром /см. вставку на рис. 1/.

При фильтрации жидкости использовали аппарат показанный на рис. 3. Расход жидкости задавали прессом /1/, количество жидкости прошедшей образец контролировали с помощью градуированной капиллярной трубки /7/, имевшей об"ем в $0,0437 \text{ см}^3$ на 1 см длины. Между кернодержателем и капилляром помещали трехходовой кран /5/ с отводом на второй трехходовой кран, допускающий присоединение вакуум-насоса и источника жидкости.

Поскольку узлы аппарата имели те же присоединительные размеры, что и у аппарата для измерений на газе, было возможно, после выполнения серии измерений на различных газах переносить кернодержатель с образцом, не вынимая последний, в аппарат для измерения расхода жидкости.

С помощью описанной аппаратуры можно было определять проницаемость в пределах от 10^{-2} до 10^{-7} мд. Было исследовано 146 образцов известняков и доломитов при различных условиях. Наиме-

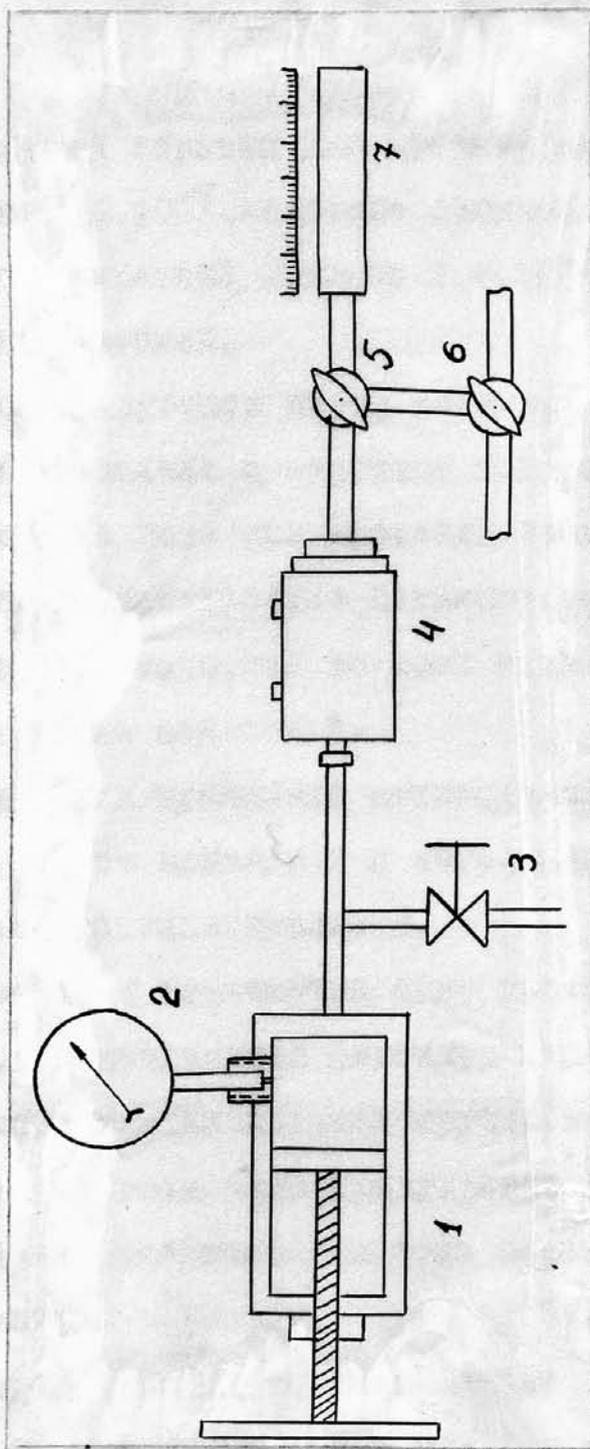


Рис. 3 Схема аппарата для определения вязкости-проницаемости по Оле.

1-Пресс; 2-Манометр; 3-Вентиль для заполнения; 4-кернодержатель;
5-6-Трехходовые краны; 7-капиллярная трубка-расходомер

нее проницаемый образец /не метаморфизованный известняк/ имел проницаемость $6 \cdot 10^{-7}$, наиболее проницаемый /глубококристаллический /глубококристаллический доломит $2,4 \cdot 10^{-2}$. Всего было выполнено около 1000 измерений.

Влияние упругости паров воды при данном способе измерения расхода не приводило к заметным погрешностям.

Охлаждение газа при дросселировании не играло большой роли вследствие сравнительно большого объема системы и малых расходов. Можно полагать, что во всех опытах температура газа в образце была равна комнатной.

За вязкость принимали вязкость при 20°C ; колебания температуры на 10° не приводили к погрешностям свыше 2%. Точно также не учитывали влияние давления.

Манометры и термометры были проверены, их ошибки не превосходили 1%. Измерительные цилиндры также были проверены соответствующим образом. Капиллярная трубка использованная для измерений объема жидкости была градуирована путем заполнения ртутью и взвешивания. Измерение размеров образцов производили с помощью микрометра.

В опытах с водой имелась возможность выделения растворенного газа в виде пузырьков в образце в результате снижения давления при фильтрации. При этом пузырьки оставались в породе, блокировали каналы и снижали расход. Во избежание этого обычно использовали свежекипяченную дистиллированную воду. Для проверки приготавливалась дистиллированная вода по методике Казагранде и Фудума. Однако особой разницы замечено не было.

Способ заделки образца приводил к погрешностям в определении эффективного сечения образца. За эффективный диаметр прини-

мали диаметр неуплотненной части сечения, контролируемый по следам оставляемым резиновыми прокладками. Выходной и Входной диаметры иногда не совпадали.

При сравнении измерений выполненных при различных условиях на одном и том-же образце эти погрешности не сказывались.

Вообще же погрешности из-за неточного определения сечения составляли до 25%.

Результаты измерений представлялись в виде графиков $K = f(p)$ для газов, то-есть по Клинкенбергу.

Краткий обзор работ посвященных оценке влияния скольжения газа, полученные результаты

Вывод уравнений для определения проницаемости и история разработки теории измерения проницаемости до 1937 г приведены в работах Клоу /5/ и Маскета /13/. В 1941 г появилась работа Клинкенберга /10/ показавшего, что газопроницаемость зависит от среднего давления в образце. Клинкенберг изучал фильтрацию воздуха, водорода, углекислоты, азота и изоктана через фильтры из пористого стекла при различных значениях перепада давления и среднего давления в образце. Его данные ясно показали, что при увеличении давления среднего давления в образце газопроницаемость уменьшается и стремится достичь предельного минимального значения при бесконечно большом давлении. Зависимость между проницаемостью и инверсией среднего давления является почти прямой; при экстраполяции зависимости до $\bar{p} = \infty$ проницаемость принимает значение жидкостепроницаемости.

При равных средних давлениях величина проницаемости зависит от природы газа; с уменьшением молекулярного веса газа проницаемость увеличивается. Поправка на скольжение тем больше, чем

меньше проницаемость.

Надежность поправки Клинкенберга была подтверждена Маскетом /12/, Кэльхауном и Встером /3/ и др. авторами.

Сен Гупта и Тсейн Ньюин /17/ независимо от Клинкенберга обратили внимание на влияние давления и природы газа, в связи с влиянием их на длину свободного пробега молекул. В отличие от Клинкенберга авторы эти предложили вводить поправку на вязкость, что позволяет исправить результаты, хотя и другим путем.

Некоторые исследователи не подтвердили результатов Клинкенберга. Гринберг и Ниссан /7/ опубликовали результаты опытов фильтрации воздуха, дистиллированной воды, двухпроцентного амиллового спирта и водных растворов хлористого натрия 0,96 Н и 0,614Н через фильтры пористого стекла, песчаники и известняки из которых следует, что никакой корреляции между газом и жидкостепроницаемостью не обнаружено. Эти авторы полагают, что величина проницаемости зависит не только от вязкости, но и от плотности и поверхностного натяжения жидкости, среднего размера пор и сорбционной способности пористой среды.

Достаточных подтверждений правильности точки зрения Гринберга и Ниссана в литературе не найдено.

---- " ----

Данные Оле хорошо подтверждают выводы Клинкенберга. Однако в ряде случаев величина β оказалась непостоянной, но увеличивающейся с увеличением давления, в результате чего кривые K в зависимости от величины обратного давления оказались слегка выпуклыми. Такое искривление допускалось и Клинкенбергом, объяснявшим отклонение зависимости $K - \frac{1}{P}$ от линейной тем, что породы содержат поры, размеры которых весьма близки к

длине свободного пробега молекул, вследствие чего теория Кундта-Варбурга /11/ к ним не применима. С увеличением давления все больше и больше пор становится достаточно близкими к длине свободного пробега молекул, вследствие чего поправка возрастает. Кроме того, как это заметили Кэльхаун и Юстер /3/ размеры каналов не постоянны по длине. Кэльхаун и Юстер представили детально обсуждение причин вариации величин δ и заметили, что основой расуждения Клинкенберга является допущение того, что величина δ достигает максимума при низких давлениях, в то время как справедливо скорее предположение, что при низких давлениях δ достигает минимума.

Типичные графики $K - \frac{1}{\rho}$ полученные Оле представлены на рис. 4 и 6. Эти зависимости обнаруживают точку перелома. Экстраполяция участка кривой в области высоких давлений дает результаты лучше приближающиеся к проницаемости измеренной при фильтрации жидкости. Сма Клинкенберг /частное сообщение/ полагал, что перелом кривой происходит при давлении, при котором длина свободного пробега приближается к среднему диаметру пор и что при этом давлении переход от Пуайзелевского течения к Кнудсеновскому происходит в наибольшем числе пор. Это следует также из работы /15/.

Грэнберг и Ниссан /7/^{ТАКЖЕ} заметили, что проницаемость при высоких давлениях уменьшается. Они об"яснили увеличение расхода при низком давлении возникновением субвязкого потока. Зависимость расхода от перепада давления для большинства образцов восточного Теннесси подтверждает наличие субвязкого потока или другой причины вызывавшей увеличение расхода при давлении ниже 20 атм. Иногда наблюдаются две точки перегиба, одна при давлении

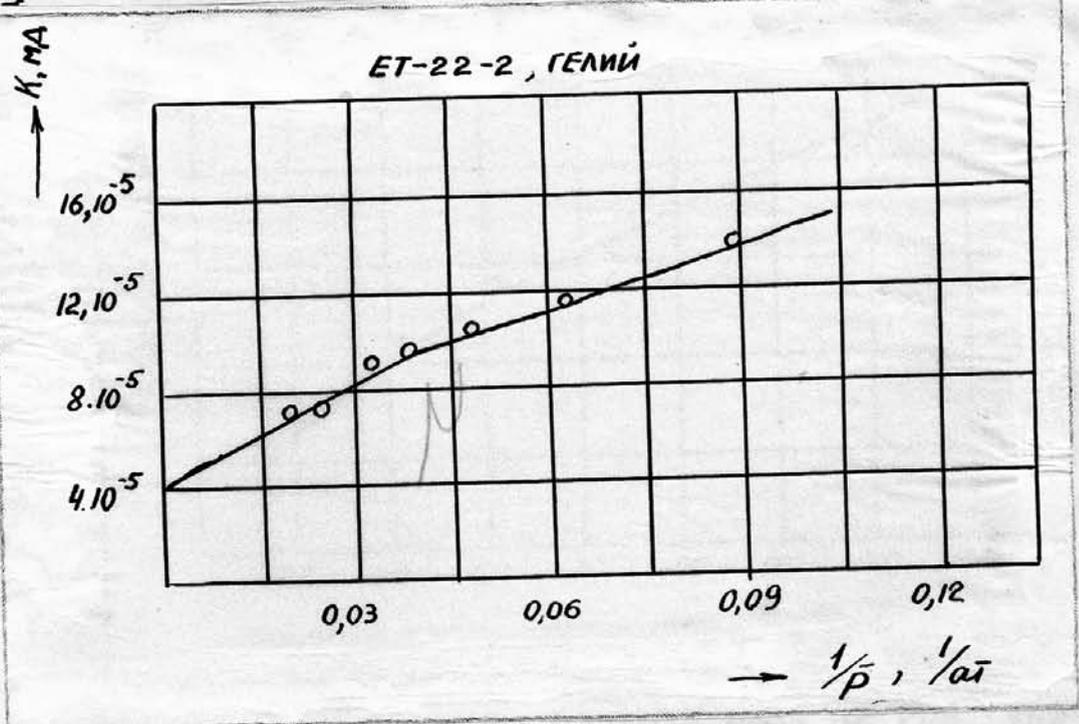
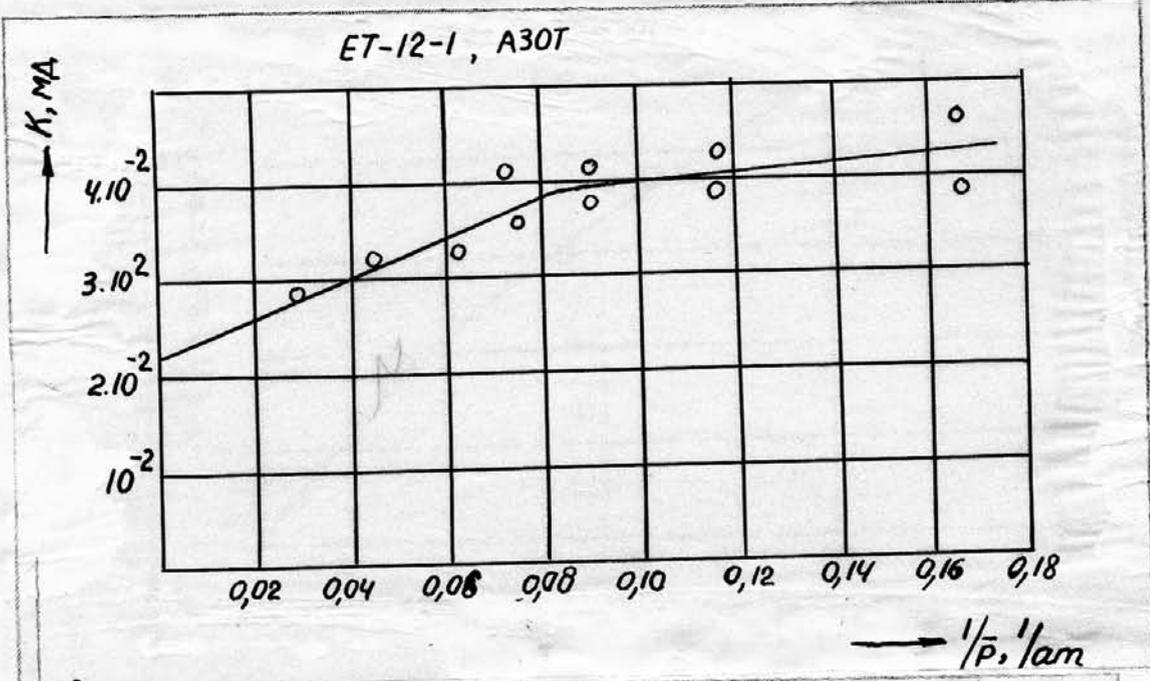


Рис.4 Зависимость $K - \frac{1}{p}$

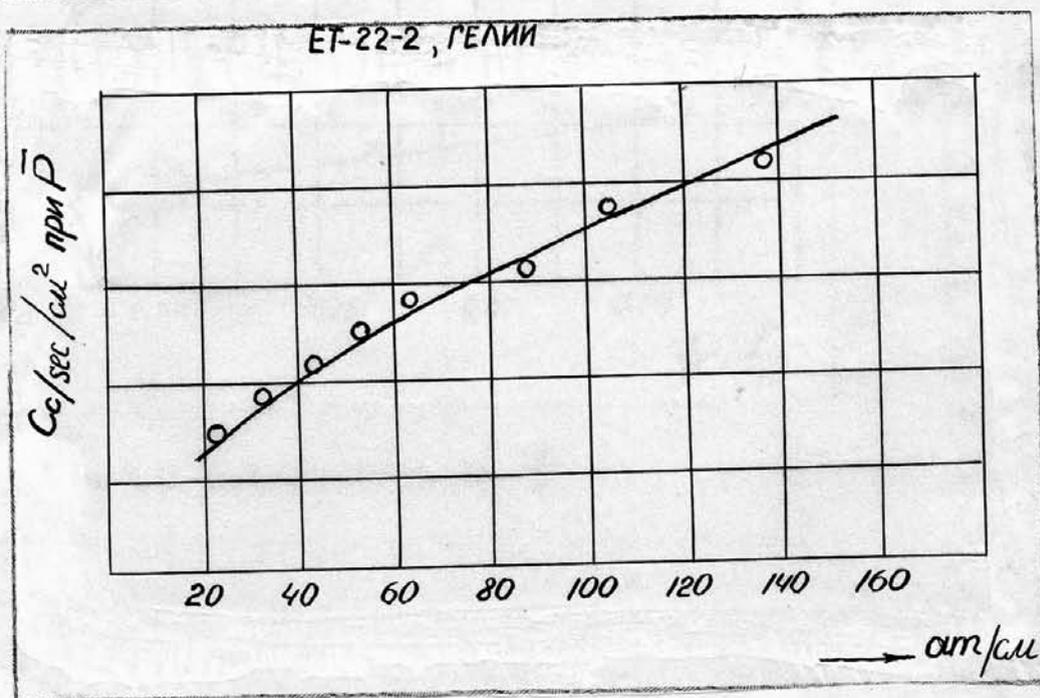
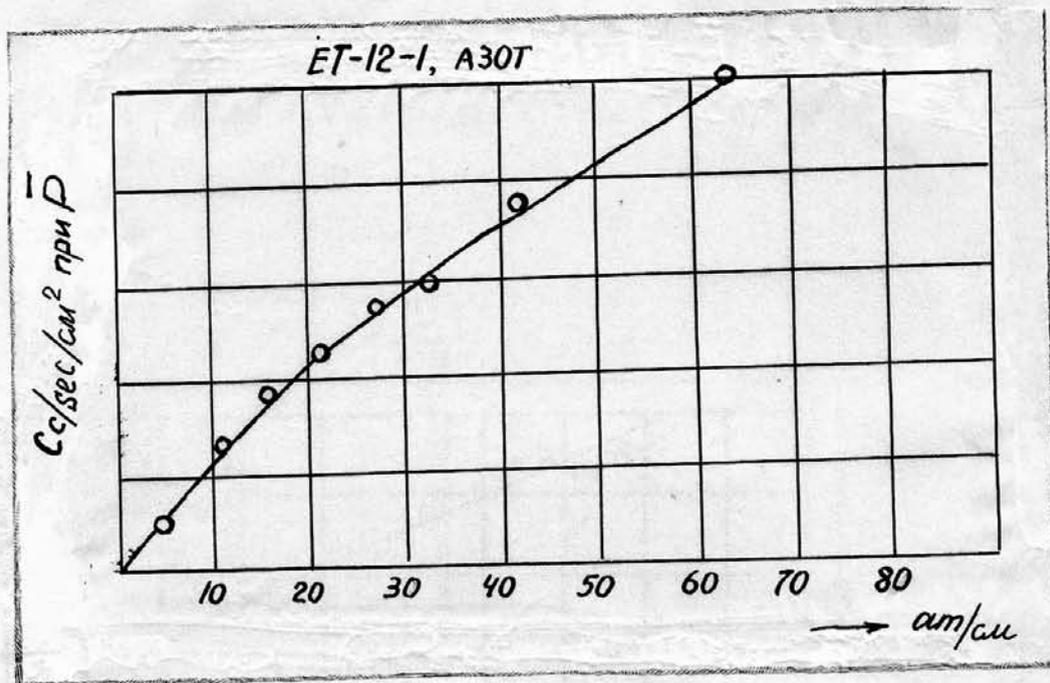


рис. 5 Зависимость расхода газа от градиента давления

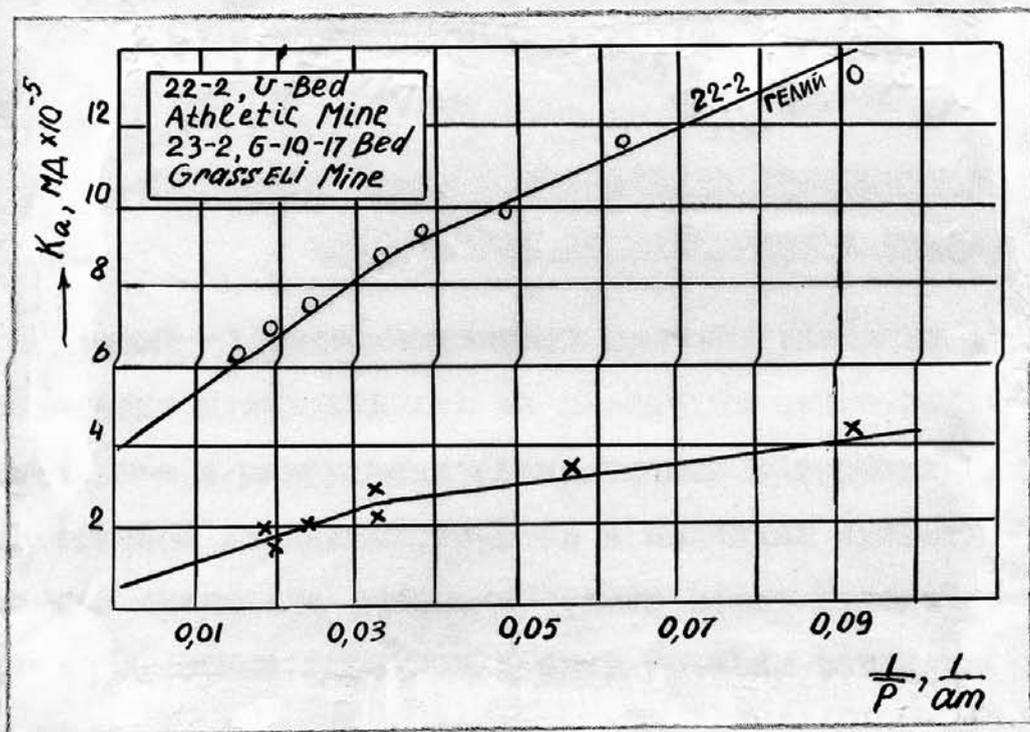


Рис.6 Зависимость $K - \frac{1}{p}$

ниже 20 атм, а другая при некотором промежуточном давлении. Последняя точка отвечает излому, в связи с изменением коэффициента скольжения. Наличие перегиба в области низкого давления и плавное изменение тангенса касательной показывает, что имеется некоторый фактор, вызывающий увеличение расхода на единицу перепада давления скорее в этой области, чем в области высоких давлений.

Причины различия результатов измерения проницаемости
выполненных на жидкостях и газах.

Помимо эффекта скольжения причина различия результатов определения проницаемости на различных жидкостях и газа может заключаться в разбухании глин, влияния абсорбции и явлений поверхностного натяжения, то-есть в явлениях связанных с природой пористой среды или взаимодействием между породой и фильтруемой жидкостью; кроме того могут быть причины зависящие от свойств жидкости.

Хотя в лабораторных условиях можно измерить абсолютную и истинную проницаемость породы вряд ли можно ожидать, что в условиях лабораторного эксперимента воспроизводятся природные условия. Условия фильтрации воды или природного газа через чистый песчаник приближаются к идеальным, но если через чистые песчаники фильтруется смесь газа, нефти и воды, то вряд ли следует отнестись к результатам опытов выполненных на газе не критически. Взаимодействие между жидкостью и породой сильно искажает результаты определения. Если через такие химически активные породы как известняки фильтруется активная же рудообразующая жидкость, то наблюдается непрерывное длительное измерение проницаемости; в процессе диагенеза породы может обладать данной абсо-

льной проницаемостью лишь в течение некоторого весьма короткого промежутка времени.

Таким образом как считает Юстер /18/ проницаемость пород следует определять лишь на пластовых жидкостях. Мы рассмотрим некоторые частные вопросы.

Разбухание глин.

Джонсон и Биссон /8/ заметили, что величина отношения проницаемостей определенных на дистиллированной и соленой водах существенно различается для образцов, отобранных по обе стороны зоны контакта чистых и глинистых песчаников. Отношение же проницаемости воздуха к проницаемости на соленой воде не обнаруживает значительных изменений.

Оле представил результаты исследования образца известняка выполненные на гелии, азоте, дистиллированной воде, 1Н и 4Н-растворе хлористого натрия. На дистиллированной воде выполнено 2 опыта-до фильтрации растворов и после. Для этого образца экстраполированные значения проницаемости на азоте и гелии составляют соответственно $1 \cdot 10^{-3}$ и $1,1 \cdot 10^{-3}$ мд. Первое испытание на дистиллированной воде дало $4,6 \cdot 10^{-4}$, испытания на соленой воде $4,5$ и $4,4 \cdot 10^{-4}$ мд и последнее испытание на дистиллированной воде $3,0 \cdot 10^{-4}$.

Адсорбция

Адсорбция фильтруемой жидкости или газа стенками капилляров приводит к уменьшению проходных сечений и снижению расхода.

Уэнтворс /18/ фильтровал воду через трещины в образцах лавы и нашел, что расход воды с течением времени уменьшается иногда до 0,001 от начального значения-величины отвечающей

формуле Гагена-Пуайзеля. Период достижения стабильного расхода занимал иногда несколько суток. Резкие изменения давления и другие возмущения прекращают затухание, но с восстановлением установившегося потока затухание возобновляется. Снижение расхода наблюдалось для всех исследованных жидкостей, если они смачивали породу. Этот автор нашел, что причиной затухания фильтрации является явление адсорбции и что, если раскрытие трещины меньше 0,25 мм, то возможно измерить толщину сорбированного слоя воды. По его данным последняя составляет от 12,4 до 18,9 мк.

Клинкенберг, а также Кэльхаун и Юстер отрицают влияние адсорбции.

Клинкенберг на основании обзора литературы пришел к заключению, что для потока через капилляры очевидно не существует ограничений связанных с образованием адсорбционных слоев толщины вызывающей уменьшение жидкостепроницаемости пористых сред. В своих опытах он использовал фильтры из пористого стекла, что исключало возможность разбухания частиц твердой фазы, эрозию и т.п. явления. При фильтрации жидкостей с весьма различными сорбционными свойствами - в том числе керосина, толуола, хлороформа, диэтилэфира, четыреххлористого углерода, пентана, изооктана и нитробензола он не обнаружил расхождений в проницаемости, превосходящих пределы погрешностей определений. Эти результаты позволяют отрицать заметное влияние адсорбции. Клинкенберг полагал что только прочно сорбированные слои толщиной в несколько молекул могут заметно уменьшить расход жидкости.

Кэльхаун и Юстер изучавшие фильтрацию воды, бензола растворов *NaCl*, раствора стеариновой кислоты в бензоле, нефти и

спрой нефти через кварцевые фильтры во всех случаях обнаружили удовлетворительное согласие измеренных результатов опытов, вычисленных из закона Дарси по вязкости и градиенту давления величины расхода.

Грюнберг и Ниссан применявшие как и Клинкенберг фильтры из пористого стекла пришли к выводу о том, что эффективное сечение пор различно для различных жидкостей вследствие расхождений в поверхностной энергии и соответственно в неодинаковой толщине адсорбированных слоев.

Фрезер /6/ признавал влияние адсорбции и считал, что с уменьшением размеров зерен расстояние между ними может уменьшаться до такой величины, что молекулы связанной воды заполняют все сечение поры и последняя уже не пропускает жидкости.

Ходжинс, Флуд и Дэси изучали фильтрацию ряда перманентных газов и конденсируемых паров через пробки из пористого пирекса /8/. Перманентные газы не обнаружили отклонений от законов Пуайзеля и Кнудсена; для паров при давлении около 50% от давления насыщения расход уменьшался, при низких давлениях расход увеличивался. Длительная фильтрация всегда приводила к установлению стабильного расхода, но с повышением и понижением давления наблюдался гистерезис. Аномалии эти авторы объяснили явлениями адсорбции.

Наттинг /14/ исследовал течение жидкостей через капиллярные трубки длиной до 1 метра, ему удалось измерить уменьшение радиуса эффективного радиуса вследствие образования пристенного сорбированного слоя. Так при движении нефти /40°АНИ/ по трубке радиусом = 0,4 мм толщина сорбированного слоя составила 0,0029 мм. Если трубку погружали в воду, то толщина слоя

В.Тенесси рассчитанное из поправки на скольжение составляют 0,000006 см. Эти значения превосходят размеры молекулы воды в 7,6-216 раз, а размеры пор известняка Теннеси в 19,8 раз. Несомненно, что сорбированные слои толщиной 0,0124-0,0189 мм /по Уэнтворсу-18/ заблокируют указанные отверстия, даже перепад в 130 ат, наиболее высокий в опытах Оле, не в состоянии "очистить" их. Таким образом поперечное сечение эффективных каналов может быть меньшим при фильтрации воды, чем при фильтрации газа.

Поверхностное натяжение

Гринберг и Ниссан считали, что поверхностные натяжения влияют на расход жидкости. Опыты Кэльхауна и Юстера, в которых поверхностное натяжение изменилось от 30 до 72 дин/см, но проницаемость не изменялась, этого не подтвердили также как и опыты Оле, в которых после воды фильтровался раствор смачивающего вещества.

Потенциалы течения

Потенциал течения тормозит расход. На интенсивность этого явления влияет в частности электропроводность и диэлектрическая проницаемость жидкости, скорость фильтрации и другие факторы.

Клинкенберг обнаружил заметное влияние потенциала течения при фильтрации нитробензола. Наиболее сильно явление сказывается в случае фильтрации чистой воды. Таким образом значения проницаемости измеренные на чистой воде должны быть занижены. Кэльхаун и Юстер высказывают такое-же мнение, хотя их результаты не обнаружили снижения проницаемости при фильтрации

чистой воды. Остер замечает, что влияние потенциала течения должно быть большим при меньше проницаемости.

КОЛЛИНС Р.И. и П.КРОУФОРД

О ВВЕДЕНИИ ПОПРАВКИ КЛИНКЕНБЕРГА В УРАВНЕНИЯ
НЕСТАЦИОНАРНОГО ДВИЖЕНИЯ ГАЗА В ПОРИСТОЙ
СРЕДЕ

COLLINS R.E. and Paul B.CRAWFORD

CALCULATION ON UNSTEADY-STATE GAS FLOW THROUGH POROUS MEDIA
CORRECTED FOR KLINKENBERGER EFFECT.

Trans.AIME, vol.198,1953,

Реферат № 1, карт.244

Эффект Клинкенберга описывается уравнением $K=K_{\infty}\left(1+\frac{b}{P}\right)$
 Это уравнение полезно ввести в расчеты неустановившегося
 движения газа в пористой среде.

1. Идеальный газ

Основное уравнение движения газа можно вывести следующим
 путем:

Условие неразрывности:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = -m \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad \dots 1$$

Закон состояния идеального газа

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad \dots 2$$

Закон Дарси:

$$\vec{V} = -\frac{K}{\mu} \nabla P \quad \dots 3$$

где:

ρ - плотность

t - время

m - пористость

\vec{V} - скорость фильтрации.

Из ур-ий /1/, /2/ и /3/ следует:

$$\nabla \cdot \left(\frac{K}{\mu} \rho \nabla P \right) = m \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad \dots 4$$

или:

$$\nabla \cdot \left(\frac{K}{2\mu} \nabla P^2 \right) = m \frac{\partial P}{\partial t} \quad \dots 5$$

Если $\frac{K}{\mu} = \text{Const}$, то уравнение 5 запишется в виде:

$$\nabla^2 P^2 = \frac{2\mu m}{K} \frac{\partial P}{\partial t} \quad \dots 6$$

В случае линейной фильтрации:

$$\frac{\partial^2 p^2}{\partial x^2} = \frac{2\mu m}{k} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} \quad \dots 7$$

где x -длина

Разделив обе части ур-ия /7/ на $(P_1)^2$ /где P_1 -начальное давление и введя обозначения:

$$P = \frac{p}{P_1} \quad \dots 8$$

$$\chi = \frac{x}{L} \quad \dots 9$$

$$t' = \frac{P_1 k}{2L^2 \mu m} t \quad \dots 10$$

получим в безразмерных величинах

$$\frac{\partial^2 P^2}{\partial \chi^2} = \frac{\partial P}{\partial t'} \quad \dots 11$$

Для случая радиальной фильтрации:

$$\frac{\partial^2 (p)^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial (p)^2}{\partial r} = \frac{2\mu m}{k P_1} \frac{\partial p}{\partial t} \quad \dots 12$$

или:

$$\frac{\partial^2 p^2}{\partial \chi_r^2} + \frac{1}{\chi_r} \frac{\partial p^2}{\partial \chi_r} = \frac{\partial p}{\partial t} \quad \dots 13$$

где:

$$\chi_r = \frac{r}{r_b} \quad \dots 14$$

$$t' = \frac{k P_1 t}{2\mu m r_b^2} \quad \dots 15$$

где r_b - радиус контура питания.

2. Реальный газ

Подстановка:

$$K_p = K_\infty \left(1 + \frac{b}{p}\right) \quad \dots 16$$

в уравнение /3/ дает:

$$\vec{V} = - \frac{K_\infty}{\mu} \left(\frac{p+b}{p}\right) \nabla p \quad \dots 17$$

Подстановка значений \vec{V} из уравнения /17/ и p из уравнения /2/ в уравнение 1 дает:

$$\nabla \left(\frac{K_\infty}{\mu} (p+b) \nabla p \right) = m \frac{\partial p}{\partial t} \quad \dots 18$$

так как b - постоянная, $\Delta b = 0$ и :

$$\nabla^2 (p+b)^2 = \frac{2m\mu}{K_\infty} \cdot \frac{\partial (p+b)}{\partial t} \quad \dots 19$$

В случае линейности линейной фильтрации:

$$\frac{\partial^2 (p+b)^2}{\partial x^2} = \frac{2m\mu}{K_\infty} \frac{\partial (p+b)}{\partial t} \quad \dots 20$$

Введем безразмерные величины:

$$p' = \frac{p+b}{p_1+b} \quad \dots 21$$

$$x = \frac{x}{L} \quad \dots 9$$

$$t_1 = \frac{K_\infty (p_1+b) t}{2\mu m L^2} \quad \dots 22$$

Тогда уравнение /20/ принимает вид:

$$\frac{\partial^2 (P')^2}{\partial x^2} = \frac{\partial P'}{\partial t'} \quad \dots 23$$

Подобные же преобразования для случая радиальной фильтрации приводят к уравнению:

$$\frac{\partial^2 \left(\frac{P+b}{P_1+b} \right)^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \left(\frac{P+b}{P_1+b} \right)^2}{\partial r} = \frac{2m\mu}{K_{\infty}(P_1+b)} \cdot \frac{\partial \frac{P+b}{P_1+b}}{\partial t} \quad \dots 24$$

или

$$\frac{\partial (P')^2}{\partial x_r^2} + \frac{1}{x_r} \frac{\partial (P')^2}{\partial x_r} = \frac{\partial P'}{\partial t'_r} \quad \dots 25$$

где

$$t'_r = \frac{K_{\infty}(P_1+b)t}{\mu m R^2} \quad \dots 26$$

Таким образом введение поправки Клинкенберга сохраняет вид уравнений фильтрации, меняется только структура безразмерных величин.

Истес Р.К. и П.Ф.Фультон

Скольжение газа и измерение проницаемости

Перевод № 39, карт.742

ESTES R.K. and FULTON P.F.

Gas Slippage and Permeability Measurements.

Journ.Petrol.Technology Oct.1956,pp.69-
73.,ref.6 fig.4.

Важной задачей при определении относительной газопроницаемости пористой среды является учет поправок на эффект скольжения газа. Настоящая работа посвящена изучению этих поправок в связи с определением относительной газопроницаемости. Важность изучения эффекта скольжения показана в работах /1, 2, 3/. Таким образом в результаты определений выполненных при атмосферных давлениях должны быть внесены соответствующие поправки. Розе /3/ в результате своих опытов нашел, что влияние скольжения газа на проницаемость с увеличением насыщенности уменьшается. В дальнейшем, следуя Розе, Фультон /4/ нашел, что эффективная газопроницаемость при различной насыщенности поровой среды, экстраполированная на нулевое значение величины $1/P_m$ /при $P_m \rightarrow \infty$ / равна проницаемости по отношению к несмачивающей фазе, при той же насыщенности. В этой же работе представлены данные показывающие, что величина поправки на скольжение в пределах от $P_m = 1$ до $P_m \rightarrow \infty$, уменьшается с увеличением насыщенности. Однако Фультон исследовал вопрос при насыщенности меньшей 30%. Целью этой работы являлось получение данных о влиянии эффекта скольжения в более широкой области насыщенности.

Исследовано 5 образцов с проницаемостью от 32 до 663 мд /синтетический-Алундум $\varnothing 2,54 \times 39,5$; $m = 24,1\%$; то-же $\varnothing 25,4 \times 49,2$; $m = 26,8\%$; песчаник Сосо $\varnothing 2,54 \times 5,81$, $m = 14,1\%$; песчаник Никольс Бэфф $\varnothing 25,3 \times 39,4$; $m = 22\%$; /известняк $\varnothing 25,4 \times 40,1$; $m = 12,2\%$ /, при различных степенях насыщенности моделью нефть-маслом Солтроль с упругостью паров 1 мм рт.столба при 20°C . Схема аппарата приведена на рис.1

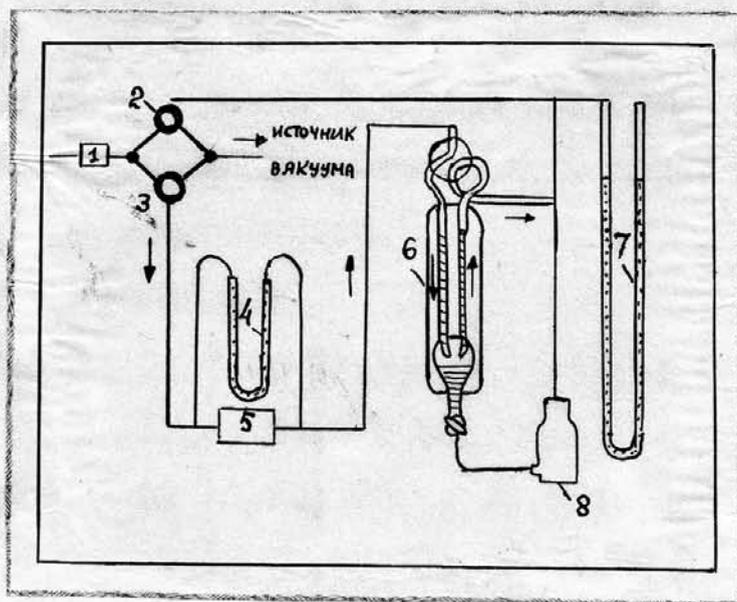


рис.1 Схема аппарата для определения проницаемости

- 1-воздушный фильтр
 2-р-тор давления P_2
 3-р-тор давления P_1-P_2
 4-манометр
 5-образец в кернодержателе по Хасслеру / $P_{обж}=7-8 \text{ кгс/см}^2$ /
 6-расходомер с двумя бюретками 25 и 1 мл.
 7-склянка с раствором жидкого мыла
 8-ртутный манометр

Определяли проницаемость сперва на сухом образце-при четырех значениях среднего давления $\frac{P_1+P_2}{2}$ 740, 360, 230 и 170 мм рт.столба /абс/. При каждом значении среднего давления изменяли расход, для уверенности в том, что измерения выполняются при стационарном режиме. Затем насыщали образец маслом и, путем более или менее длительного выветривания, или же путем капиллярной вытяжки папиросной бумагой,

удаляли большее или меньшее количество масла и измеряли проницаемость при тех же значениях среднего давления в образце. До и после измерений образец взвешивали и по привесу определяли среднюю величину насыщенности.

Насыщенность составляла

1. Образец из Алундума: 0; 7,5; 21,3; 39,1; 49,8; 58,5; 68,45;
 $m = 24,1\%$ 79,8; 84,2 и 88,85%.
2. Образец из алундума: 0; 10,35; 20,4; 29,85; 39,15; 48,35;
 $m = 26,8\%$ 58,1; 70,05; 80; 82,5; 85,03 и 86,79%.
3. Образец песчаника: 0; 11; 19,25; 29,35; 38,8; 49,3; 54,9;
 $m = 14,1\%$ 66,8 и 71,7%.
4. Образец песчаника 0; 9,95; 20,95; 27,8%; 40,15; 50,2;
 $m = 22\%$ 59,6; 66% и 67%.
5. Образец известняка 0; 20; 28,35; 39,4; 49,5; 55,6; 62,3;
 $m = 12,0\%$ 74,6 и 80,25%.

При измерении проницаемости насыщенных образцов режимы фильтрации изменяли очень медленно, для того чтобы обеспечить равномерное распределение насыщенности. Перед выполнением и окончательных замеров режим выдерживали в течение 15-60 минут, в зависимости от степени насыщенности. Иногда образец выдерживали при минимальном абсолютном давлении / ~ 17 мм рт. столба / до 16 часов, после чего выполняли серию измерений при четырех средних давлениях с интервалами по 1 часу.

Максимальный перепад давления в опытах не превышал 75 мм водяного столба.

Результаты опытов представлены в таблицах 1-5. При вычерчивании зависимости K_g /наблюденной газопроницаемости/ - $\frac{1}{P_m}$ по Клингембергу, получены однотипные семейства прямых,

например как на рис. 2 /образец $S' - 1/$, для различных значений насыщенности. С увеличением насыщенности угловой коэффициент уменьшается. Однако изменение углового коэффициента не описывает количественного влияния изменения насыщенности на эффект скольжения газа.

В ур-ии Клинкенберга:

$$K_g = K_1 \left(1 + \frac{b}{P_m} \right)$$

тангенс угла наклона есть $K_1 b$; величина $\frac{b}{P_m}$ есть поправка к величине жидкостепроницаемости K_1 , позволяющая определять газопроницаемость / K_g / при данном среднем давлении.

Для того чтобы тангенс угла наклона прямых на рис. 2 описывал поправку на скольжение необходимо либо чтобы все зависимости при $S' = \text{var}$ были параллельны или чтобы тангенс угла был равен $1/P_m$, что невозможно. Таким образом следует величину K_1 пересчитать на безразмерную.

Для всех природных образцов прямые $K_g - 1/P_m$ при $S' > 65-75\%$ имеют отрицательный угловой коэффициент. Возможно, что это вызывается сложностью условия при высоких насыщениях, вызываемых невозможностью поддержания постоянного распределения жидкости в образце при изменении среднего давления. Уменьшение насыщенности за время измерения при $P_m = \text{const}$ составляло обычно от 0,3 до 0,6%. Эти изменения, при больших насыщениях, по-видимому существенно отражаются на эффективной проницаемости. При снижении давления выделяется растворенный в масле воздух, в виде пузырьков. Количество пузырьков и объем их малы вследствие

например как на рис. 2 /образец $S' - 1$ /, для различных значений насыщенности. С увеличением насыщенности угловой коэффициент уменьшается. Однако изменение углового коэффициента не описывает количественного влияния изменения насыщенности на эффект скольжения газа.

В ур-ии Клинкенберга:

$$K_g = K_1 \left(1 + \frac{b}{P_m} \right)$$

тангенс угла наклона есть $K_1 b$; величина $\frac{b}{P_m}$ есть поправка к величине жидкостепроницаемости K_1 , позволяющая определять газопроницаемость / K_g / при данном среднем давлении.

Для того чтобы тангенс угла наклона прямых на рис. 2 описывал поправку на скольжение необходимо либо чтобы все зависимости при $S' = \text{var}$ были параллельны или чтобы тангенс угла был равен $1/P_m$, что невозможно. Таким образом следует величину K_1 пересчитать на безразмерную.

Для всех природных образцов прямые $K_g - 1/P_m$ при $S' > 65-75\%$ имеют отрицательный угловой коэффициент. Возможно, что это вызывается сложностью условия при высоких насыщениях, вызываемых невозможностью поддержания постоянного распределения жидкости в образце при изменении среднего давления. Уменьшение насыщенности за время измерения при $P_m = \text{const}$ составляло обычно от 0,3 до 0,6%. Эти изменения, при больших насыщениях, по-видимому существенно отражаются на эффективной проницаемости. При снижении давления выделяется растворенный в масле воздух, в виде пузырьков. Количество пузырьков и объем их малы вследствие

чего эффекта вытеснения не происходит и расход газа ^{образец} практически не изменяется. Однако выделение пузырьков может приводить к измещению масла из полностью насыщенных ^{пор} паров в другие поры, участвующие в фильтрации газа, что вызывает уменьшение эффективной сечения фильтрации и изменение распределения жидкости с каждой ступенью изменения давления.

Для образца известняка, характерного некоторой кавернозностью пор и неравномерным распределением каналов соединяющих крупные поры изменяются углы наклона прямых $K - \frac{1}{P_m}$ в области насыщенности, в которой песчаники этого не обнаруживали.

В общем можно заключить, что крупные поры определяют расход газа через образец в области насыщенности $S < 65\%$, когда расход не зависит от рассмотренных влияний и угол наклона прямой положителен.

Для искусственных образцов отрицательные углы наклона не обнаружены при значениях S до 88,85 и 86,79% вследствие однородности строения порового пространства.

На рис. 3 приведена графика величин $C = \frac{K_a - K_l}{K_l} \cdot 100 - S_0$ для образца S_1 /песчаник Сосо/. Величина эта является мерой влияния скольжения / K_a -величина K_g экстраполированная на $P_m = 1$ ат; K_l -жидкостепроницаемость/. Точки хорошо укладываются на горизонтальную прямую за исключением точки полученной при $S_0 = 71,7$. Подобные же результаты получены и на других образцах. Фультон /4/ получил существенно другие результаты для области насыщенности ^{$S < 30\%$} или ⁽³⁾ ~~и в функции~~. Данные полученные Розе ⁽³⁾ отличны, но в меньшей степени. В целом, с учетом данных /4/ и /3/ определяются условия при которых δ не является функцией $\frac{1}{r}$ /где r -средний радиус капилляров/. Данные авторов показывают

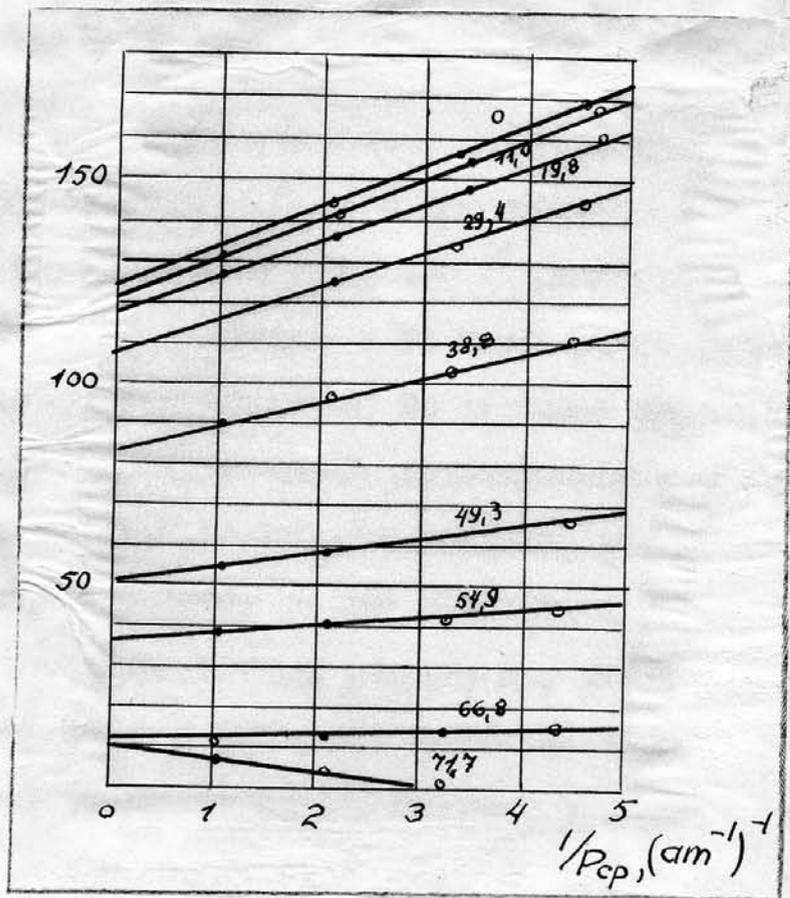


рис.2 Зависимость K_g от $1/P_{cp}$ Образец S-1.
Шифр кривых-жидкостепроницаемость

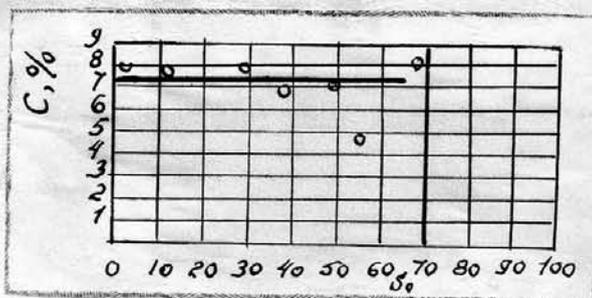


Рис.3 Зависимость $C = \frac{K_2 - K_1}{K_1} \cdot 100 = f(S_0)$
Образец S-1.

наименьшие отклонения от указанной зависимости.

Можно полагать, что r следовательно и β остаются постоянными в определенном пределе S_0 , вплоть до величин, при которых существует равновесие с газовой фазой. Розе ^{считал} что в этой области газ движется по крупным порам, ^{т.е.} что когда относительная газопроницаемость увеличивается с уменьшением насыщенности жидкостью, возникают условия, при которых число пор малых размеров занятых газом возрастает. Вследствие этого с уменьшением S_0 эффективный радиус пор уменьшается. С нашей точки зрения радиус пор остается постоянным до тех пор пока насыщенность не достигает очень больших значения; опыты показывают, что с достижением этой области эффективный радиус пор резко изменяется.

На рис. 4, для образца песчаника Сосо представлены зависимости относительных величин:

$$1/- \quad K_{el}/K_{st} \quad ; \quad 2 \quad K_{ea}/K_{sa} \quad ; \quad 3- \quad K_{ea}/K_{st}$$

где:

~~///~~ K_{el}/K_{st} — отношение проницаемостей при $S_0 = S_i$ и $S_0 = 0$ приведенных к $P_m = \infty$

~~///~~ K_{ea}/K_{sa} отношение проницаемостей при $S_0 = S_i$ и $S_0 = 0$ приведенных к $P_m = 1$ ат.

~~///~~ K_{ea}/K_{st} отношение проницаемости при $S_0 = S_i$ приведенной к $P_m = 1$ ат к проницаемости при $S_0 = 0$ приведенной к $P_m = \infty$

Кривая 1 есть кривая относительной проницаемости в пластовых условиях, к ней весьма близка кривая 2, выражающая отношение величин проницаемости приведенных к одинаковому давлению

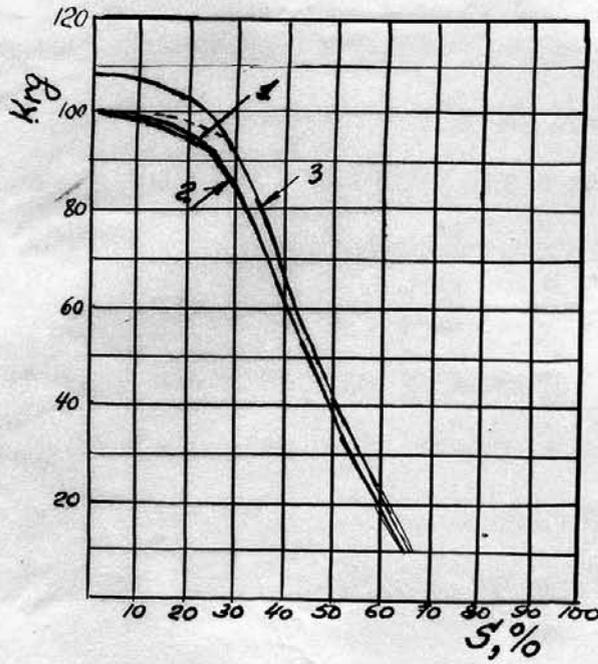


Рис.4 Зависимость относительной проницаемости от насыщенности. Образец $S' - 1$

- 1. ~~##~~ # K_{el}/K_{sl}
- 2. ~~##~~ # K_{ea}/K_{sa}
- 3. ~~##~~ # K_{ea}/K_{sl}

нию в I ат. Таким образом относительная проницаемость не зависит от давления, при условии, что ~~и~~ все определения выполнены при одном и том же давлении. Этот вывод противоположен выводу Розе /3/. Наш вывод означает, что для многих пористых сред кривые относительной проницаемости рассчитанные по данным измерений при атмосферном давлении равнозначны кривым относительной проницаемости при пластовых условиях. Для определения абсолютных значений проницаемости при пластовых условиях достаточно определить поправку Клингеберга при нулевом насыщении.

При составлении кривых относительной проницаемости прямые $K - 1/P_m$ с отрицательным угловым коэффициентом не используются. Если бы они были использованы кривые относительной проницаемости в интервале $60 < S_o < 80\%$ оказались бы сильно изогнутыми.

Кривая 3 на рис. 4 заметно отличается от кривых 2 и 1. Определение относительной проницаемости таким способом не характеризует пластовых условия особенно в области $0 < S_o < 50\%$.

В ы в о д ы

1. С увеличением насыщенности уменьшается тангенс угла наклона зависимости $K - 1/P_m$; Это согласуется с концепцией обратной (гиперболической) связи между величинами " β " и " r " поскольку величины βK изменяются с увеличением S' в большей степени в связи с изменением K , чем β

2. При высоких значениях насыщенности угол наклона принимает отрицательные значения, что возможно связано с нарушением равновесного состояния фаз. Вопрос этот требует дальнейшего изучения.

3. Для широкого класса коллекторов поправка на скольжение в общем **постоянна** в широкой области изменения насыщенности.

4. Относительная проницаемость не зависит от среднего давления, если измерения выполнены при одинаковых условиях

$$/P_m = const \quad /.$$

= 3,95 см. =2,54 см = 24,1%

	Р	l	K _g	K _{el}	K _{ea}	с	к	K _{rg}		
	мм рт.	ат ⁻¹	мд	мд	мд	%	мд	K _{el} /K _{sl}	K _{ea} /K _{sa}	K _e /K _{sl}
	ст.	P _m								
0	736,4	1,03	430	386	429	10	43	100	100	111
	356,8	2,13	476							
0	266,6	3,35	530							
	166,5	4,56	581							
7,5	739	4,028	398	367	399	8	32	95	92,8	103,8
	359	2,12	435							
	229	3,32	473							
	169	4,5	511							
21,3	737,7	1,03	326	298,5	325	8,16	26,5	77,3	75,6	84
	357,7	2,12	354							
	227,7	3,24	388							
	167,7	4,52	418							
28	737,9	1,03	285	260,5	284	8,3	23,5	67,4	66	73,5
	358,0	2,12	310							
	228,0	3,34	341							
	168,0	4,52	368							
39,1	744	1,022	212	198	211,5	6,4	13,5	51,3	49,2	54,6
	364	2,09	226							
	234	3,24	242							
	174	4,36	258							
49,8	744	1,022	128	116	127,8	9,25	11,8	30	29,7	33
	364	2,09	141							
	234	3,24	155							
	174	4,36	168							
58,5	746,2	1,02	72,3	67,5	72,2	6,5	4,7	17,5	16,8	18,7
	366,2	2,07	78							
	236,2	3,22	83							
	176,1	4,3	87,5							
67,45	746,8	1,017	38,8	36	38,5	6,5	2,5	9,3	8,96	10
	366,8	2,07	41							
	236,6	3,21	43,6							
	176,8	4,3	46,9							
79,8	745,5	1,02	10,21	9,26	10,2	9,2	0,94	2,4	2,37	2,64
	365,4	2,08	11,2							
	235,5	3,23	12,4							
	175,4	4,33	13,4							
8,42	745	1,02	4,68	4,34	6,68	7,25	0,34	1,12	1,09	1,21
	365	2,08	5,05							
	235	3,23	5,46							
	175	4,34	5,85							

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
88,85	74,3	1,023	1,04	0,90	1,04	13,45	0,14	0,233	0,242	0,27
	36,3	2,09	1,22							
	23,3	3,26	1,38							
	17,3	4,39	1,53							

K_g -проницаемость измеренная при данном давлении

K_l -истинная проницаемость, жидкостепроницаемость

K_{el} -проницаемость при данном насыщении, экстраполированная на $1/P_m = 0$; $K_{el} = K_l$

K_{sl} -относительная проницаемость при данном насыщении, % от K_{el} при $S' = 0$ $K_{sl} = K_{el} = K_l$

K_{ea} -проницаемость при $P_m = 1$ /по графику/

K_{sa} -относительная проницаемость при данном насыщении экстраполированная на $1/P_m = 0$, % от K_{ea} при $S'_0 = 0$; $K_{sa} = K_e$

$$C = \frac{K_a - K_l}{K_a} \times 100$$

Таблица 2. Образец А-2 /Алундун синтетический/

$L = 4,92 \quad \varnothing = 2,54 \text{ см} \quad m = 26,8\%$

	Р		Kg	Ked	Kca	e	K _{mg}			
	мм рт. ст.	$\frac{1}{P_m}$ ат					Mg	Mg	Mg	%	mg	Ked/Ksd	Kca/Ksa	Kca/Ksd
0	74,1	1,023	354	306	353	13,3	47	100	100	115
	36,1	2,1	402							
	23,1	3,29	461							
	17,1	4,45	512							
20,35	73,5	1,034	295	263	294	10,5	32	86	83,2	96,2
	35,5	2,14	327							
	22,5	3,37	364							
	16,53	4,6	403							
20,4	74	1,028	250	224	249	9,97	25	73,2	70,5	81,5
	36	2,11	275							
	23	3,3	306							
	17	4,47	334							
29,85	73,9	1,03	200	181	199	9,02	18	59,1	56,4	65
	35,9	2,12	220							
	22,9	3,32	242							
	16,9	4,49	264							
39,15	73,94	1,028	150,6	139	150	7,34	11	45,5	42,5	49
	35,95	2,12	163,3							
	22,95	3,32	177,5							
	16,95	4,49	192							
48,35	73,55	1,033	106,3	99	106,5	7,04	7,5	32,4	30,2	34,8
	35,55	2,14	115							
	22,55	3,37	123,5							
	16,55	4,59	133							
58,1	74,3	1,024	64,7	59	64	7,8	5	19,3	18,1	21
	36,3	2,09	69							
	23,3	3,26	74,2							
	17,3	4,4	80,1							
70,05	73,8	1,03	27,7	25	27,5	9,1	2,5	6,18	7,8	9
	35,8	2,12	30,4							
	22,8	3,37	34,1							
	16,8	4,53	37,5							
80	73,9	1,029	9,14	7,6	8,6	11,6	1	2,48	2,44	2,78
	35,9	2,12	9,65							
	22,9	3,32	10,80							
	16,9	4,49	12,05							
32,5	74,2	1,023	5,55	4,45	5,5	19,1	1,05	1,45	1,56	1,8
	36,2	2,1	6,69							
	23,2	3,27	7,84							
	17,2	4,41	9,2							

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
85.03	74.2	1.023	3.84	3.5	4	12.5	0.5	1.14	1.13	1.31
	36.2	2.1	4.63							
	23.2	3.27	5.51							
	17.2	4.41	5.68							
86.79	74.2	1.023	2.98	2.5	3	16.7	0.5	0.818	0.85	1.02
	36.2	2.1	3.52							
	23.2	3.27	4.01							
	17.2	4.41	4.21							

Таблица 3. Образец $S-1$ /песчаник Сосо/ $\mu=0,581$ см $\delta=2,54$ см
 $m = 14,1\%$

S	P		l	Kg	K δ	K σ	C	K			
	мм	рт.						$\frac{l}{P_m}$	$\frac{K\delta}{K_{\delta l}}$	$\frac{K\sigma}{K_{\sigma l}}$	$\frac{K\sigma}{K_{\delta l}}$
			ат ⁻¹	Мг	Мг	Мг	%	Мг			
0	73.9	1.028		133	122.5	132.7	7.7	10.2	100	100	108
	35.9	2.12		145							
	22.8	3.32		156							
	16.8	4.53		169							
11	73.3	1.038		131.5	121	131	7.65	10	98.6	97.9	107
	35.3	2.16		142.5							
	22.3	3.4		155							
	16.3	4.66		167.5							
19.75	73.2	1.038		127	117	126	7.15	9	95.5	95	103
	35.2	2.16		136.5							
	22.2	3.42		148							
	16.2	4.69		160							
29.35	73.8	1.03		116	106	115	7.83	9	86.5	86.8	93.8
	35.8	2.12		124.8							
	22.8	3.34		134							
	16.8	4.52		145							
38.8	74.17	1.026		89.3	83	89	6.75	6	67.6	67.2	72.5
	36.17	2.10		96.6							
	23.17	3.28		103.5							
	17.17	4.43		111							
49.3	74.17	1.026		54.8	51	54.8	6.95	3.8	41.6	41.3	44.7
	36.17	2.10		59.1							
	23.17	3.28		62.5							
	17.17	4.43		66.5							
54.9	74.47	1.021		39	37.2	39	4.61	1.8	30.4	29.4	31.8
	36.47	2.08		41							
	23.47	3.24		43							
	17.47	4.35		45							
66.8	74.5	1.02		12.2	11.25	12.5	8	1	9.2	9.42	10.2
	36.5	2.08		13.34							
	23.5	3.23		14.46							
	17.5	4.34		15.6							
71.7	74	1.026		8.09	11.25	8.25	36.4	-3	9.2	6.2	6.73
	36	2.105		5.27							
	23.75	3.2		1.46							
	17.75	4.28		.54							

Таблица 5. Образец - 7 /известняк/ =4.01 см =2,54 см
=12.2%

δ	Р	l	K _g	K _d	K _{ea}	C	K _{ra}			
	мм рт.ст	$\frac{l}{P_m}$ ат	Мг	Мг	Мг	%	Мг	K _{ca} /K _{se}	K _{ca} /K _{sa}	K _{ca} /K _{se}
0	74.1 36.1 23.1	1.025 2.11 3.29	36.2 40.3 44.8	32.4	36.15	10.4	3.75	100	100	111
0	73.2 35.2 22.2 16.2	1.038 2.16 3.42 4.69	34.6 39 43.9 48	30.5	34.5	11.6	4.0	94	95.6	106
3.35	73.8 36.8 22.8 16.8	1.03 2.12 3.34 4.52	30.8 34.5 39.2 43.9	26.3	30.2	12.9	3.9	81.2	83.7	93.2
9.4	74.17 36.17 23.17 17.17	1.026 2.10 3.28 4.43	23.2 25.4 27.5 29.6	21.3	23.1	7.8	1.8	65.8	64	71.3
2.5	74.17 36.17 23.17 17.17	1.026 2.10 3.28 4.43	16.2 17.2 18.4 19.2	15.4	16.2	4.95	0.8	47.5	45	50
5.6	74.41 36.47 23.47 17.47	1.021 2.08 3.24 4.35	13.2 13.75 14.5 15.2	12.6	13.2	4.55	.6	39	36.6	40.7
2.3	74.4 36.4 23.4 17.4	1.021 2.09 3.24 4.36	8.41 6.25 3.95 1.82	10.4	8.5	-18.2	-1.9	31.2	23.6	26.2
4.6	74.1 36.1 22.1 17.1	1.027 2.10 3.30 4.45	1.21 1.497 2.04 2.45	0.8	1.13	29.2	0.33	2.47	3.24	3.5
0.25	74.1 36.1 23.1 17.1	1.027 2.10 3.30 4.45	.304 .51 .751 1.018	0.11	0.305	64	0.195	0.34	0.845	0.8