

КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ И НЕФТЕГАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
*Кафедра разработки и эксплуатации месторождений
трудноизвлекаемых углеводородов*

И.М. НАФИКОВ В.А. МИЛЮТИНА

**ЛАБОРАТОРНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
КОЛЛЕКТОРСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД**

Казань – 2021

УДК 821.111.09
ББК ШЗ(4)

*Принято на заседании учебно-методической комиссии ИГиНГТ
Протокол № 7 от 7 июля 2021г.*

Рецензенты:

Доктор геолого-минералогических наук,
профессор, заведующий кафедрой геология нефти и газа им. А.А. Трофимука,
ИГиНГТ, КФУ **Б.В. Успенский**

Кандидат технических наук,
главный геолог НГДУ «Прикамнефть» ПАО «Татнефть» **И.Г. Газизов**

Нафиков И.М. Милютина В.А.

Лабораторные методы определения коллекторских свойств горных пород:

Учеб. – метод. пособие / И.М. Нафиков., В.А. Милютина – Казань:
Казан. ун-т., 2021. – 35 с.

В пособии изложены теоретические сведения и методики выполнения лабораторных работ по дисциплине «Физика нефтяного пласта» для студентов направления подготовки бакалавриата 21.03.01 «Нефтегазовое дело». Предназначено для студентов второго и третьего курса Института геологии и нефтегазовых технологий, специализирующихся в области разработки месторождений трудноизвлекаемых углеводородов.

© **Нафиков И.М., Милютина В.А. 2021**
© **Казанский университет, 2021**

Содержание

1	Определение плотности породы методом гидростатического взвешивания	4
1.1	Отбор и методы подготовки образцов горных пород	4
1.2	Оборудование, необходимое для проведения лабораторной работы	5
1.3	Порядок выполнения работы	6
1.4	Допустимая погрешность измерений	7
1.5	Форма отчета	7
	КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	8
2	Определение пористости горных пород	9
2.1	Порядок выполнения работы	11
2.2	Допустимая погрешность измерений	12
2.3	Форма отчета	12
	КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	13
3	Определение остаточной водонасыщенности методом центрифугирования	14
3.1	Лабораторное оборудование	16
3.2	Вычисления	19
	КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	19
4	Определение остаточной нефтенасыщенности горных пород	21
4.1	Описание и работа установки	21
4.2	Выполнение работы	22
4.3	Форма отчета	23
	КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	24
5	Определение коэффициента абсолютной проницаемости пород	25
5.1	Описание и работа установки	26
5.2	Выполнение расчетов	26
5.3	Выполнение работы (пример)	28
5.4	Форма отчета	30
	КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	30
6	Определение коэффициента открытой пористости пород методом насыщения	31
6.1	Описание установки	31
6.2	Выполнение лабораторной работы	32
6.3	Форма отчета	34
	КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	34
	Литература	35

1 Определение плотности породы методом гидростатического взвешивания

Цель работы - определение плотности породы методом гидростатического взвешивания.

Плотность скелета горной породы (кажущаяся плотность) - это физическая величина, количественно равная массе единицы объема сухой породы вместе с порами:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.1)$$

Плотность пород определяют для выяснения характера связей плотности с другими петрофизическими величинами, а также для решения других геологических задач (для оценки особенностей формирующегося осадка; выявления региональной и локальной смены пород и др.). В лабораторных условиях обычно определяют плотность абсолютно сухого образца породы, т.к. трудно сохранить характерные для естественного залегания пород влажность, минерализацию и водогазонасыщенность. Массу породы можно определить непосредственным взвешиванием на аналитических весах, а для определения внешнего объема образца горной породы применяется несколько методов: вытеснения ртути, обмера образцов строго правильной геометрической формы, гидростатического взвешивания насыщенного жидкостью образца в этой жидкости и в воздухе и др. Наибольшее распространение получил метод гидростатического взвешивания сухого проэкстрагированного образца породы, покрытого тонким слоем парафина (или коллодия), в жидкости (дистиллированной воде) и в воздухе.

1.1 Отбор и методы подготовки образцов горных пород

Образцы горных пород отбираются согласно ГОСТ 26450.0-85, Производится отбор керн в количестве не менее 2 образцов на 1 метр в

однородных породах и возрастает в зависимости от степени неоднородности пород, при этом обеспечивается представительность каждой литологической разновидности. Необходимо использовать образцы без видимых трещин, каверн, не свойственных исследуемой породе, из которой взят образец. Из нефтенасыщенных коллекторов образцы необходимо экстрагировать с сушкой при температуре 105°C до постоянной массы.

1.2 Оборудование, необходимое для проведения лабораторной работы

- Коробочка с медными проволоками;
- емкость с парафином;
- стакан, в который будет погружаться образец;
- емкость с дистиллированной водой;
- емкость для слива воды;
- электрический подогреватель (электроплитка);
- весы аналитические.



Рис. 1. Весы аналитические с мостиком

На весах установить специальное приспособление позволяющие взвешивать предмет в воде не опираясь на взвешивающий элемент весов (типа мостика).

1.3 Порядок выполнения лабораторной работы

1. Отобранный образец обмотать медной проволокой.

2. На аналитических весах взвесить образец с проволокой.

Зафиксировать результат (P_1).

3. Снимите образец с аналитических весов.

4. Установить емкость с парафином на электронагреватель (плитку), произвести процесс нагревания пока парафин не перейдет в расплавленное состояние.

5. Образец, обмотанный медной проволокой, погрузить в разогретый парафин.

6. Снова взвесьте образец (P_2). Объем парафина вычисляют по формуле:

$$V_{нар} = \frac{P_2 - P_1}{\rho_{нар}} \quad (1.2)$$

Плотность парафина определяют путем гидростатического взвешивания эталонного образца парафина в воде и в воздухе с точностью до 0.01 г.

7. Подготовьте емкость с водой. Налейте дистиллированной воды в стакан - примерно 2/3 объема.

8. Стакан с водой установить на мостик весов, закрепить на подвеске образец. Взвесить образец (P_3).

При взвешивании образец не должен касаться стенок стакана и все время полностью находился под водой.

Объем парафинированного образца будет равен:

$$V_{нар.обр} = \frac{P_2 - P_3}{\rho_в} \quad (1.3)$$

Объем образца находят из соотношения:

$$V_{обр} = V_{нар.обр} - V_{нар}$$

Плотность образца горной породы рассчитывают по формуле:

$$\rho = \frac{P_1}{V_{обр}} = \frac{P_1}{P_{нар.обр.} - P_{нар}} \quad (1.4)$$

1.4 Допустимая погрешность измерений

1. Погрешность взвешивания: $\Delta P = \pm 0.001 \text{ г}$, т.е.:

$$\Delta P_{отн.} = \frac{\Delta P}{P_{ср}} = \frac{0.007}{1.8} * 100\% = 0.4\%$$

2. Проникновение парафина в поры (занижается объем) влияет на точность определений. Поэтому, покрытие образца парафином должно производиться очень быстро и при температуре не выше 70°C .

3. Величина относительной погрешности в определении плотности возрастает с уменьшением массы и увеличением плотности образца сухой породы.

1.5 Форма отчет

1. Цели работы.
2. Описание установки.
3. Ход работы.
4. Меры безопасного ведения работ.

Таблица 1.5

Форма записи результатов измерения

P_1 Масса чистого сухого образца, г	P_2 Масса запара- финированного образца в воздухе, г	P_3 Масса запара- финированного образца в воде, г	$V_{обр}$ Объем образца, см^3	ρ Плотность образца, г/см^3

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как нужно отбирать и подготавливать образцы для определения плотности?
2. Перечислите необходимые приборы и материалы.
3. В какой последовательности производится работа?
4. Какие меры безопасности должны выполняться при проведении работы?

2. Определение пористости горных пород

Цель этой лабораторной работы - определение пористости горных пород.

Пористость горных пород - нефтяных, газовых и водных резервуаров - является основным емкостным параметром породы, поэтому ее значение будет определять, при прочих равных условиях, размер резервуара, заполненного любым углеводородом в природных залежах, или размер газового месторождения, созданного искусственно для хранения газа под землей.

Пористость горных пород понимается как наличие в них пустот, захваченных между гранулами в зернистых коллекторах, а также пещер и трещин в карбонатных коллекторах. В количественном выражении пористость характеризуется коэффициентом пористости (K_n), который представляет собой отношение размера пор, трещин и полостей к геологическому размеру горных пород и выражается в частях единицы или процентах. В то же время можно выделить несколько категорий пористости:

$$K_n = \frac{V_{пор}}{V_{обр}} \quad (2.1)$$

Где $V_{обр}$ и $V_{пор}$ - соответственно объем образца и суммарный объем его пор.

В то же время можно выделить несколько категорий пористости:

- полная (или общая) пористость;
- открытая пористость (или пористость насыщения);
- динамическая (или эффективная) пористость.

Общая пористость включает все открытые и закрытые поры (пустоты), независимо от их формы и относительного положения. Общий коэффициент пористости определяется отношением общего объема всех открытых и закрытых пор (пустот) к видимому (геометрическому) объему породы:

$$m_{\text{полная}} = \frac{V_{\text{отк}} + V_{\text{закр}}}{V_m} \quad (2.2)$$

Определение коэффициента полной пористости сопряжено с обязательным дроблением образца породы до составляющих его зерен. Интерес этого параметра представляется лишь с познавательных позиций (в геологическом аспекте).

Открытая пористость называется чистой пористостью насыщения, что несет в себе утилитарный смысл, так как она и определяет емкостную характеристику коллектора, то есть запасы нефти (газа или воды).

Коэффициентом открытой пористости называется отношение суммарного объема пор образцов, заполняющихся данной жидкостью (V_{on}) к видимому объему образца:

$$m_{\text{отк}} = \frac{V_{on}}{V_m} \quad (2.3)$$

Коэффициент открытой пористости определяется по методу И.А. Преображенского сравнением масс сухого и насыщенного керосином образца. Для расчета применяется объем керосина, вошедший в поровое пространство керна. Объем образца (керна) определяют путем разности масс насыщенного образца в воздухе и погруженного в керосин того же образца, то есть методом гидростатического взвешивания насыщенного керосином образца.

Общую (полную) пористость определяют по методу Мельчера (объемным способом).

Эффективная пористость (называется иногда динамической) характеризуется той частью объема пор, которая занята только движущейся жидкостью при установившемся движении. Коэффициентом эффективной пористости называется отношение объема ($V_{эф}$), по которому происходит движение жидкости, к объему горной породы:

$$m_{эф} = \frac{V_{эф}}{V_m} \quad (2.4)$$

Концепция эффективной пористости предполагает наличие таких пор в породе (или части объема взаимосвязанных пор), где движение жидкости практически не происходит. Это субкапиллярные и некоторые капиллярные поры, в которых жидкость находится в связанном состоянии. Очевидно, что соотношение объемов жидкости, участвующих и не участвующих в фильтрации, будет определяться уменьшением создаваемого давления (градиентами давления).

Отбор проб горных пород осуществляется по ГОСТ 26450.0-85. Отбор образцов керна должен производиться из интервалов однородных пород и составлять не менее 2 образцов на 1 метр, обеспечивать представительство каждой литологической разновидности. Наличие в керне каверн зачастую искажает количественные оценки размеров пор и породы, поэтому для измерения пористости могут быть использованы образцы литологически однородных пород массой 50-80 г правильной или произвольной круглой формы, не имеющие видимых трещин, каверн, не свойственных породе, из которой взят образец. Образцы, содержащие углеводороды должны быть предварительно проэкстрагированы.

2.1 Порядок выполнения работы

Пористость образца определяют по формуле:

$$K_n = \frac{P_3 - P_1}{P_3 - P_2} * 100\% \quad (2.5)$$

где K_n - коэффициент открытой пористости, %;

P_1 - масса сухого чистого образца породы в воздухе, г;

P_2 - масса насыщенного керосином образца породы в керосине, г;

P_3 - масса насыщенного керосином образца породы в воздухе, г.

2.2 Допустимая погрешность измерений

Погрешность определения коэффициента открытой пористости складывается из:

- погрешности взвешивания, г;
- погрешности подготовки насыщенного образца к взвешиванию, г;
- погрешности, вызванной неполнотой насыщения.

Суммарная относительная погрешность выражается формулой:

$$\frac{\Delta K_n}{K_n} = (2\Delta M + \Delta M'_3) \frac{2M_3 - M_1 - M_2}{(M_3 - M_1)(M_3 - M_2)} + \varphi$$

ΔK_n - абсолютная погрешность определения пористости, %

$\frac{\Delta K_n}{K_n}$ - относительная погрешность определения пористости, %

ΔM_1 (масса сухого образца) – погрешность взвешивания

ΔM_2 (масса насыщенного образца в жидкости) – погрешность взвешивания

ΔM_3 (масса насыщенного образца в воздухе) – погрешность взвешивания

$\Delta M'_3$ (масса насыщенного образца в воздухе) – погрешность подготовки насыщенного образца к взвешиванию в воздухе

φ - погрешность из-за неполноты насыщения

$$\varphi = \frac{\Delta V}{V_n}$$

V_n - полный объем порового пространства

ΔV - недонасыщенный объем

Суммарная относительная погрешность составляет от 2 до 10%.

2.3. Форма отчета

Отчет должен содержать:

1. Цель работы.
2. Описание установки.
3. Ход работы.
4. Меры безопасного ведения работ.

Форма записи результатов измерения:

P_1 масса сухого чистого образца породы в воздухе, г	P_2 масса насыщенного керосином образца породы в керосине, г	P_3 масса насыщенного керосином образца породы в воздухе, г	K_n пористость образца, %

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как подготавливают образцы для определения их пористости?
2. Перечислите необходимые приборы и материалы.
3. В каком порядке производится работа?
4. Какие меры безопасности должны выполняться при проведении работы?

3. Определение остаточной водонасыщенности методом центрифугирования

Цель данной лабораторной работы - определение остаточной водонасыщенности методом центрифугирования.

Проницаемостью горной породы - это способность пропускать через себя различные флюиды (нефть, газ, воду, газожидкостные и трехфазные системы) при наличии перепадов давления. То есть проницаемость является основным фильтрационным свойством коллекторов нефти и газа или воды и определяет дебиты скважин и скорости фильтрации в пластах.

При проведении лабораторных работ, исследуемый образец породы предварительно очищают от нефти (экстрагируют), высушивают до фиксированного веса, взвешивают в сухом состоянии на аналитических весах. Насыщают сухой образец под вакуумом пластовой минерализованной водой или 5%-ным раствором хлористого натрия (NaCl); вторично взвешивают в насыщенном состоянии. На дно стаканчика центрифуги помещают кусочек марли для впитывания отжатой воды во избежание всплескивания ее во время остановки центрифуги. В стаканчик опускают полую цилиндрическую подставку высотой от 10 до 25 мм. Далее на алюминиевом решетчатом диске с тонкой ручкой в стаканчик погружают образец породы цилиндрической формы диаметром 2.5 см и длиной 3 см. Мензурку центрифуги закрывают резиновой пробкой с кольцом во избежание втягивания ее в пробирку при вращении центрифуги. Резиновая пробка должна иметь в середине небольшое выпускное отверстие для сброса давления.

При центрифугировании насыщенного водой керна в воздухе вода вытесняется и замещается воздухом до тех пор, пока не достигается остаточная водонасыщенность.

В центрифуге используют короткие керны, но несмотря на небольшую высоту керна, между фазами развиваются большие перепады давления:

$$\Delta P = (\rho_1 - \rho_2)gh \quad (3.1)$$

где ΔP - перепад давлений между фазами 1 и 2;

ρ_1, ρ_2 - плотность двух флюидов в пористой среде;

g - ускорение силы тяжести;

h - высота керна, см.

Значительные перепады давления происходят из-за большого ускорения при высоких скоростях вращения. Перепад определяется по следующей зависимости:

$$n = 1.11 * 10^{-8} (\rho_1 - \rho_2)nrh , \quad (3.2)$$

где n - число оборотов в мин;

r - радиус вращения в см;

h - высота керна в см.

Формула (3.2) необходима в случаях построения кривых капиллярного давления. Средние скорости вращения используются для получения кривых капиллярного давления, а скорость центрифуги и объем воды измеряются для каждого равновесного состояния. Скорость центрифуги ЦЭ-3 регулируется трансформатором с переменным коэффициентом преобразования. Для этого в этой части центрифуги устанавливается тахометр и сравнивает частоту вращения с напряжением, получаемым с помощью ЛАТР-1. По окончании центрифугирования образец вновь взвешивается на аналитических весах, после чего определяется остаточная водонасыщенность:

$$\alpha = \frac{C_4 - C_1}{V_N \rho_g} * 100\% , \quad (3.3)$$

где α - остаточная вода в % от объема пор;

C_1 - масса сухого образца в г;

C_4 - масса образца после центрифугирования, в г;

V_N - объем пор в образце;

ρ_e - плотность воды при данной температуре.

Работа проводится во всех четырех стаканчиках центрифуги с обязательной балансировкой по весу. Если хорошо сцементированные образцы горных пород при центрифугировании сохраняются в структурном состоянии, то слабо сцементированные - разрушаются. Очень слабые нескрепленные породы еще до центрифугирования при вакуумировании и насыщении их водой разрушаются и переходят в бесструктурное состояние. В этих случаях оставшуюся воду можно определить путем моделирования: насыпьте разрушенную породу (песок) в специальные алюминиевые стаканчики с сетчатым дном и насытите водой область пор. Центрифугируя и отжимая из модели гравитационную воду можно подсчитать остаточную водонасыщенность по формуле (3.3). Однако, сравнение результатов определения остаточной водонасыщенности горных пород, находящихся в структурном и бесструктурном состояниях, показало, что в первом случае ее содержится больше, чем во втором. В то же время погрешность определения остаточной воды, связанная с разрушением породы, колеблется от 16 до 40 %.

3.1. Лабораторное оборудование

Необходимая аппаратура и принадлежности:

Центрифуга типа ЦЭ-3 с предельным количеством оборотов ротора 6200 об/мин.; ЛАТР; вакуум-насос; 5%-ный раствор хлористого натрия (NaCl); аналитические весы;

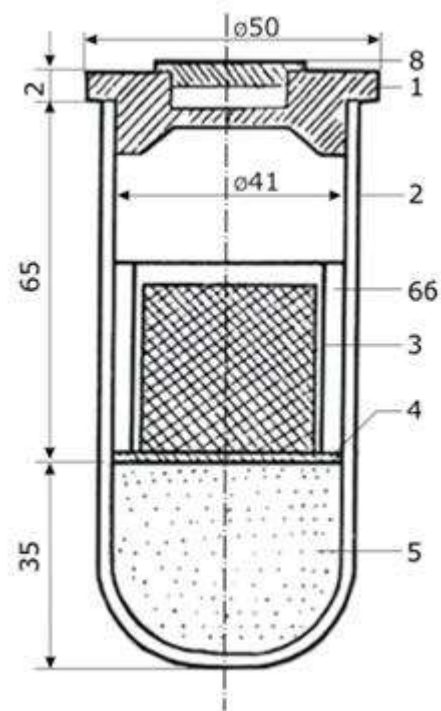


Рис. 3.1. Разрез центрифужного стакана

1 – крышка стакана; 2 – корпус стакана; 3 – образец; 4 – прокладка из фильтровальной бумаги; 5 – песок (поглотитель воды); 6б – кольцо, удерживающее образец; 8 – пробка на крышке.



Рис. 3.2. Весы аналитические



Рис. 3.3. Сушильный шкаф

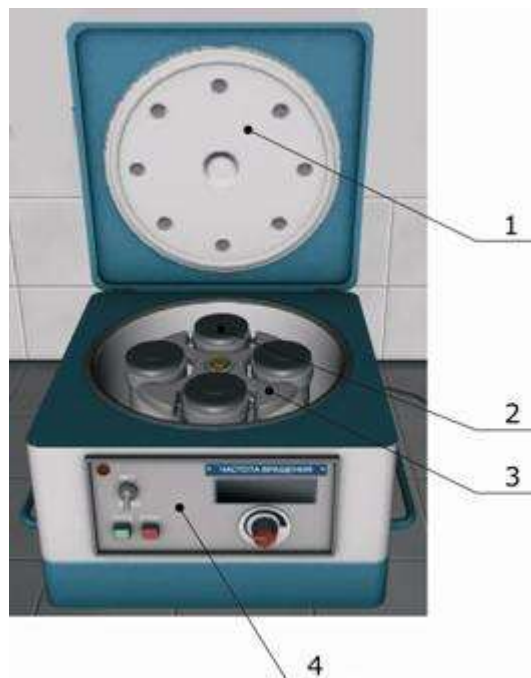


Рис. 3.4. Центрифуга лабораторная
1 – крышка центрифуги; 2 – стакан; 3 – поворотный диск центрифуги;
4 – панель управления

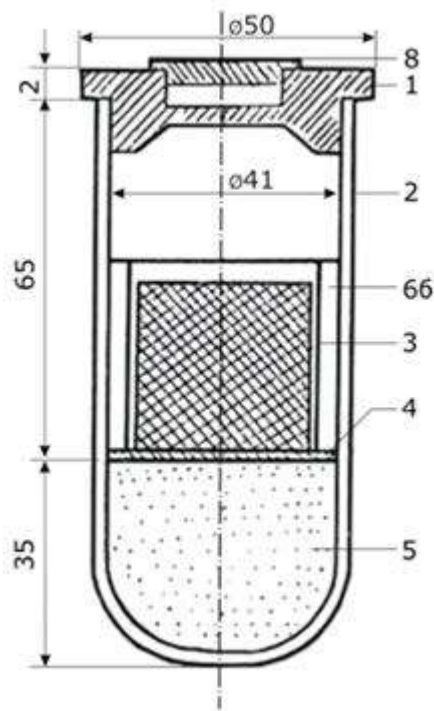


Рис. 3.6. Стакан центрифуги

1 – крышка стакана; 2 – корпус стакана; 3 – образец; 4 – прокладка из фильтровальной бумаги; 5 – песок (поглотитель воды); 66 – кольцо, удерживающее образец; 8 – крышка крышки

3.2. Вычисления

По окончании центрифугирования образец взвешивается на аналитических весах, после чего определяется остаточная водонасыщенность:

$$\alpha = \frac{C_4 - C_1}{V_N \rho_w} * 100\% ,$$

где α - остаточная вода в % от объема пор;

C_1 - масса сухого образца в г;

C_4 - масса образца после центрифугирования, в г;

V_N - объем пор в образце;

ρ_w - плотность воды при данной температуре.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие вам известны категории проницаемости пород-коллекторов?

2. Почему введено понятие абсолютной проницаемости породы?
3. Какие факторы влияют на величину фазовой проницаемости?
4. Назовите основные узлы установки ГК-5.
5. Почему в расчетной зависимости для газопроницаемости используют абсолютные значения давлений и расходы при нормальных условиях?
6. Как записывается расчетная формула?
7. Почему требуется проведение опыта при трех режимах фильтрации газа?

4. Определение остаточной нефтенасыщенности горных пород.

Цель работы - определение остаточной нефтенасыщенности горных пород.

4.1. Описание и работа установки

На рис. 4.1 представлена схема установки для определения остаточной нефтенасыщенности горных пород.

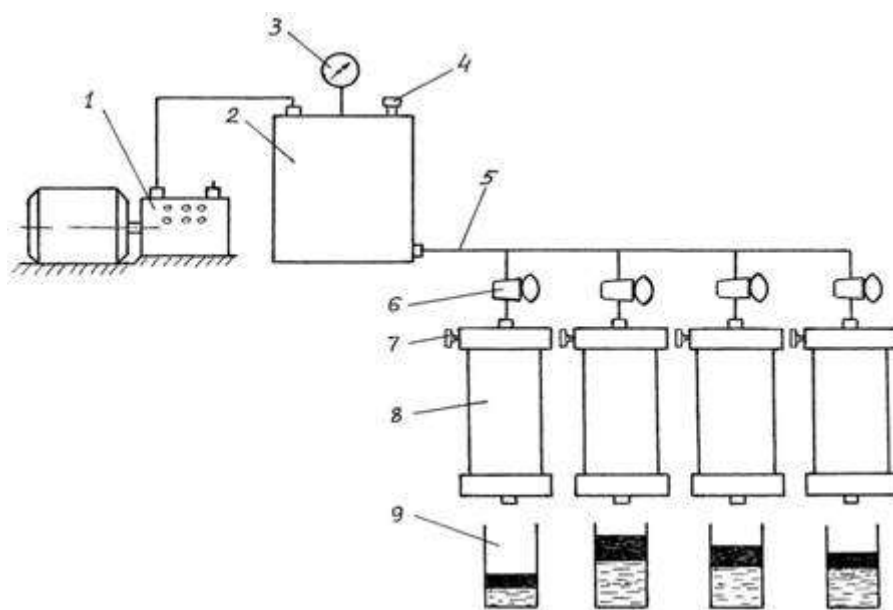


Рис. 4.1. Схема установки

Лабораторная установка состоит из кернодержателей - 8, в которые помещены пронумерованные образцы пород (3-5 штук). К кернодержателям через краны 6 с помощью водонагнетательной линии 5 присоединена напорная ёмкость 2, заполняемая перед опытом на $\frac{3}{4}$ водой. Избыточное давление воздуха над водой в резервуаре 2 создаётся компрессором 1 и контролируется манометром 3. Вытесняющая вода и вытесняемая из образцов породы «нефть» накапливается в мензурках 9.

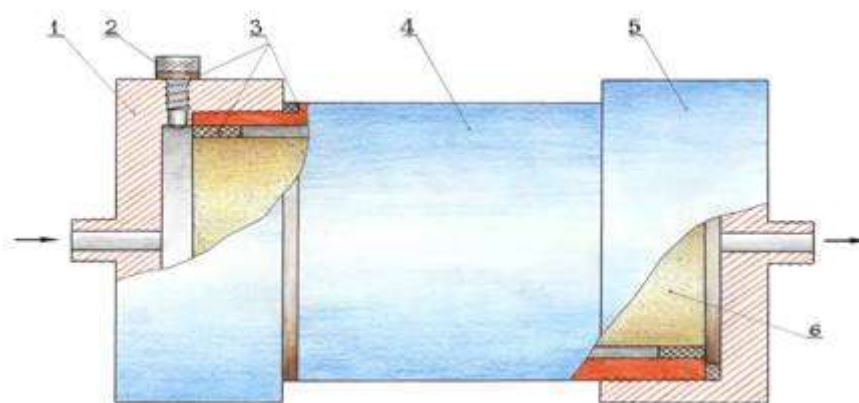


Рис. 4.2. Кернадержатель с вмонтированным в него керном

Кернадержатель состоит из корпуса 4 (рис. 4.2), на который навинчиваются крышки 1 и 5 с герметизирующими уплотнениями 3. В крышке 1 имеется контрольное отверстие, перекрывающееся герметизирующим винтом 2. Образец породы (керна) 6 цилиндрической формы устанавливается внутрь корпуса 4 с использованием герметизирующих уплотнений 3 с обоих торцов керна. Стрелками показано одно из двух возможных направлений движения прокачиваемого воздуха (флюида).

4.2. Выполнение работы

В данной работе используются образцы горных пород, насыщенные «нефтью». Перед проведением работы все краны 6 закрыты. Резервуар 2 заполняется на $\frac{3}{4}$ водой через отверстие 4. Открывается кран 6 над первым слева кернодержателем и выворачивается герметизирующий винт 7. При появлении воды из-под винта 7 он завинчивается до упора, а кран 6 закрывается. Эта операция повторяется со вторым кернодержателем, затем - с третьим и т.д. По окончании этой предварительной части работы вся система от напорной ёмкости 2 до торцов образцов породы в кернодержателях оказывается заполненной водой.

В 4-ом отверстии устанавливается герметизирующая крышка и в резервуаре 2 создаётся избыточное давление, контролируемое манометром 3. В ходе работы, при необходимости, заданное давление поддерживается

периодической работой компрессора 1. После создания необходимого избыточного давления краны 6 над всеми кернодержателями 8 одновременно открываются.

После прохождения через любой кернодержатель трёх (или четырёх) объёмов порового пространства воды кран 6 этого кернодержателя закрывается. Количество вытесненной «нефти» и вытесняющей воды фиксируется по мерным делениям на соответствующей мензурке. Опыт проводится до тех пор, пока через все кернодержатели не пройдёт по три (или по четыре) объёма воды. Затем на установку помещается новая партия пронумерованных кернодержателей с образцами пород, насыщенных нефтью и весь эксперимент повторяется.

4.3. Форма отчета

1. Цель работы.
2. Описание установки и используемых измерительных приборов.
3. Ход работы.
4. Построить зависимость остаточной нефтенасыщенности образцов пород $S_{он}$ от их проницаемости K .
6. Выводы
7. Меры безопасного ведения работ.

Результаты лабораторной работы вносятся в отчет - таблицу 4.1, в которой V_n – объём вытесненной «нефти» из образца породы;

$S_{он} = 1 - V_n / V_{пор}$ - остаточная нефтенасыщенность образца породы.

Таблица 4.1

Результаты определения остаточной нефтенасыщенности образцов пород скважины №....

Показатели	Номера образцов породы							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$V_{пор}, \text{см}^3$								

$V_n, \text{ см}^3$								
$S_{on}, \text{ доли ед}$								
$k * 10^{-15}, \text{ м}^2$								

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите основные элементы установки данной лабораторной работы для определения остаточной нефтенасыщенности горных пород.
2. Опишите порядок выполнения данной лабораторной работы.
3. Запишите формулу для определения остаточной нефтенасыщенности образца горной породы по результатам данной лабораторной работы.
4. Назовите категории насыщенности горных пород флюидами и запишите их формулы.
5. Дайте объяснение причин нелинейности графика зависимости остаточной нефтенасыщенности образцов горных пород от их проницаемости.

5 Определение коэффициента абсолютной проницаемости пород

Цель работы - определение коэффициента абсолютной проницаемости пород.

Для определения абсолютной проницаемости горных пород существуют разнообразные приборы (установки). Однако принципиальные схемы их устройства одинаковы – все они состоят из одних и тех же основных элементов:

- кернодержателя с вмонтированным в него керном, позволяющего фильтровать флюид (жидкость или газ) через пористую среду;
- устройства для измерения давления на входе и выходе из керна (манометров);
- расходомеров;
- приспособлений, позволяющих создавать и поддерживать постоянный расход жидкости или газа через образец породы.

Приборы (установки) отличаются только тем, что одни из них предназначены для измерения проницаемости при больших давлениях (моделирование пластовых условий), другие – при малых давлениях, а третьи – при вакуумировании. Некоторые приборы используются для определения проницаемости по воздуху (газу), другие по жидкости. Поэтому их отдельные блоки имеют совершенно иную конструкцию.

Крепежные элементы соединены между собой металлическими трубами с быстроотвинчивающимися резьбовыми соединениями с уплотнениями на концах. При необходимости, при установке устройства можно использовать тройники и колена.

[Примечание: окрашенный баллон в красный цвет - предупреждение о том, что он находится под давлением, а не для указания о содержании в нём огнеопасного газа].

Габаритные размеры смонтированной установки (без баллона) 900×300×120 мм.

5.1. Описание и работа установки

На рисунке 5.1 изображена схема установки для определения абсолютной проницаемости горных пород по воздуху.

Установка состоит из редуктора 2, присоединённого к системе сжатого воздуха 1 (до 0,15 МПа). От редуктора, позволяющего регулировать давление, воздушная линия идёт на вход кернодержателя 4 с размещённым в нём керном 5. На входе в кернодержатель установлен образцовый манометр 3, показывающий давление P_1 . Расходомер 6 воздуха установлен на выходе из базового стенда для измерения объема газа, проходящего через сердечник, который затем поступает в атмосферу.

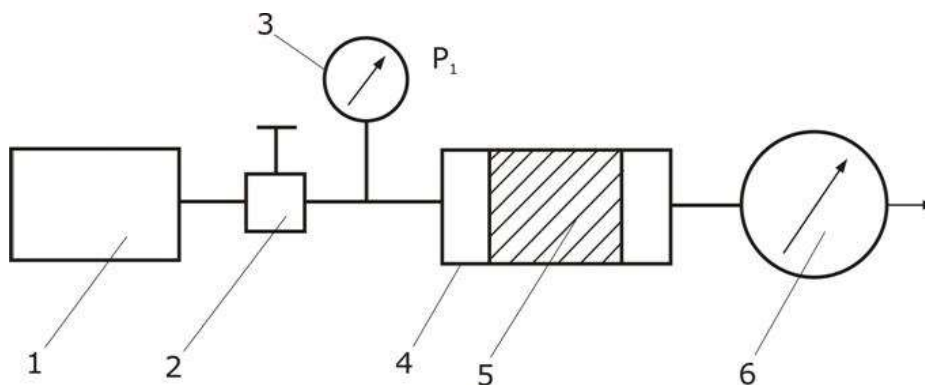


Рис. 5.1. Схема установки для определения абсолютной проницаемости горных пород по воздуху

Конструкция кернодержателя с вмонтированным в него керном изображена на рис. 4.2.

5.2 Выполнение расчетов

При измерении абсолютной проницаемости пород по воздуху (газу) в формулу Дарси следует подставить средний расход воздуха в условиях образца

$$k = \frac{Q\mu L}{F\Delta P} \quad (5.1)$$

где Q - объёмный расход воздуха, приведённый к среднему давлению в керне;

F – площадь поперечного сечения керна.

Необходимость использования среднего расхода газа в этом случае объясняется непостоянством его объёмного расхода при уменьшении давления по длине керна.

Объём воздуха, прошедший через керн, измеряется расходомером при атмосферном давлении на выходе из него и комнатной температуре. Так как перепадом давления на расходомере можно пренебречь из-за его малости по сравнению с давлением на входе в керн, можно считать, что на выходе из образца мы имеем атмосферное давление, величину которого можно определить по барометру.

Распределение давления по длине керна нелинейно, однако, из-за небольшого размера керна и небольшого перепада давления по всему керну этой нелинейностью можно пренебречь. Таким образом, среднее давление вдоль керна составляет

$$P = \frac{P_1 + P_a}{2}, \quad (5.2)$$

где P_1 – давление (абсолютное) на входе в керн;

P_a – атмосферное давление.

Так как манометр показывает избыточное давление над атмосферным на входе в керн, то

$$P_1 = P_a + P_{ман} \quad (5.3)$$

где $P_{ман}$ – показания манометра.

Тогда

$$P = \frac{2P_a + P_{ман}}{2} \quad (5.4)$$

Для приведения объёма газа V , замеренного расходомером при атмосферном давлении P_a , к среднему давлению в керне \bar{P} воспользуемся законом Бойля – Мариотта:

$$P_a V = \bar{V} \bar{P}, \quad (5.5)$$

Откуда

$$\bar{V} = V \frac{P_a}{\bar{P}} = V \frac{2P_a}{2P_a + P_{ман}}$$

Так как

$$\bar{Q} = \frac{\bar{V}}{t}, \quad (5.6)$$

где t – время, в течение которого через керн прошёл объём воздуха V по расходомеру.

Окончательная формула для определения коэффициента проницаемости горной породы по воздуху при малых давлениях будет следующей:

$$k = \frac{V}{t} \frac{\mu L}{F} \frac{2P_a}{(2P_a + P_{ман})P_{ман}} \quad (5.7)$$

В окончательном выражении для вычисления коэффициента абсолютной проницаемости учтено, что перепад давления на керне ΔP равен манометрическому давлению на входе в керн $P_{ман}$ при сделанных допущениях.

5.3 Выполнение работы (пример)

Образцы пород отбираются из 10 скважин. Замеряются длина L и диаметр D образцов породы, отмечаются номера скважин и толщины пропластков, из которых отобран керн. Вычисляются площади поперечного сечения образцов ($F = 0.78D^2$). Образцы пород устанавливаются в кернодержатели в соответствии с рис. 4.2. Установка монтируется в

соответствии со схемой рис. 5.1. Устанавливают редуктором 2 (рис. 5.1) желаемое давление, например 0,1 МПа; выжидают в течение 5 мин и затем измеряют по расходомеру объём воздуха, прошедший через образец породы за какое-либо время. Для лучшей воспроизводимости результатов необходимо замерять расход газа при каждом режиме не менее 3–5 мин.

Данные измерений заносятся в таблицу 5.1, в которую вносятся также результаты вычислений k

Таблица 5.1

Результаты определения коэффициента абсолютной проницаемости горных пород

Номера скважин	Номера образцов	$P_{ман}$, МПа	V , м ³	t , °С	$k \cdot 10^{-15}$, м ²	Примечания

При выполнении работы так же используют исходные данные, заполняемые в таблице 5.2.

Таблица 5.2

Номера образца	Длина образца L , см	Диаметр образца D , см	Объём V_1 , см ³

5.4 Форма отчета

1. Цель работы.
2. Описание установки и используемых измерительных приборов.
3. Ход работы.
4. Заполненные две таблицы, 5.1-5.2
6. Выводы

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите основные элементы приборов (установок) для определения абсолютной проницаемости горных пород.
2. Укажите различия (по назначению) в конструкциях приборов и установок для определения абсолютной проницаемости горных пород.

3. Перечислите составные элементы установки для определения абсолютной проницаемости горных пород данной лабораторной работы.

4. Опишите принцип действия данной установки.

5. Назовите категории проницаемости горных пород и дайте их формулировки.

6. Запишите формулу Дарси для определения абсолютной проницаемости горных пород по воздуху (газу).

7. Объясните, для чего в формулу Дарси вводится объёмный расход воздуха (газа), приведённый к среднему давлению в керне.

8. Запишите окончательную формулу для определения коэффициента абсолютной проницаемости горной породы по результатам проведения данной лабораторной работы.

6. Определение коэффициента открытой пористости пород методом насыщения

Цель работы - определение коэффициента открытой пористости пород методом насыщения их при вакуумировании.

6.1. Описание установки

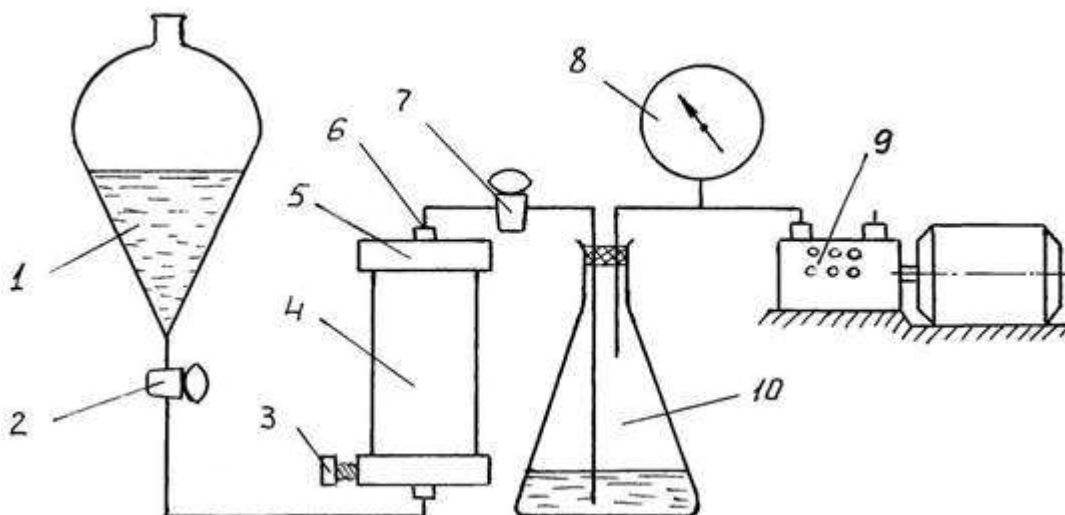


Рис. 6.1 Схема установки для определения пористости методом насыщения при вакуумировании.

1 – мерная колба; 2 - кран; 3 – винт; 4– кернодержатель; 5 – верхняя крышка кернодержателя; 6 – метка; 7 – кран; 8 – вакуумный манометр; 9 – компрессор; 10 – вакуумная колба.

Состав состоит (рис. 6.1) Из объемного стакана 1, заполненного жидкостью, имитирующей свойства нефти в пластовых условиях (далее - "нефть"). В качестве жидкости можно использовать моторное или трансформаторное масло. При необходимости это масло можно разбавить керосином.

Флакон 1 через клапан 2 соединен с подающей трубкой с нижней крышкой базового держателя 4. Нижняя крышка держателя сердца имеет 3-винтовой герметик. К верхней крышке 5 держателя сердца подсоединена прозрачная разрядная трубка, на стыке которой размещена метка с держателем сердца 6. Выпускная труба вставляется через клапан 7 в заполненный выпускной стакан 10 (1/4 – 1/5 части с водой). Нижний конец

патрубка расположен ниже уровня воды. Воздух удаляется из флякона 10 вакуумным компрессором 9, и вакуум регистрируется во фляконе манометром 8 давления воздуха.

Кернодержатель представлен на рисунке 4.2.

6.2 Выполнение лабораторной работы

Установка монтируется в соответствии со схемой на рис. 6.1. Перед проведением лабораторной работы замеряется объём (V_1) свободного пространства крышки 5 до метки 6 (рисунок 3) на прозрачной отводной линии от кернодержателя 4 до крана 7. Замер этого объёма осуществляется заполнением его отмеряемым количеством жидкости. В кернодержателе помещён пронумерованный образец породы. Краны 2 и 7 закрыты. В мерную колбу 1 заливается «нефть». Вывинчивается герметизирующий винт 3, затем открывается кран 2. После появления из-под винта 3 «нефти» этот винт вворачивается в крышку 5 до упора. По делениям мерной шкалы на колбе 1 отмеряется количество «нефти», находящейся в ней. Включают компрессор 9, и в колбе 10 создают разрежение 0,01 – 0,012 МПа, что регистрируется манометром 8. Затем выжидают 1–2 минуты, убеждаясь в герметичности установки. Затем кран 7 плавно открывают и по появляющимся, – у нижнего торца отводной трубки, опущенной в воду, – пузырькам воздуха убеждаются в нормальной работе установки. При необходимости компрессор 9 периодически откачивает воздух из колбы 10, поддерживая запланированное разрежение. Опыт продолжают до тех пор, пока «нефть», пройдя через образец породы, не достигнет отметки 6. После этого краны 7 и 2 закрывают, а по делениям мерной шкалы на колбе 1 измеряют объём «нефти» (V_2), прошедшей через образец породы, находящийся в кернодержателе 4.

Количество «нефти», вошедшей в поры образца породы, вычисляется как разность объёмов:

$$V_{пор} = V_2 - V_1 \quad (6.1)$$

Открытая пористость:

$$m_o = \frac{V_{nop}}{V_{обр}} = \frac{V_{nop}}{FL} \quad (6.2)$$

F - площадь поперечного сечения образца

L - длина образца

Результаты замеров и вычислений по формулам (7.1) и (7.2) заносятся в таблицу 6.1 и 6.2.

В графу 6 таблицы 6.1 заносятся среднеарифметические значения пористости:

$$m_o^{(cp)} = \frac{m_o + m_o^{(1)}}{2} \quad (6.3)$$

В графу 7 этой же таблицы вносятся значения проницаемости k .

Таблица 6.1

Результаты измерения открытой пористости образцов пород по скважине №...

Номера образцов	V_2 , см ³	V_{nop} , см ³	m_o , доли ед.	$m_o^{(1)}$, доли ед.	$m_o^{(cp)}$, доли ед.	$k * 10^{-15}$, м ²
1	2	3	4	5	6	7

Таблица 6.2

Наименование вариантов	Длина образца L , см	Диаметр образца D , см	Объём V_1 , см ³

Примечание: различия в замерах m_o и $m_o^{(1)}$ находятся в пределах от 2,1% до 4,5%.

По данным таблицы 6.1 строится графическая зависимость проницаемости пород от их пористости

6.3 Форма отчета

1. Цель работы.
2. Описание установки и используемых измерительных приборов.
3. Ход работы.
4. Заполненные две таблицы, 6.1-6.2
6. Выводы

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите основные элементы установки для определения пористости образцов горных пород методом насыщения при вакуумировании.
2. Опишите порядок выполнения лабораторной работы №3.
3. Запишите формулу для определения открытой пористости образца горной породы по результатам данной лабораторной работы.
4. Перечислите другие методы определения пористости горных пород.
5. Назовите категории пористости горных пород и дайте их формулировки.
6. Объясните причины, из-за которых в данной лабораторной установке используется не реальная дегазированная нефть, а жидкость её имитирующая.
7. Дайте объяснение причин нелинейности графика зависимости абсолютной проницаемости образцов горных пород от их пористости.

Литература:

1. Гиматудинов Ш.К., Дунюшкин И.И., Нагорный Л.А. Сборник лабораторных работ по курсу «Физика нефтяного пласта» / Ш.К. Гиматудинов, И.И. Дунюшкин, Л.А. Нагорный. – М.:МИНГ, 1987. – 68 с.: ил.
2. Гиматудинов Ш.К., Ширковский А.И. Физика нефтяного и газового пласта: Учебник для вузов / Ш.К. Гиматудинов, А.И. Ширковский. – М.:ООО ТИД «Альянс», 2005. – 311 с.: ил.
3. Медведев Ю.А. Физика нефтяного и газового пласта: Курс лекций / Ю.А. Медведев. – Тюмень:ТюмГНГУ, 2000. – 158 с.: ил.
4. Филин В.В., Медведев Ю.А. Разработка нефтяных месторождений: Учебно-методическое пособие / В.В. Филин, Ю.А. Медведев. – Тюмень:ТюмГНГУ, 2007. – 74 с.: ил.
5. Медведев Ю.А. Физика нефтяного и газового пласта: Курс лекций / Ю.А. Медведев. – Тюмень:ТюмГНГУ, 2000. – 158 с.: ил.
6. Желтов Ю.П. Разработка нефтяных месторождений: Учебник для вузов / Ю.П. Желтов. – М. ОАО «Изд-во «Недра», 1998. – 365 с.: ил.
7. Сборник задач по разработке нефтяных месторождений: Учебное пособие для вузов / Ю.П. Желтов, И.Н. Стрижов, А.Б. Золотухин, В.М. Зайцев – М.: Недра, 1985. – 296 с.: ил.