

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное учреждение высшего профессиональ-
ного образования

«Казанский (Приволжский) федеральный университет»

Институт геологии и нефтегазовых технологий

Изучение кинетики впитывания жидкостей в пористые среды

Методические указания к лабораторной работе

Составители: Ф.А. Губайдуллин, П.В. Исаев

Казань 2017

Методические указания к лабораторной работе

Изучение кинетики впитывания жидкостей в пористые среды: Метод. указания/ КПФУ; Сост.: Ф.А. Губайдуллин, П.В. Исаев. Казань, 2017. - 11 с.

Представлена лабораторная работа для учебно-исследовательского практикума студентов. Дано описание лабораторного прибора для изучения кинетики впитывания жидкостей в пористые среды. Рассмотрена методика проведения испытаний и обработки результатов.

Методические указания предназначены для студентов (бакалавров, магистров), аспирантов и научных работников при изучении капиллярных явлений пластов-коллекторов. Подготовлена на кафедре разработки и эксплуатации месторождений трудноизвлекаемых углеводородов Института геологии и нефтегазовых технологий (ИГ и НГТ).

Методические указания к лабораторной работе рассмотрены и одобрены на заседании кафедры разработки и эксплуатации месторождений трудноизвлекаемых углеводородов ИГ и НГТ, и рекомендованы к изданию «_1_» августа 2017 г., протокол № _3_

И.О. зав. кафедрой разработки
и эксплуатации месторождений
трудноизвлекаемых углеводородов
ИГ и НГТ

_____ В.В. Зацепин

Председатель
учебно-методической комиссии _____

Рецензент

Доктор геолого-минералогических наук
профессор кафедры ИГ и НГТ

_____ О.Н. Лопатин

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение нефтеотдачи пластов (повышение степени извлечения нефти из недр) - самая актуальная и острая проблема на протяжении всей истории развития нефтяной промышленности. В основе подавляющего большинства методов увеличения нефтеотдачи пластов лежит заводнение. При этом вода образует промытые зоны, обходя низкопроницаемые интервалы, где остается трудноизвлекаемая нефть. Известно, что нефтеносные породы представляют собой пористые системы (*пористость* $m = 0,1 \div 0,25$) [1]. В таких системах важнейшее значение имеют капиллярные явления [2, 3, 6]. В настоящее время существует большое количество технологий увеличения нефтеотдачи пласта, которые в той или иной мере используют капиллярные явления. Как правило, эти технологии включают закачку в пласт химических реагентов, которые обладают способностью изменять свойства поверхности пористого коллектора гидрофобизуя или гидрофилизуя её. Закачиваемые реагенты должны удовлетворять целому ряду требований: обладать определенными реологическими характеристиками, химической и бактериологической устойчивостью, быть доступными и не слишком дорогими, т.е. экономически выгодными, малотоксичными и обладать достаточной глубиной проникновения в пласт.

В результате разработки новых технологий увеличения нефтеотдачи, в настоящее время необходима более полная информация о поверхностных явлениях, происходящих внутри пористого коллектора. Поэтому **целью данной работы** является освоение методики определения кинетики впитывания и вычисление величины капиллярного давления.

СУЩНОСТЬ МЕТОДА

В основе предлагаемой методики лежит фиксирование изменения массы налитой в стаканчик жидкости при самопроизвольном впитывании ее в пористую модель породы - коллектора.

Метод предназначен для измерения капиллярного давления различных жидкостей непосредственно в пористых средах. При этом капиллярное давление оценивается по кинетике впитывания и рассчитывается по формулам, описанным в статьях [4, 5].

Одним из факторов, определяющих капиллярное впитывание, является смачивание жидкостью твердого тела.

Рассмотрим некоторые положения теории смачивания [6].

При соприкосновении жидкости с твёрдым телом важной характеристикой является краевой угол смачивания θ , образующийся между поверхностями твёрдого тела и жидкости. Рассмотрим поверхность твёрдого тела с нанесённой на него каплей. В такой системе существует три различных поверхности раздела фаз: между твёрдым телом и газом, жидкостью и газом и жидкостью и твёрдым телом с поверхностными натяжениями, соответственно, $\sigma_{тг}$, $\sigma_{жг}$ и $\sigma_{тж}$. Линия пересечения всех трёх поверхностей раздела называется линией смачивания; замкнутая линия смачивания образует периметр смачивания. Угол между поверхностями

жидкость – газ и твёрдое тело – и есть краевой угол смачивания θ .

Рассматривая поверхностные натяжения как силы, приложенные перпендикулярно к единице длины периметра смачивания и действующие по касательной к

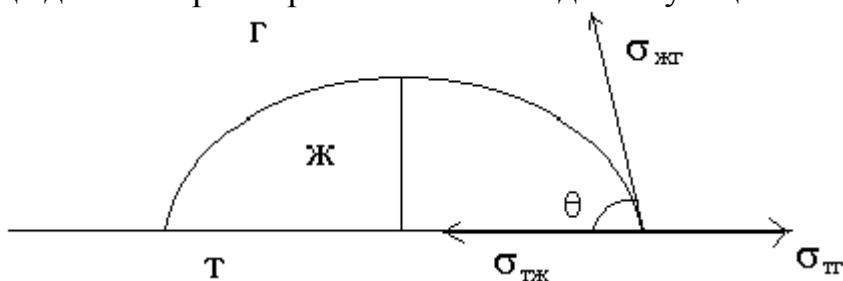


Рис 1. Капля жидкости на поверхности твёрдого тела

соответствующим поверхностям (рис.1) можно записать условие равновесия этих сил, выражаемое уравнением Юнга:

$$\sigma_{тг} = \sigma_{жг} \cdot \cos\theta + \sigma_{тж} \quad (1)$$

или

$$\cos\theta = \frac{\sigma_{тг} - \sigma_{тж}}{\sigma_{жг}} \quad (2)$$

При хорошем смачивании твёрдого тела водой говорят о гидрофильности поверхности ($\theta < 90^\circ$), при плохом смачивании ($\theta > 90^\circ$) говорят о гидрофобности поверхности.

Также, одним из параметров смачивания является капиллярное давление. Рассмотрим причины его возникновения. Т.к. силы поверхностного (межфазного) натяжения направлены по касательной к поверхности жидкости, искривление последней ведет к появлению составляющей, направленной внутрь объёма жидкости. В результате возникает капиллярное давление, величина которого Δp связана со средним радиусом кривизны поверхности r_0 уравнением Лапласа:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = 2\sigma_{12}/r_0, \quad (3)$$

где p_1 и p_2 – давления в жидкости 1 и соседней фазе 2 (газе или жидкости), σ_{12} – поверхностное (межфазное) натяжение. Если поверхность жидкости вогнута ($r_0 < 0$), давление в ней оказывается пониженным по сравнению с давлением в соседней фазе $p_1 < p_2$ и $\Delta p < 0$. Для выпуклых поверхностей ($r_0 > 0$) знак Δp изменяется на обратный. Отрицательное капиллярное давление, возникающее в случае смачивания жидкостью стенок капилляра, приводит к тому, что жидкость будет всасываться в капилляр до тех пор, пока вес столба жидкости высотой h не уравновесит перепад давления Δp . В состоянии равновесия высота капиллярного поднятия определяется формулой Жюрена:

$$-\Delta p = (2\sigma_{12}\cos\theta)/r, \quad (4)$$

В случае, когда жидкость впитывается не в пористое тело, действуют те же самые законы, что и для единичного капилляра.

Модели пористых тел можно условно разделить на капиллярные и глобулярные. Капиллярная модель – совокупность сквозных, не сообщающихся между

собой цилиндрических капилляров одного радиуса. По существу такая модель представляет собой модель предельно пористого анизотропного тела, в котором фильтрация возможна только в двух (встречных) направлениях. Это модель так называемого идеального грунта.

Простейшей моделью пористого тела глобулярной структуры является так называемый фиктивный грунт – пористое тело, образованное одинаковыми сферическими частицами. Это модель пористого изотропного тела. Пористость и проницаемость слоёв песка, аэросила, саж, микрокапсул, межзерновая пористость слоёв сферических гранул силикагеля, оксида алюминия и керамзита близки к пористости и проницаемости фиктивного грунта, причём проницаемость зависит, а пористость не зависит от среднего размера частиц. В дальнейшем нами будет использоваться капиллярная модель пористого тела.

Кинетика капиллярного впитывания по Григорьеву [5].

Согласно формуле Уошборна, для кинетики пропитки открытых капилляров пористых систем

$$\tau = \frac{8\eta}{r^2 \sigma \cos \theta \rho g \sin \alpha} \left(l_\infty \ln \frac{l_\infty}{l_\infty - l} - l \right), \quad (5)$$

где τ и l – соответственно время и глубина пропитки;

η – вязкость жидкости;

r – радиус капилляра;

σ – поверхностное или межфазное натяжение;

θ – краевой угол смачивания

ρ – плотность жидкости;

g – ускорение свободного падения;

α – угол наклона капилляра к горизонтальному направлению;

l_∞ – предельная глубина пропитки при $r \rightarrow \infty$.

Разлагая выражение (5) в ряд Маклорена и ограничиваясь двумя первыми членами ряда (начальный участок пропитки) получим

$$l^2 = \frac{r \sigma \cos \theta \tau}{2\eta} \quad (6)$$

При этом принимается, что капиллярное давление $P_k = \frac{2\sigma \cos \theta}{r} \gg \rho g \sin \alpha$

и для начального участка кинетической кривой это допущение хорошо выполняется. Переходя к зависимости $M=f(\tau)$, путём дальнейших преобразований можно получить следующее уравнение кинетики впитывания жидкости в трубку радиусом R , заполненную пористым материалом:

$$M^2 = \frac{\pi^2 R^4 m \rho^2 \delta^2 k}{\eta} P_{k(\text{эф})} \tau \quad (7)$$

где P_k – капиллярное давление [1]:

$$P_{k(\text{эф})} = \frac{2\sigma \cos \theta}{r_{\text{эф}}}$$

При преобразовании уравнения выводится формула для расчета капиллярного давления:

$$P_{\text{к(эф)}} = \frac{\text{tg}\alpha \cdot \eta}{\pi^2 R^4 m \rho^2 \delta^2 K}, \quad (8)$$

где $\text{tg}\alpha$ - тангенс угла наклона прямой, построенной в координатах $M^2 - \tau$;
 η и ρ - соответственно вязкость и плотность исследуемой жидкости;
 R - радиус трубки;
 m и K - соответственно пористость и проницаемость модели коллектора;
 δ - коэффициент извилистости (для песка $\delta=1,5$).

УСТРОЙСТВО ПРИБОРА

Прибор состоит из трёх функциональных блоков: измерительный блок - 1, ёмкость с исследуемой жидкостью - 2, трубка с моделью пористой среды.

Измерительный блок представляет собой автоматические одноплечевые весы - 1, ёмкость с исследуемой жидкостью - 2, трубка заполненная моделью пористой среды - 3.

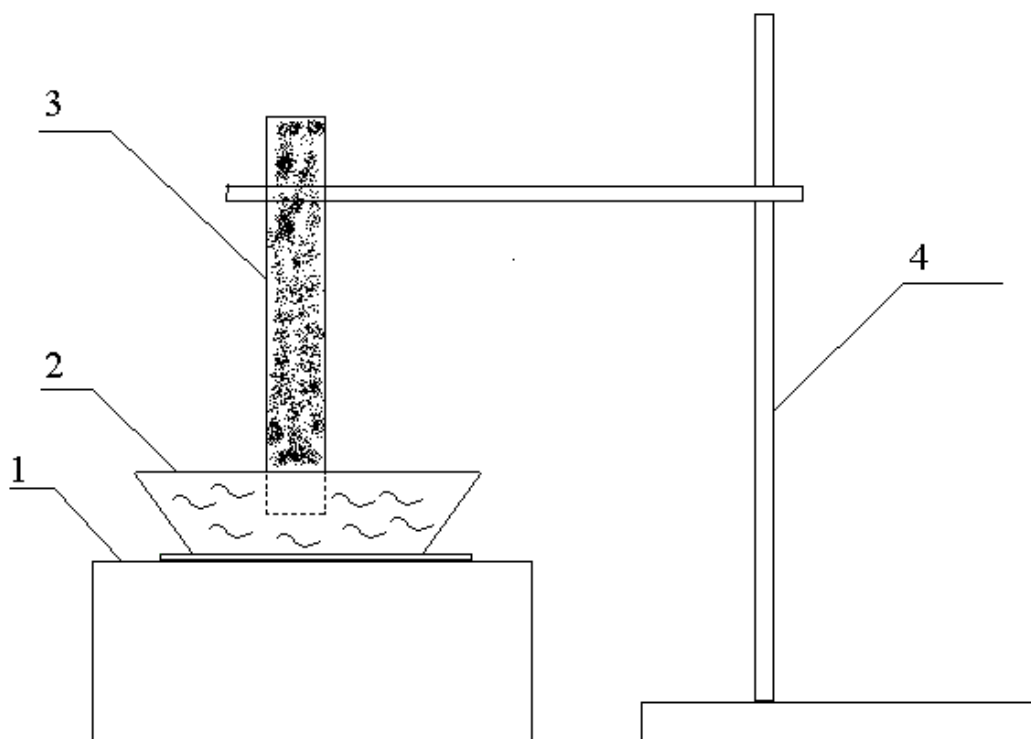


Рис. 2 Принципиальная схема установки

1 – автоматические одноплечевые весы; 2 – ёмкость с исследуемой жидкостью;
3 – трубка с исследуемой жидкостью; 4 – штатив.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проведения эксперимента необходимо выполнить следующее:

1. Установить автоматические одноплечевые весы строго горизонтально.
2. Поставить на чашу весов ёмкость с исследуемой жидкостью.
3. В штативе 4 вертикально закрепить трубку с моделью пористой среды 3.
4. Опустить трубку 3 в ёмкость 2 так, чтобы уровень исследуемой жидкости доходил до метки на трубке, после чего измерить массу системы M_0 .
5. Фиксировать изменение массы чашки с исследуемой жидкостью через определённые (по указанию преподавателя) промежутки времени.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

В ходе эксперимента фиксируются начальное (M_0) и текущие (M_τ) значения показаний измерительной шкалы весов. Масса впитавшейся жидкости:

$$M = M_0 - M_\tau, \text{ г}, \quad (9)$$

Строится зависимость $M^2 - \tau$. Данная методика расчёта применима при условии, что гидростатическое давление столба жидкости пренебрежимо мало по сравнению с капиллярным давлением. Это ограничение хорошо выполняется на начальном участке кривой, поэтому для расчёта берутся во внимание первые 25 – 30 значений. Зависимость $M^2 - \tau$ аппроксимируется к прямой. Определяется тангенс угла наклона этой прямой, который подставляется в формулу (10).

Далее рассчитывается капиллярное давление:

$$P_{\text{к(эф)}} = \frac{\text{tg}\alpha \cdot \eta}{\pi^2 R^4 m \rho^2 \delta^2 K} \quad (10)$$

Пример расчета

При впитывании воды получены следующие данные:

Таблица 1 – Зависимость массы впитавшейся воды от времени

Время впитывания τ , с	Масса впитавшейся жидкости M , г	Квадрат массы впитавшейся жидкости M^2 , г^2
1	2	3
0	0	0
4	1,1	1,21
8	1,6	2,56
12	2,1	4,41
16	2,4	5,76

Продолжение таблицы 1

1	2	3
20	2,8	7,84
24	3,1	9,61
28	3,3	10,89
32	3,5	12,25
36	3,7	13,69
40	3,9	15,21
44	4	16
48	4,1	16,81
52	4,2	17,64
56	4,4	19,36
60	4,5	20,25
64	4,5	20,25
68	4,6	21,16
72	4,7	22,09
76	4,8	23,04
80	4,8	23,04
84	4,9	24,01
88	4,9	24,01
92	5	25
96	5	25
100	5,1	26,01
104	5,1	26,01
108	5,2	27,04
112	5,2	27,04
116	5,2	27,04

По данным таблицы 1 строится зависимость $M^2 - \tau$ (рис. 3) и определяется тангенс угла наклона аппроксимированной прямой.

Капиллярное давление рассчитывается по формуле (11):

$$P_{к(эф)} = \frac{\text{tg}\alpha \cdot \eta}{\pi^2 R^4 m \rho^2 \delta^2 K}, \quad (11)$$

где $R=0,085$ м;
 $m=0,36$;
 $K=3,01 \cdot 10^{-13}$ м²;
 $\delta=1,5$;
 $\eta=1 \cdot 10^{-3}$ Па*с;
 $\rho=1000$ кг/м³;
 $\text{tg}\alpha=0,2706 \cdot 10^{-6}$.

$$P_{к(эф)}=(0,2706 \cdot 10^{-3}) \cdot (3,14^2 \cdot 0,085^4 \cdot 0,36 \cdot 1000^2 \cdot 1,5^2 \cdot 3,01 \cdot 10^{-13})=2156,5 \text{ Па.}$$

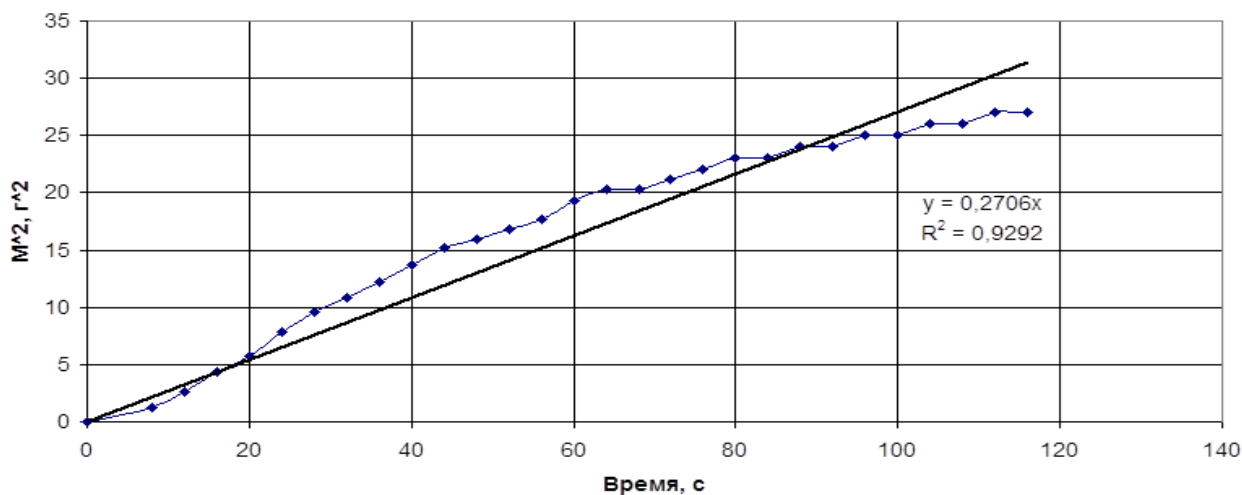


Рис. 3 Кинетическая кривая впитывания воды

Список литературы

1. Мирзаджанадзе А. Х., Аметов И. М., Ковалёв А.Г. Физика нефтяного и газового пласта.– М.: Недра, 1992.-270 с.
2. Гиматутдинов Ш.К., Ширковский А.И. “ Физика нефтяного и газового пласта. “ М, Недра, 1982г.- 311 с.
3. Аксельруд Г. А., Альтшулер М.А. Введение в капиллярно-химическую технологию.– М.: Химия, 1983.-264 с.
4. Метод расчёта параметров смачивания и коэффициента проницаемости по кинетике впитывания жидкости в пористые тела/Г.А. Григорьев, Т.В. Ингерова, В.Д. Москвин, А.Т. Горбунов//Нефтяное хозяйство.–1994. №5.–С.45-49.
5. Порхаев А.П. Кинетика впитывания жидкости элементарными капиллярами и пористыми материалами//Коллоидный журнал. – 1949. №5.–С.1208-1215
6. Щукин Е.Д., Перцов А.В., Амелина Е.А. Коллоидная химия. М.: Московский университет, 1982.-348 с.

Для заметок

