

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ ПО
ДИСЦИПЛИНЕ
«Исследование скважин и пластов»

Направление подготовки	21.03.01 Нефтегазовое дело	
Направленность (профиль)	Эксплуатация и обслуживание объектов добычи нефти	
Год начала обучения	2026	
Форма обучения	очная	очно-заочная
Реализуется в семестре	___6___	___6___

Ставрополь 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №1 Изучение приборов для замера давления. Единицы измерения. Класс точности.....	4
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №2 Измерение и расчет гидростатического давления.....	11
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №3 Изучение ламинарного и турбулентного режимов течения жидкости	16
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №4 Определение опытным путем слагаемых уравнения д. Бернулли.	21
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 5 Определение дебитов скважин при вытеснении нефти водой в изотропном пласте при жестком водонапорном режиме	28
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №6 Расчёт динамических пластовых давлений в экранированном пласте.....	33
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 7 Расчёт распределения давления в однородном изотропном пласте при неустановившейся фильтрации упругой жидкости	36
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 8 Гидродинамические исследования скважин методом восстановления давления	41

ПРЕДИСЛОВИЕ

Целью и задачей изучения дисциплины является приобретение студентами знаний об основных понятиях гидравлики и нефтегазовой гидромеханики.

Эти знания нужны для применения на объектах будущей профессиональной деятельности выпускника, а также для производственно - технологической, управленческой, научно-исследовательской, проектной и эксплуатационной деятельности.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

- знать теоретические основы гидравлики и нефтегазовой гидромеханики, основные понятия гидростатики;
- уметь определять режим течения жидкости, определять структурные формы движения жидкости;
- владеть навыками расчета гидростатического давления, расчета местных сопротивлений в трубопроводе.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №1 Изучение приборов для замера давления.

Единицы измерения. Класс точности.

Цель: изучение приборов для замера давления.

В результате выполнения задания формируется компетенция: ПК-27 готовность оценивать требуемые данные в своих исследованиях по средствам проектирования и проведения наблюдений, моделирования, компьютерной имитации или экспериментов

Актуальность: Измерение давления необходимо для управления технологическими процессами и обеспечения безопасности производства.

Теоретическое обоснование

Измерение давления необходимо для управления технологическими процессами и обеспечения безопасности производства. Кроме того, этот параметр используется при косвенных измерениях других технологических параметров: уровня, расхода, температуры, плотности и т. д. В системе СИ за единицу давления принят паскаль (Па).

В большинстве случаев первичные преобразователи давления имеют неэлектрический выходной сигнал в виде силы или перемещения и объединены в один блок с измерительным прибором. Если результаты измерений необходимо передавать на расстояние, то применяют промежуточное преобразование этого неэлектрического сигнала в унифицированный электрический или пневматический. При этом первичный и промежуточный преобразователи объединяют в один измерительный [преобразователь](#).

Измерение давления является одним из самых главных видов измерений в любых отраслях промышленности. Надежность измерения этого параметра гарантирует безопасность и целостность установки, а также требуется во многих процессах учета расхода жидкостей, измерения абсолютного и дифференциального давления в коррозионных и абразивных средах. Для измерения давления используют манометры, вакуумметры, напоромеры, тягомеры, тягонапоромеры, датчики давления.

Аппаратура и материалы

1. Поршневой манометр.
2. Пружинный манометр.

Указания по технике безопасности

1. Лабораторная работа выполняется только после инструктажа по безопасности с обязательной росписью студентов в журнале по безопасности.
2. Допуск к приборам студентов, выполняющих лабораторную работу осуществляется только в присутствии преподавателя.

Методика и порядок выполнения работы

1. Классификация приборов для измерения давления по типу чувствительного элемента

По виду упругого чувствительного элемента пружинные приборы делятся на следующие группы:

- 1) приборы с трубчатой пружиной, или собственно пружинные (рис. 1.1а,б);

мембранные приборы, у которых упругим элементом служит мембрана (рис. 1.1в), анероидная или мембранная коробка (рис. 1.1г,д), блок анероидных или мембранных коробок (рис. 1.1е,ж);

пружинно-мембранные с гибкой мембраной (рис. 1.1з);

приборы с упругой гармониковой мембраной (сильфоном) (рис. 1.1к);

пружинно-сильфонные (рис. 1.1и).

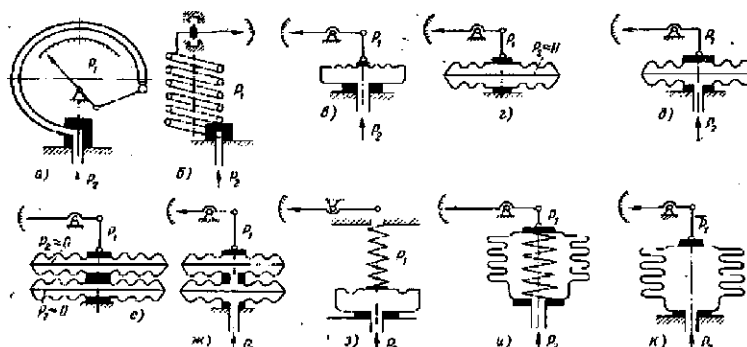


Рис. 1.1. Типы пружинных устройств

2. Определение понятия «давление», точное измерение давления и соотношение между ними

Давление является одним из важнейших параметров химико-технологических процессов. От величины давления часто зависит правильность

протекания процесса химического производства. Под давлением в общем случае понимают предел отношения нормальной составляющей силы к площади, на которую действует сила. При равномерном распределении сил давление равно частному от деления нормальной составляющей силы давления на площадь, на которую эта сила действует. Величина единицы давления зависит от выбранной системы единиц (табл. 1.1).

Различают абсолютное и избыточное давление. Абсолютное давление P_a — параметр состояния вещества (жидкостей, газов и паров). Избыточное

давление $P_{и}$ представляет собой разность между абсолютным давлением P_a и барометрическим давлением P_b (т. е. давлением окружающей среды):

$$P_{и} = P_a - P_b$$

Если абсолютное давление ниже барометрического, то

$$P_v = P_b - P_a,$$

где P_v — разрежение.

Единицы измерения давления: Па (Н/м^2); кгс/см^2 ; мм вод. ст.; мм рт.ст.

Таблица 1.1 - Соотношение между единицами давления:

Единицы давления	кгс/м^2 или мм вод. ст.	кгс/см^2 или атм. (техническая атмосфера)	атм. (физическая атмосфера)	мм рт. ст.	Н/м^2
1 кгс/м^2 или	1	10^{-4}	$0,0968 \cdot 10^{-3}$	$73,556 \cdot 10^{-3}$	9,80665
1 кгс/см^2 или 1 атм. (техническая атмосфера)	10^1	1	0,9678	735,56	98066,5
1 атм. (физическая атмосфера)	10332	1,0332	1	760,00	101 325
1 мм рт. ст.	13,6	$1,36 \cdot 10^{-3}$	$1,316 \cdot 10^{-3}$	1	133,322
1 Н/м^2	0,102	$10,2 \cdot 10^{-6}$	$10,13 \cdot 10^{-6}$	$7,50 \cdot 10^{-3}$	1

Приборы для измерения давления подразделяются на: а) манометры - для измерения абсолютного и избыточного давления;

- б) вакуумметры - для измерения разряжения (вакуума);
- в) мановакуумметры - для измерения избыточного давления и вакуума;
- г) напоромеры - для измерения малых избыточных давлений (верхний предел измерения не более 0,04 МПа);
- д) тягомеры - для измерения малых разряжений (верхний предел измерения до 0,004 МПа);
- е) тягонапорометры - для измерения разряжений и малых избыточных давлений;
- ж) дифференциальные манометры - для измерения разности давлений;
- з) барометры - для измерения барометрического давления атмосферного воздуха.

Понятие «поверка» рабочего измерительного прибора

Поверка рабочего измерительного прибора - операция сравнения его показаний с показаниями образцового измерительного прибора при прямом и обратном ходе. Цель поверки - определение погрешностей рабочего прибора или поправок к его показаниям. При этом показания образцового прибора принимаются за действительные значения измеряемой величины.

Возможные источники систематических погрешностей приборов с упругим чувствительным элементом

Возможные источники систематических погрешностей могут быть следующими:

- Переход за предельное по шкале давление при измерении, хотя бы один раз за всё время измерений. Предельное давление, при котором еще сохраняется линейная зависимость между перемещениями конца трубки (чувствительного элемента) и давлением, называется пределом пропорциональности трубки. При переходе давления за предел пропорциональности трубка приобретает остаточную деформацию и становится непригодной для измерения.

Механическая характеристика трубки, т.е. значение предела пропорциональности и величина перемещения свободного конца, зависит от ряда факторов, из которых наиболее важными являются отношение осей сечения

трубки, толщина ее стенок, модуль упругости материала и радиус дуги изгиба трубки.

Трение трубки о внутренние части прибора в результате их поломки.

Периодическое изменение температуры при измерениях. Материал трубки по-разному сжимается и разгибается в зависимости от температуры.

6. Классификация погрешностей измерения

Любое измерение не может быть выполнено абсолютно точно, его результат всегда содержит некоторую ошибку. В задачу измерений входит не только измерение контролируемой величины, но и оценка допущенной при измерении погрешности. Причины возникновения погрешностей измерений можно подразделить на группы: инструментальные, методические и субъективные.

Инструментальные погрешности — это составляющая погрешностей измерения, зависящая от погрешностей применяемых средств измерения. Инструментальные погрешности являются следствием недостатков конструкции измерительных приборов, несоблюдения технологии их изготовления, несовершенства применяемых материалов, трения в механизмах, несовершенства упругих чувствительных элементов и т.п. Эти погрешности могут быть частично устранены регулировкой прибора. К инструментальным погрешностям относятся и погрешности, вызванные изменением внешних условий. Например, в зависимости от температуры изменяется жесткость пружин, мембран и других деталей, от размеров деталей передаточного механизма прибора, электрического сопротивления проводников - магнитные свойства материалов и т. п.

В некоторых случаях температурные погрешности можно определить расчетным путем, а в показания прибора могут вноситься соответствующие поправки. Инструментальные погрешности измерительного прибора складываются из погрешностей преобразователей (звеньев), составляющих прибор. Инструментальные погрешности в процессе эксплуатации прибора могут изменяться (например, погрешности трения могут возрастать от засорения механизма прибора пылью, из-за коррозии деталей, нарушения нормальной смазки и т. п.).

Чтобы быть уверенным, что инструментальная погрешность находится в допустимых пределах, приборы подвергают поверке.

Методические погрешности являются следствием неточности метода измерения или недостаточного знания всех обстоятельств, сопровождающих измерение.

Субъективные погрешности зависят от индивидуальных особенностей лица, производящего измерение (недостаточно точное отсчитывание показаний и т. п.).

Статические погрешности измерения в зависимости от причин появления принято подразделять на систематические, грубые (промахи) и случайные.

Систематическими называются погрешности, величина которых одинакова во всех измерениях, проводящихся одним и тем же методом с использованием одних и тех же измерительных приборов. К систематическим погрешностям относятся инструментальные; погрешности, вызванные неправильной установкой прибора (например, установкой не по отвесу или уровню); методические.

Перед каждым измерением необходимо выявить возможные источники систематических погрешностей и принять меры к их исключению или определению; в большинстве случаев учет систематических погрешностей затруднителен. Сложность задачи исключения систематических погрешностей заключается в том, что нельзя предложить общий способ решения этой задачи. Для определения систематических погрешностей необходимо их изучить, что делается с помощью специально поставленных экспериментов.

Наиболее ответственные измерения выполняют различными методами, чтобы получить несколько результатов, независимых друг от друга по источникам погрешностей, и затем сопоставить их. Если даже все систематические погрешности учтены, т. е. вычислены и введены все поправки, то и в этом случае результаты измерений все же не свободны от случайных погрешностей.

Грубыми (промахами) называются погрешности, которые явно искажают результат измерения. Эти погрешности получаются, например, из- за

неправильной записи результатов измерения, неверной схемы включения прибора и т. п. Измерения, содержащие грубые погрешности, исключаются из ряда измерений по соответствующему критерию.

Случайными называются погрешности, не подчиняющиеся какой-либо известной закономерности. Они возникают в результате влияния на процесс измерения случайных факторов (вибрация прибора, влияние посторонних электромагнитных полей, физиологические изменения органов чувств наблюдателя и т.п.). Случайные погрешности всегда присутствуют в эксперименте; они в равной степени могут быть как положительными, так и отрицательными. Случайные погрешности не могут быть исключены опытным или расчетным путем. Для учета влияния случайных погрешностей на результат измерения одну и ту же величину измеряют многократно. К ряду значений применяют законы теории вероятностей и методы статистики, на основании которых учитывают влияние случайных погрешностей на результат измерения.

Содержание отчета и его форма

В отчете должны быть приведены:

- номер лабораторной работы, ее тема и цель работы;
- краткая теория по теме работы;
- аппаратура и материалы;
- методика и порядок выполнения работы;
- делается вывод о соответствии измеренному давлению заданному значению.

Контрольные вопросы и защита работы

1. Перечислите основные элементы типовой схемы для проведения ГДИС?
 2. Назовите основные цели проведения ГДИС на стадии промышленной разведки месторождения?
 3. Почему при проведении гидродинамических исследований по взаимодействию скважин необходимо использовать более точные датчики?
 4. Назовите основное преимущество испытателя пласта, спускаемого на трубах перед традиционными ГДИС на неустановившихся режимах фильтрации?
- Как приближенно оценить сжимаемость газа c_g в газовых скважинах?

Какие режимы течения наблюдаются на различных периодах исследования в горизонтальных скважинах?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №2 Измерение и расчет гидростатического давления

Цель: освоить методы измерения гидростатического давления.

В результате выполнения задания формируется компетенция: ПК-10 готовность оценивать требуемые данные в своих исследованиях по средствам проектирования и проведения наблюдений, моделирования, компьютерной имитации или экспериментов

Актуальность: Измерение давления необходимо для управления технологическими процессами и обеспечения безопасности производства.

Теоретическое обоснование

Гидростатическим давлением называют нормальное сжимающее напряжение в неподвижной жидкости, т.е. силу, действующую на единицу площади поверхности. За единицу измерения давления в международной системе принят паскаль ($\text{Па} = \text{Н/м}^2$).

Различают абсолютное, атмосферное, манометрическое, вакуумметрическое давления. Абсолютное (полное) давление p

отсчитывается от абсолютного вакуума. Атмосферное давление P_a создается силой тяжести воздуха атмосферы и принимается в обычных условиях равным 101325 Па или 760 мм рт. ст. Избыток давления над атмосферным называют манометрическим (избыточным) давлением ($P_m = P_a - P$).

Приборы для измерения атмосферного давления называли барометрами, манометрического - манометрами, вакуума - вакуумметрами. По принципу действия и типу рабочего элемента приборы бывают жидкостными, механическими и электрическими. Жидкостные приборы исторически стали применяться первыми. Их действие основано на принципе уравнивания измеряемого давления P силой тяжести столба жидкости высотой h в приборе:

$$P = \rho gh,$$

где ρ - плотность жидкости, g - ускорение свободного падения.

Поэтому величина давления может быть выражена высотой столба жидкости h (мм рт. ст., м вод. ст.). Преимуществами жидкостных приборов являются простота конструкции и высокая точность, однако они удобны только при измерении небольших давлений. В механических приборах измеряемое давление вызывает деформацию чувствительного элемента (трубка, мембрана, сильфон), которая с помощью специальных механизмов передается на указатель. Недостатком таких приборов является инерционность, что не позволяет использовать их для измерения мгновенного значения давления в быстропротекающих процессах.

В электрических приборах воспринимаемое чувствительным элементом давление преобразуется в электрический сигнал. Сигнал регистрируется показывающим (вольтметр, амперметр) или пишущим (самописец, осциллограф) приборами. В последнем случае можно фиксировать давление при быстропротекающих процессах.

Абсолютное давление в любой точке покоящейся жидкости определяется по основному уравнению гидростатики:

$$P = P_0 + \rho g H,$$

где P_0 - абсолютное давление на свободной поверхности жидкости; ρ - плотность жидкости; H - глубина погружения точки под свободной поверхностью.

В работе вычисляется давление в заданной точке (например, на дне резервуара) через показания различных приборов и затем сравниваются результаты, полученные двумя путями.

Аппаратура и материалы

1. Жидкостный манометр.

Указания по технике безопасности

Лабораторная работа выполняется только после инструктажа по технике безопасности с обязательной росписью студентов в журнале по технике безопасности.

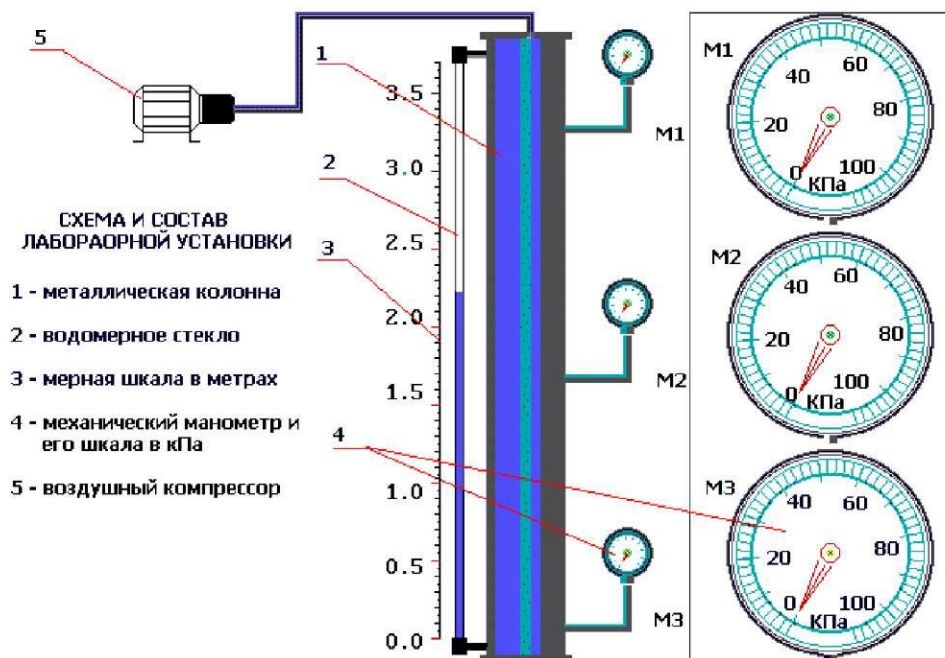
Допуск к приборам студентов, выполняющих лабораторную работу, осуществляется только в присутствии преподавателя.

Методика и порядок выполнения работы

Необходимо выполнить два опыта, обеспечив в первом

$$P_{0\text{абс}} = P_{\text{ат}} \wedge P_{0\text{изб}} = 0, \text{ а во вто} P^{\text{ом}} - P_{0\text{абс}} > P_{\text{ат}} \wedge P_{0\text{изб}} > 0.$$

Опыт №1. Открыть вентиль 6, для обеспечения $p = 0$, далее, измерить с помощью водомерной трубки 5 и шкалы 4 глубины погружения



превышения y_B и y_C осей вращения стрелок манометров M_B и M_C над точками их подключения. Затем измерить показания всех трёх манометров (M_A , M_B , M_C). Полученные данные записать в таблицу 3.1 (графы 4 и 6).

Опыт №2. Закрыть вентиль 6, а вентиль 7, открыть. Затем включить компрессор и для подачи сжатого воздуха в цилиндр 1. Довести p_0 до величины, указанной преподавателем, после чего компрессор отключить. Далее, измерить одновременно показания манометров M_A , M_B , M_C . Результаты измерений записать в графу 5 таблицы 3.1. Открыть вентиль 6 для сброса давления сжатого воздуха. (Рисунок 1.1)

Выполнить все вычисления, предусмотренные таблицей 3.1. Дать заключение по результатам работы.

Рисунок 2.1. Схема экспериментальной установки для изучения закона Б.Паскаля

Таблица 2.1

№ пози- ций	Наименования и обозначения измеряемых и вычисляемых величин		Г и и н е р е м и
-------------------	--	--	---

Содержание отчета и его форма

В отчете должны быть приведены:

- номер лабораторной работы, ее тема и цель работы;
- краткая теория по теме работы;
- аппаратура и материалы;
- методика и порядок выполнения работы;
- делается вывод о соответствии измеренном давлению заданному значению.

Контрольные вопросы и защита работы

1. Что такое гидростатическое давление и каковы его свойства?
2. Поясните, что такое абсолютное и избыточное гидростатическое давление и какова связь между ними?
3. Напишите и поясните основное уравнение гидростатики.
4. Сформулируйте закон Паскаля.
5. Назовите приборы для измерения избыточного гидростатического давления и поясните принцип их действия.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №3 Изучение ламинарного и турбулентного режимов течения жидкости

Цель: 1. Установить опытным путём наличие двух режимов движения жидкости, а также переход одного режима в другой.

2. Определить число Рейнольдса для каждого режима движения; сравнить его с критическим числом Рейнольдса.

В результате выполнения задания формируется компетенция: ПК-26 способность выбирать и применять соответствующие методы моделирования физических, химических и технологических процессов

Актуальность: Изучение ламинарного и турбулентного режимов течения жидкости необходимо для проведения последующих расчетов гидродинамики

Теоретическое обоснование

Возьмём прозрачную трубу, в которой с небольшой скоростью течёт прозрачная жидкость, например, вода. В этот поток поместим небольшие, существенно меньшие, чем диаметр потока, трубки. В трубках под напором

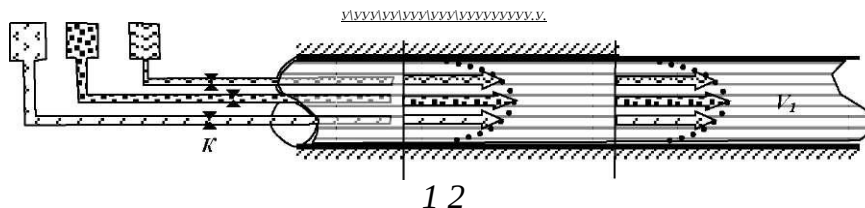


Рисунок 3.1 - Ламинарный режим течения жидкости.

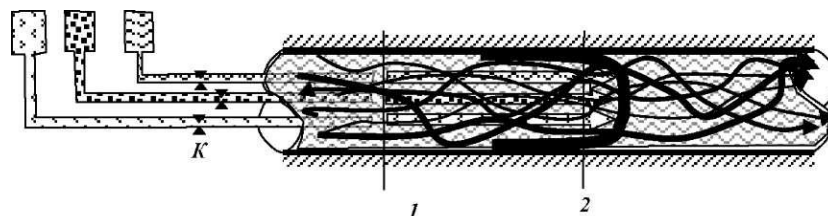


Рисунок 3.2 - Турбулентный режим течения жидкости находится подкрашенная жидкость, например, цветные чернила, которая может из них вытекать, если открыть краны *K*. Будем открывать их на короткое время (1-3 секунды) и прекращать подачу чернил через какие-то промежутки времени так, чтобы можно было проследить движение цветной жидкости. В таком случае в потоке будут возникать разноцветные струйки, причём цветная жидкость будет явно показывать распределение скоростей (эпюра скоростей) по сечению потока. Если наблюдать за движением жидкости, то можно ясно видеть, что при перемещении от сечения 1 к сечению 2 картина распределения скоростей будет оставаться постоянной, а движение жидкости будет слоистым, плавным, все струйки тока будут параллельны между собой. Такое движение носит название *ламинарное* (от латинского слова *lamina* - слой).

Если еще больше увеличить скорость жидкости, то обязательно наступит такой момент, когда характер движения жидкости радикально изменится. Цветные струйки начнут сначала колебаться, затем размываться и интенсивно перемешиваться. Течение потока становится беспокойным, с постоянным вихреобразованием. Эпюра распределения скоростей по сечению потока приблизится к прямоугольной форме, а значения скоростей в разных сечениях потока станут практически равны средней скорости движения жидкости.

Такое течение жидкости называется *турбулентным* (от латинского слова *turbulentus* - возмущённый, беспорядочный).

Если снова уменьшить скорость течения жидкости, восстановиться ламинарный режим движения. Переход от одного режима движения к другому будет происходить примерно при одной и той же скорости, которую называют критической скоростью и обозначают $U_{кр}$. Эксперименты показывают, что значение этой скорости прямо пропорционально кинематическому коэффициенту вязкости жидкости ν и обратно пропорционально диаметру трубопровода d (для

наиболее часто применяемых труб круглого сечения) или гидравлическому радиусу потока R (для других типов труб и русел).

$$V_{кр} = k \sqrt[4]{d}$$

Критерием режима движения жидкости служит безразмерное число Рейнольдса; для напорных труб круглого сечения число Рейнольдса записывается в виде

$$Re = \frac{u \cdot d}{\nu}$$

где u - средняя скорость потока, м/с; d - диаметр трубы, м;

ν - кинематическая вязкость жидкости, m^2 / c :

Число Рейнольдса, определяющее границу перехода ламинарного режима в турбулентный, называют критическим. Для круглых труб $Re^* = 2320$.

При $Re^* < 2320$ имеет место устойчивый ламинарный режим движения.

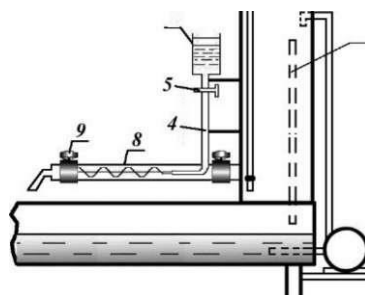
При $Re^* > 2320$ режим движения может оставаться еще ламинарным, но неустойчивым и меняется при малейшем возмущении, например сотрясении трубы, переходит в турбулентный.

Аппаратура и материалы

Установка для определения числа Рейнольдса, термометр, мерный сосуд, секундомер

Экспериментальная установка состоит из напорного бака 3, стеклянной трубы 8 с вентилем 9 на конце, позволяющим изменять расход воды, протекающей по трубе. На напорном баке 3 помещается бачок 2 с подкрашенной жидкостью, которая по тонкой трубке 4 с иглой на конце, подается в поток воды. Расход краски регулируется краном 9.

1



Указания по технике безопасности

Рис. 3.3. Схема установки для исследования режимов движения жидкости.

1. Лабораторная работа выполняется только после инструктажа по технике безопасности с обязательной росписью студентов в журнале по технике безопасности.

2. Допуск к приборам студентов, выполняющих лабораторную работу, осуществляется только в присутствии преподавателя.

Методика и порядок выполнения работы

Включить насос и наполнить напорный бак до уровня переливной трубы, кран закрыть, дать выдержку времени 1 -2 мин для успокоения воды в баке.

Открыть вентиль 9 на конце стеклянной трубы 8.

Открыть (очень немного) кран 5 и ввести тонкую струйку краски в поток воды в стеклянной трубе 8.

При малых скоростях воды в трубе вводимая в поток краска не будет перемешиваться с ней, что указывает на наличие ламинарного режима движения жидкости.

Измерить расход воды в стеклянной трубе объёмным способом.

Измерить температуру воды в баке с помощью термометра.

При большем открытии крана 9 будет наблюдаться устойчивый турбулентный режим, характеризующийся интенсивным перемешиванием краски с водой. При этом следует повторить измерения расхода и температуры.

Закрыть кран 5 бачка с подкрашенной жидкостью.

Результаты измерений расхода воды и температуры занести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 -Экспериментальные и расчётные данные

№ п/п	Наименование показателей	Опыт	
		1	2
1	Внутренний диаметры трубы d, м		
2	Площадь сечения $m=\frac{\pi d^2}{4}$		
3	Ёмкость мерного сосуда V, м ³		

4	Время наполнения мерного сосуда t , с.		
5	Расход воды $Q = \frac{V}{t}$, м ³ /с		
6	Средние скорости $u = \frac{Q}{a'}$, м/с		
7	Температура воды, $t^{\circ}\text{C}$		
8	Коэффициент кинематической вязкости ν , м ² /с		
9	Число Рейнольдса $Re = \frac{u \cdot d}{\nu}$		
10	Режим движения жидкости		

Содержание отчета и его форма

В отчете должны быть приведены:

- номер лабораторной работы, ее тема и цель работы;
- краткая теория по теме работы;
- аппаратура и материалы;
- методика и порядок выполнения работы;
- Результаты вычислений занести в таблицу 3.1
 - Используя экспериментальные и расчётные данные, сделать вывод о зависимости режима движения жидкости от числа Рейнольдса.

3.5. Контрольные вопросы

1. Какие существуют режимы движения жидкости? Поясните их особенности и отличия.
2. По какому критерию можно судить о существовании данного режима движения жидкости? Можно ли заранее прогнозировать режим движения жидкости?

.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №4 Определение опытным путем слагаемых уравнения д. Бернулли.

Цель: Определить опытным путем слагаемые уравнения Д. Бернулли. Вычислить средние скорости потока и отвечающие им скоростные напоры $U^2/2g$ для указанных живых сечений потока жидкости.

В результате выполнения задания формируется компетенция: ПК-26 способность выбирать и применять соответствующие методы моделирования физических, химических и технологических процессов

Актуальность: Уравнение Бернулли является основополагающим выражением в гидравлике.

Теоретическое обоснование

Для двух произвольно выбранных живых сечений струйки реальной жидкости при установившемся движении уравнение Д. Бернулли имеет вид:

$$Z + \frac{p}{\rho g} + \frac{U^2}{2g} = \text{const} + h_{wl} \quad (6.1)$$

Слагаемые, входящие в уравнение (6.1), можно истолковать с геометрической и энергетической точек зрения.

С геометрической точки зрения, слагаемые уравнения (6.1) являются высотами (напорами): Z - геометрическая высота (напор), т.е. превышение центра тяжести рассматриваемого поперечного сечения струйки над плоскостью сравнения 0-0, выбираемой произвольно; $p/\rho g$ пьезометрическая высота, т.е. высота подъема жидкости в пьезометре, подключенном к центру тяжести рассматриваемого сечения струйки, отвечающая гидродинамическому давлению p в этой точке; $U^2/2g$ - скоростная высота (напор), отвечающая местной скорости U , т.е. скорости в центре тяжести сечения;

$$\begin{aligned} Z & \text{ --- гидростатический напор;} \\ \frac{p}{\rho g} & \text{ --- пьезометрический напор;} \\ \frac{U^2}{2g} & \text{ --- скоростной напор;} \end{aligned}$$

$$Z + \frac{H}{Pg} + \frac{U^2}{2g} = H - \text{полный напор в рассматриваемом сечении}$$

струи;

$h_{w1-2} = H - H_2$ - потеря полного напора, т.е. часть полного напора, затраченная на преодоление гидравлических сопротивлений между сечениями.

С энергетической точки зрения слагаемые уравнения (6.1) представляют собой разновидности удельной энергии а именно:

Z - удельная потенциальная энергия положения жидкости в рассматриваемом сечении струи;

P/pg - удельная потенциальная, энергия. давления; $U^2/2g$ - удельная кинетическая энергия;

$$Z + \frac{P}{Pg} + \frac{U^2}{2g} = H - \text{полная удельная энергия;}$$

$$\frac{Z}{Pg} + \frac{P}{Pg} = H - \text{удельная потенциальная энергия;}$$

h_{w1-2} - потеря полной удельной энергии струи, т.е. часть ее, затраченная на преодоление работы сил внутреннего трения, обусловленного вязкостью жидкости.

Удельной энергией называется энергия, приходящаяся на единицу веса жидкости.

Величины слагаемых уравнения (6.1) могут быть определены опытным путем следующим образом:

z - геометрическим нивелированием, или же измерением линейкой P/pg - с помощью пьезометрической трубки (пьезометра); $U^2/2g$ - по разности отметок уровней жидкости в скоростной и пьезометрической трубках, подключенных к рассматриваемой точке живого сечения, подключенных к сечениям.

Скоростная трубка представляет собой трубку, верхний конец которой открыт в атмосферу, а нижний изогнут навстречу скорости и в рассматриваемой сечения струи.

h'_{w1-2} - по разности отметок уровней воды в скоростных трубках, точке потока жидкости. Благодаря этому у входа в изогнутый конец скоростной трубки кинетическая энергия частицы жидкости преобразуется в потенциальную энергию давления столба жидкости высотой $h_u = U^2/2g$.

Поскольку срез нижнего конца скоростной трубки перпендикулярен вектору скорости, а срез нижнего конца пьезометра параллелен, уровень жидкости в скоростной трубке всегда устанавливается выше, чем в пьезометре, на величину $U^2/2g$.

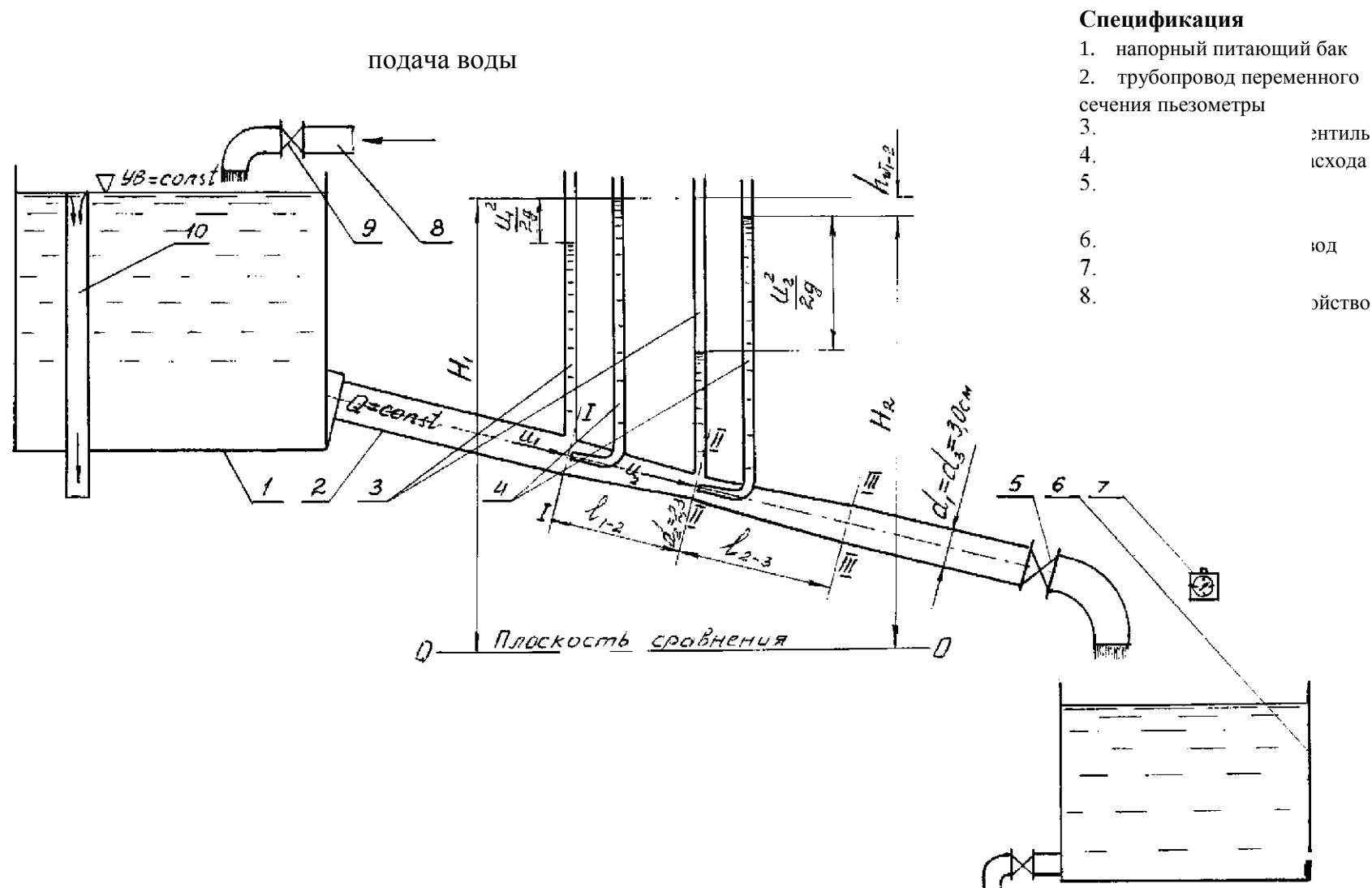


Рисунок 6.1 . Схема установки для экспериментальной иллюстрации уравнения Д. Бернулли

Прибор, объединяющий конструктивно пьезометрическую (П) и скоростную (С) трубки, называется трубкой Пито и широко применяется для измерения скорости движения жидкости $U = \sqrt{2gh_u}$.

Для двух сечений потока реальной жидкости уравнение Д. Бернулли имеет вид:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{a_1 U_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{a_2 U_2^2}{2g} + h_{w1-2} \quad (6.2)$$

где $\frac{aU^2}{2g}$ – скоростной напор, отвечающий средней скорости $U = \frac{Q}{a}$ потока

жидкости в рассматриваемом живом сечении (здесь Q , - расход потока жидкости, a - площадь живого сечения потока);

h_{w1-2} - потеря полного напора (полной удельной энергии) на преодоление работы сил внутреннего и внешнего трения на пути между живыми сечениями потока жидкости;

a - коэффициент Кориолиса (корректив кинетической энергии), учитывающий неравномерность распределения местных скоростей u по живому сечению потока, обусловленную вязкостью жидкости.

Величина a зависит от режима течения жидкости, а также от вида движения. Так, при равномерном движении для ламинарного режима $a=2,0$, а для турбулентного - $a=1,05 \dots 1,15$.

Слагаемые уравнений (6.1) и (6.2) в различных живых сечениях можно изображать графически в виде диаграммы уравнения Д. Бернулли (графика напоров), дающей наглядное представление о перераспределении по пути движения жидкости потенциальной и кинетической энергии, а также о характере убывания полной энергии.

Аппаратура и материалы.

Установка (рисунок 6.1) представляют собой трубопровод 2 переменного сечения с напорным баком 1, вода в который подается по питающему трубопроводу 8 открытием вентиля 9. Бак 1 снабжен переливным устройством 10 для поддержания уровня воды на постоянной отметке, чтобы обеспечить в трубопроводе 2

установившееся движение жидкости. К сечениям I-I...II-II трубопровода 2 подключены пьезометры 3 и скоростные

л

трубки 4 для измерения величин $p/\rho g$ и $U^2/2g$. Величина расхода воды в трубопроводе 2 регулируется вентилем 5. Для измерения расхода воды имеются мерный бак 6 и секундомер 7.

Указания по технике безопасности

1. Лабораторная работа выполняется только после инструктажа по технике безопасности с обязательной росписью студентов в журнале по технике безопасности. 2. Допуск к приборам студентов, выполняющих лабораторную работу, осуществляется только в присутствии преподавателя.

Методика и порядок выполнения работы

1. При закрытом вентиле 5 открыть вентиль 9 для заполнения бака 1 и трубопровода 2 водой. При этом следует обратить внимание на уровни воды в пьезометрических 3 и скоростных трубках 4. Эти уровни при отсутствии воздуха в системе должны быть на одной отметке.
2. Открыть вентиль 5 так, чтобы трубопровод 2 работал полным сечением, а уровень воды в баке постоянным.
3. Измерить с помощью бака 6 и секундомера 7 расход воды. Затем линейкой измерить геометрические высоты z центров тяжести сечений II. II-II относительно плоскости сравнения 0-0, отмеченной на установке.
4. Далее, определить по шкалам отметки уровней воды в пьезометрах и скоростных трубках. Результаты всех измерений записать в таблицу 6.1. Затем выполнить все вычисления, предусмотренные таблицей 6.1, и построить в масштабе по полученным данным линии полного напора и пьезометрическую.

12	Средняя скорость в сечении: $V = Q/S$,	м/с			
13	Скоростная высота, по средней скорости $V^2/2g$	м			
14	Сравнение скоростных высот по трубке Пито и по средней в сечении: $(U^2/2g - V^2/2g) / V^2/2g$	%			
		м			
1	2	3	4	5	6
2	Геометрические высоты центров тяжести сечений, z	м			
3	Отметки уровней воды в пьезометрах, т.е. гидростатические напоры $(z+p/pg)$	м			
4	Отметки уровней воды в скоростных трубках, т.е. полные напоры $H = z + P/pg + U^2/2g$,	м			
5	Пьезометрические высоты $(z + P/pg) - z$,	м			
6	Скоростные высоты $U^2/2g = H - (z + P/pg)$				
7	Потери полного напора на пути между соседними живыми сечениями: $h_{el(i+1)} = H_1 - H_w$	м			
8	Суммарные потери полного напора: $h_{el-III} = H - H_{in}$	м			
9	Объем воды в мерном баке: W ,	м ³			
10	Время наполнения мерного объема: t ,	сек			
11	Расход воды в трубопроводе: $Q = W/t$,	м			

Содержание отчета и его форма

В отчете должны быть приведены:

- номер лабораторной работы, ее тема и цель работы;
- краткая теория по теме работы;
- аппаратура и материалы;
- методика и порядок выполнения работы;

Контрольные вопросы и защита работ

- Дать заключение по результатам работы и внести полученные данные в таблицу 6.1.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 5 Определение дебитов скважин при вытеснении нефти водой в изотропном пласте при жестком водонапорном режиме

Цель

Определить динамику отборов нефти из пласта, эксплуатируемого двумя рядами скважин: одним рядом добывающих и одним - нагнетательных. Построить графики зависимости отборов нефти от времени ее вытеснения. Сопоставить точность результатов расчетов при шаге перемещения фронта в 20 и 100 м. Построить распределение давления в нефте- и водонасыщенной частях залежи для одного произвольно выбранного положения фронта вытеснения. Определить также полное время вытеснения нефти водой.

В результате выполнения задания формируется компетенция: ПК-10 способность выбирать и применять соответствующие методы моделирования физических, химических и технологических процессов

Актуальность: При разработке нефтяных месторождений при режимах вытеснения, например, при водонапорном, происходит стягивание контура нефтеносности под действием напора воды. Продвижение водонефтяного контакта описывают с помощью двух моделей - поршневого и непоршневого вытеснения.

Указания по выполнению работы

При выполнении расчетов необходимо:

принять модель поршневого вытеснения нефти водой;

учесть гидродинамическое несовершенство добывающих скважин, которые вскрывают пласт на всю толщину и обсажены эксплуатационными колоннами диаметром 6. В скважинах перфорировано 70 % разреза. Графики для определения коэффициентов, учитывающих гидродинамическое несовершенство скважин, представлены в приложении 3.

принять фильтрационные параметры пласта по данным исследования скважины при установившихся режимах.

Исходные данные для расчетов принять в соответствии с приложением 1 (табл. 3-4).

Краткие теоретические сведения

При разработке нефтяных месторождений при режимах вытеснения, например, при водонапорном, происходит стягивание контура нефтеносности под действием напора воды. Продвижение водонефтяного контакта описывают с помощью двух моделей - поршневого и непоршневого вытеснения.

Поршневое вытеснение

В общем случае на границе раздела двух жидкостей с различными физическими свойствами происходит преломление линий тока. Учет этого преломления и составляет главную трудность в точном решении задачи о вытеснении нефти водой. Линии тока не преломляются при одномерном и радиальном движениях, когда в начальный момент времени они перпендикулярны границе раздела. Для этих случаев получены точные решения, при этом жидкост принимаются несжимаемыми, пласт - горизонтальным, режим пласта - водонапорным, фильтрация - происходящей по линейному закону.

При решении задачи о поршневом вытеснении нефти водой в полосообразной залежи учитывается различие в вязкости нефти и воды, плотность той и другой считаются одинаковой, что дает возможность

рассматривать границу раздела вертикальной.

Фронт вытеснения по мере его продвижения занимает последовательные положения, одно из которых показано на рис. 1.

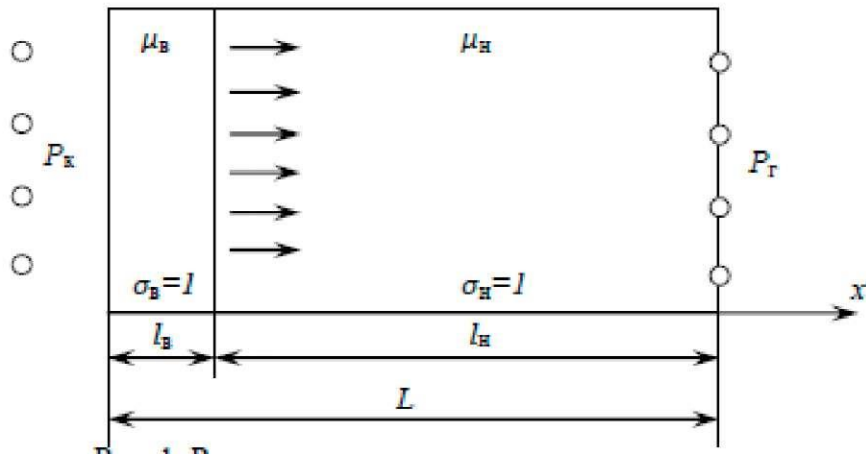


Рис. 1. Расчетная схема поршневого вытеснения нефти водой из полосообразной залежи

Порядок выполнения работы

1. Для определения фильтрационных параметров пласта производится обработка индикаторной диаграммы.

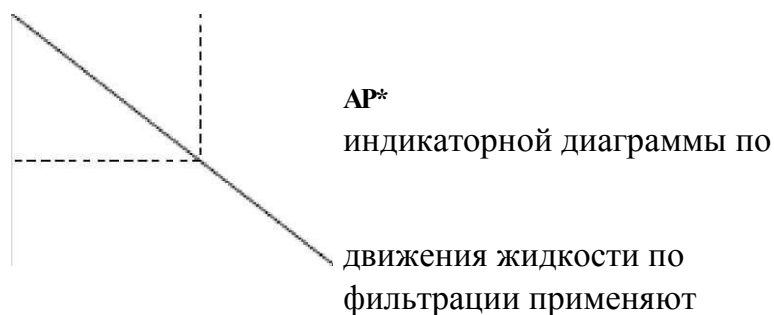
Порядок интерпретации результатов замеров следующий. Фактические значения дебитов и депрессий наносятся на график в координатах (ΔP^Q). Если полученные точки соединяются прямой линией, выходящей из начала координат, то делается вывод о том, что в пласте имеет место установившееся движение жидкости по линейному закону фильтрации. На линии выбирается произвольная точка, для которой определяются значения дебита и депрессии определяется коэффициент продуктивности: По определенному коэффициенту продуктивности в соответствии с формулой (1) можно вычислить значение коэффициента проницаемости:

$$K_{\text{прод}} = \frac{Q}{\Delta P_c}$$

ДРс*

Рисунок 2 - Обработка формуле Дюпюи

В случае установившегося нелинейному закону двучленную формулу:



Для обработки индикаторной диаграммы уравнение (3) преобразуется:

Индикаторная диаграмма.

ЛР,
Tt

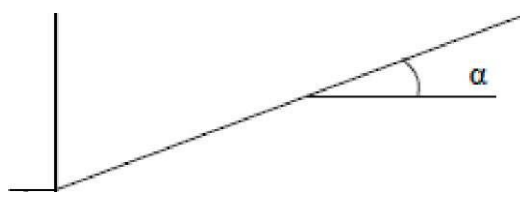


Рис.3. Обработка индикаторной диаграммы по двухчленной формуле

Прямая линия отсекает на оси ординат отрезок А, по углу ее наклона определяют коэффициент В.

Коэффициент проницаемости вычисляют по формуле:

А Ъ —

$2\lambda AN$

Коэффициент проницаемости, полученный при обработке результатов исследования скважин при установившихся режимах, характеризует всю зону дренирования пласта в среднем.

Из приведенной формулы видно, что дебит нефти при заданных постоянных значениях P_k и P_g возрастает при продвижении границы раздела, если вязкость нефти больше вязкости воды.

нефтенасыщенная часть (P_n):

3. Распределение давления в нефте- и водонасыщенной частях залежи определится по формулам:

$$P_g = P_k - \frac{\mu_g \cdot (P_k - P_c)}{\mu_n \cdot (L_x - l_g) + \mu_g \cdot l_g} \cdot x$$

водонасыщенная часть (Рв):

где l_v , l_n - длина, соответственно, водо- и нефтенасыщенной части пласта; x - расстояние до точки, для которой вычисляется давление.

$$P_n = P_z + \frac{\mu_n \cdot (P_k - P_c)}{\mu_n \cdot (L_x - l_g) + \mu_g \cdot l_g} \cdot (L_k - x)$$

Из анализа формул (7 - 8) следует, что величина давления в некоторой точке пласта при вытеснении нефти водой зависит не только от ее координаты, но и от положения фронта вытеснения, которое, в свою очередь, зависит от времени.

То есть даже при постоянстве давлений на контуре питания и в скважинах процесс вытеснения нефти водой является неустановившимся.

4. Время вытеснения нефти водой определяется по формуле:

$$t = \frac{m}{k(P_k - P_z)} \cdot \left[\mu_n \cdot (l_n + l_g) \cdot (l_a - l_{a0}) - \frac{1}{2} (\mu_n - \mu_g) \cdot (l_a^2 - l_{a0}^2) \right]$$

где l_{a0} - начальное положение фронта вытеснения.

Контрольные вопросы

Основные цели и этапы выполнения работы.

Характеристика видов вытеснения нефти водой в залежи.

Параметры, определяемые при обработке индикаторных диаграмм.

Порядок обработки индикаторных диаграмм при линейном законе фильтрации.

Порядок обработки индикаторных диаграмм при нелинейном законе фильтрации.

Факторы, влияющие на форму индикаторных диаграмм.

Понятие о гидродинамическом несовершенстве скважин.

2. Дебит галереи (ряда добывающих скважин) определяется по формуле

1. Виды гидродинамического несовершенства скважин и способы его учета.

$$Q = \frac{kah \cdot (P_e - P_c)}{\mu_a \cdot l_a + \mu_s \cdot l_s}$$

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №6 Расчёт динамических пластовых давлений в экранированном пласте

Цель

Построить карту изобар для участка однородного изотропного экранированного пласта, в котором работают две скважины (первая - добывающая; вторая - нагнетательная) с переменным дебитом.

В результате выполнения задания формируется компетенция: ПК-26 способность выбирать и применять соответствующие методы моделирования физических, химических и технологических процессов, ПК-27 готовность оценивать требуемые данные в своих исследованиях по средствам проектирования и проведения наблюдений, моделирования, компьютерной имитации или экспериментов

Актуальность: При разработке нефтяных месторождений необходимо достаточно точно знать распределение давления в пласте.

Указания по выполнению работы

При выполнении расчетов расположение скважин, показатели их работы, а также положении экранов принять в соответствии с исходными данными (табл. 5-6 приложения 1).

Краткие теоретические сведения

Распределение давления в пласте можно определить путем интегрирования уравнения Фурье, которое для плоскорадиального потока записывается в виде:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial r} = \frac{c^2}{\chi} \frac{\partial P}{\partial t}$$

Для неограниченного горизонтального пласта постоянной толщины с одинаковым во всех точках давлением, в котором в момент времени $t = 0$ пущена в эксплуатацию скважина с постоянным дебитом, распределение давления может быть определено в соответствии с полученной в результате интегрирования уравнения (10) формулой:

$$P(r, t) = P_0 - \frac{Q\mu_n}{4\pi kh} \left[-Ei \left(-\frac{r^2}{4\chi t} \right) \right]$$

где $-Ei(-x)$ - интегральная экспоненциальная функция (данная функция табулирована); r - расстояние от скважины до точки, в которой определяется давление;

Формула (11) называется основным уравнением упругого режима и имеет широкое практическое применение. При малых значениях аргумента:

$$-\frac{r^2}{4\chi t} \ll 1$$

- для интегральной экспоненциальной функции можно записать:

$$-Ei(-x) = \ln - 0,5772 x$$

С учетом (12) основное уравнение упругого режима записывают в виде:

$$P(r,t) = P_0 - \frac{Q\mu_n}{4\pi kh} \left(\ln \frac{2,246 \chi t}{r^2} \right)$$

Основное уравнение упругого режима, полученное при условии постоянного дебита, можно распространить и на другие случаи, в том числе на работу скважины с переменным дебитом.

В этом случае реальная скважина, работающая с переменным дебитом, заменяется на группу взаимодействующих фиктивных скважин, работающих с постоянными дебитами и расположенных в одной точке пласта, совпадающей с местоположением реальной скважины. Дебиты фиктивных скважин определяются как разница между последующим и предыдущим дебитами реальной скважины, а продолжительность работы таких скважин определяется с момента изменения дебита реальной скважины до конца работы скважины. Изменение давления в любой точке пласта, вызванное работой скважины с переменным дебитом, определится по формуле:

где n - количество фиктивных скважин; ΔP_{tj} - изменение давления, вызванное работой t -той фиктивной скважины, заменяющей работу реальной скважины при изменении ее дебита с Q_{i-1} до Q_i .

$$\Delta P = \sum_{j=1}^n \frac{Q_j \mu_n}{4\pi kh} \ln \frac{2,246 \chi t_j}{r^2}$$

где t_j - время работы j -той фиктивной скважины; где T - полное время работы

реальной скважины.

Наличие в пласте непроницаемых границ (экранов) осложняет проведение расчетов по причине необходимости учета влияния отраженных от экранов волн давления. Этот учет выполняется вводом фиктивных скважин,

расположенных симметрично относительно экранов, и работающих с теми же показателями, что и реальные.

Порядок выполнения работы 1. Определяется пьезопроводность пласта:

Вводятся фиктивные скважины учитывающие влияние отраженных от экранов волн распределения давления.

2. Расстояние от скважин до точки пласта определяется в соответствии с теоремой Пифагора. Определяются расстояния от всех скважин до тех точек пласта, в которых будет выполняться расчет давления.

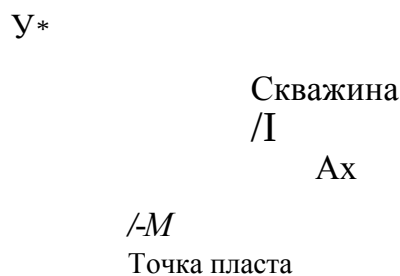


Рис. 4. Схема расположения скважин

где A_x - разность координат по оси OX , A_y - разность координат по оси OY . Количество скважин, в зависимости от положения экранов, складывается из реальных скважин и отраженных от экранированных границ пласта.

Каждая скважина заменяется группой фиктивных взаимодействующих скважин, работающих с постоянными дебитами. Определяются изменения давления вызванные работой фиктивных скважин и в соответствии с принципом суперпозиции суммарные изменения давлений, вызванные работой реальных скважин.

Определяется изменение давления в каждой точке пласта, вызванное работой всех скважин:

3. По полученным значениям давления в точках пласта строится карта изобар.

Контрольные вопросы

Основные цели и этапы выполнения работы.

Понятие об изотропности пластов.

Частные случаи записи уравнения Фурье (плоскорадиальная фильтрация, одномерная, двумерная).

Описание принципа суперпозиции в теории упругого режима.

1. Особенности фильтрации жидкости в экранированном пласте.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 7 Расчёт распределения давления в однородном изотропном пласте при неустановившейся фильтрации упругой жидкости

Цель

1. Произвести расчет распределения давления двумя предложенными методами;
2. Построить кривые распределения давления не менее чем для пяти различных моментов времени;
3. Сравнить полученные результаты.

В результате выполнения задания формируется компетенция: ПК-26 способность выбирать и применять соответствующие методы моделирования физических, химических и технологических процессов, ПК-27 готовность оценивать требуемые данные в своих исследованиях по средствам проектирования и проведения наблюдений, моделирования, компьютерной имитации или экспериментов

Актуальность: При разработке месторождений необходимо достаточно точно знать распределение давления в пласте.

Указания по выполнению работы

Исходные данные для расчетов приведены в приложении 1 (табл. 7). В вариантах плоскорадиального движения радиус скважины принять равным 10 см.

Краткие теоретические сведения

Для расчета распределения давления в пласте необходимо знать закон этого распределения, то есть зависимость давления от координат и времени $P = f(x; y; z; t)$. В общем случае процесс неустановившейся фильтрации может быть описан уравнением Фурье:

Для решения это уравнение интегрируют при соответствующих граничных условиях. Существуют две группы методов решения данного уравнения: точные и приближенные.

Ниже рассмотрены наиболее простые решения для одномерного и плоскорадиального фильтрационного потоков.

Точные решения

Одномерный фильтрационный поток

Случай 1. Пусть в полубесконечном пласте постоянной ширины и толщины начальное давление постоянно и равно P_k . На галерее (при $x = 0$) давление мгновенно снижается до P_r и в дальнейшем поддерживается постоянным. В удаленных точках (при $x \rightarrow \infty$) давление в любой момент времени остается равным P_k .

Задача заключается в определении дебита галереи и давления в любой точке пласта и в любой момент времени $P(x, t)$.

Решением уравнения Фурье при данных условиях будет следующая формула:

$$P = P_r + (P_k - P_r) \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{\chi t}} \right)$$

где x - расстояние, на котором рассчитывается давление; $\operatorname{erf}(x)$ - интеграл вероятности, является табулированной функцией (см. приложение 4, табл. 3).

Дебит галереи:

$$Q = \frac{k}{\mu_k} \cdot \frac{P_k - P_r}{\sqrt{\pi \chi t}} \cdot ah$$

Случай 2. В таком же полубесконечном пласте, что и в случае 1 в момент времени $t = 0$ пущена в эксплуатацию галерея с постоянным дебитом. Требуется найти давление в любой точке пласта и в любой момент времени. Решением уравнения Фурье при данных условиях будет следующая формула:

$$P = P_r + \frac{\mu_k \omega}{k} \left[x \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{\chi t}} \right) \right) + \frac{2\sqrt{\chi t}}{\sqrt{\pi}} \left(1 - e^{-\frac{x^2}{4\chi t}} \right) \right]$$

где ω - скорость фильтрации, определяется как

$$\omega = \frac{Q F}{ah k j x}$$

где F - площадь сечения, перпендикулярного линиям тока.

Давление на галерее определяется по формуле:

Плоскорадиальный

$$P = P_k - \frac{Q \mu}{4 \pi k h} \left[-E_i \left(-\frac{r^2}{4 \chi t} \right) \right] \quad \text{фильтрационный поток.}$$

В неограниченном горизонтальном пласте постоянной толщины имеется добывающая скважина (точечный сток). Начальное давление во всем пласте одинаково и равно P_k . В момент времени $t = 0$ скважина мгновенно пущена в эксплуатацию с постоянным дебитом. В пласте образуется неустановившийся плоскорадиальный поток упругой жидкости. Уравнение распределения давления записывается в виде:

$$P = P_k - \frac{Q\mu}{4\pi kh} \left[-E_i \left(\frac{r^2}{4\chi t} \right) \right]$$

Случай пуска скважины с постоянным забойным давлением в данном курсе не рассматривается. **Приближенные решения**

Во многих случаях применение точных методов решения задач неустановившейся фильтрации является затруднительным из-за их громоздкости.

В связи с этим разработаны приближенные методы, позволяющие с небольшой погрешностью решать те же задачи.

Метод последовательной смены стационарных состояний (ПССС)

В соответствии с разработанным И.А. Чарным методом ПССС, в каждый момент времени вся область движения условно разбивается на две зоны: возмущенную и невозмущенную. В возмущенной зоне, начинающейся от стенки скважины (галереи), давление распределяется по законам стационарного движения, а внешняя граница данной области служит на этот момент условным контуром питания. В невозмущенной области давление всюду постоянно и равно P_k . Закон перемещения подвижной границы раздела ($l(t)$ для одномерного движения и $R(t)$ - для плоскорадиального) определяется конкретно для каждого случая.

Одномерный фильтрационный поток **Случай 1.** Мгновенный пуск галереи с постоянным дебитом. Закон перемещения зоны возмущения:

Закон распределения давления:

Случай 2. Мгновенный пуск галереи с постоянным давлением. Закон движения границы возмущенной области:

$$Q(t) = \frac{k}{\mu_n} \cdot \frac{P_k - P_z}{2\sqrt{\chi t}} \cdot ah$$

$$P = P_k - \frac{Q\mu_n}{kah} \cdot \left(\sqrt{2\chi t} - x \right)$$

Распределение давления в возмущенной зоне пласта:

$$P = P_k - (P_k - P_z) \cdot \left(1 - \frac{x}{2\sqrt{\chi t}} \right)$$

Плоскорадиальный фильтрационный поток

Случай 1. Мгновенный пуск скважины с постоянным дебитом. Закон перемещения зоны возмущения:

Закон распределения давления:

Случай с мгновенным пуском скважины с постоянным забойным давлением в данном пособии не рассматривается. **Метод Пирвердяна.**

Этот метод аналогичен методу ПССС и уточняет его. Поток также условно разбивается на две зоны: возмущенную и невозмущенную. Но, в отличие от метода ПССС, распределение давления в пределах возмущенной области задается другим образом. В невозмущенной зоне давление также постоянно и равно P_k .

Случай 1. Мгновенный пуск галереи с постоянным дебитом. Закон перемещения зоны возмущения:

Закон распределения давления:

Случай 2. Мгновенный пуск галереи с постоянным давлением P_r . Закон перемещения зоны возмущения:

Закон распределения давления

$$P = P_k - (P_k - P_r) \cdot \left(1 - \frac{x}{\sqrt{12\chi t}} \right)^2$$

Метод интегральных соотношений

Метод интегральных соотношений (МИС) предложен Г.И. Баренблаттом, основан на разделении пласта на возмущенную и невозмущенную зоны. Принципиальным отличием метода является идея о существовании некоторой аналогии между возмущенной зоной, рассматриваемой в задачах теории упругого режима, и пограничным слоем, исследуемым в гидродинамических задачах о движении вязкой жидкости. С учетом данной аналогии автором метода предложено использовать приближенные методы теории пограничного слоя к решению задач неустановившейся фильтрации жидкости.

В соответствии с методом, в невозмущенной части пласта движение отсутствует, давление всюду постоянно и равно начальному. В возмущенной части пласта распределение давления представляется в виде:

$$P = A \cdot \ln \frac{r}{R} + B_0 + B_1 \cdot \frac{r}{R} + B_2 \cdot \left(\frac{r}{R} \right)^2 + \dots + B_n \cdot \left(\frac{r}{R} \right)^n$$

где R - радиус границы возмущенной зоны; $A, B_0, B_1, \dots, B_n$ - коэффициенты многочлена с коэффициентами, зависящие от времени.

Задача сводится к получению коэффициентов многочлена, которые должны удовлетворять граничным условиям на стенке скважины и на границе зоны возмущения; а также особым интегральным соотношениям, полученным Г.И. Баренблаттом. Показатель степени n определяет точность полученного решения: чем выше требуется точность, тем больше должно быть значение n .

В данной работе предлагается решение уравнения пьезопроводности методом интегральных соотношений, полученное для радиального движения жидкости к скважине с постоянным дебитом. При этом давление в любой точке пласта (в

пределах возмущенной зоны) в любой момент времени определяется в соответствии с уравнением:

$$P(r, t) = P_k - \frac{Q\mu_n}{2\pi kh} \left[\ln \frac{\sqrt{r_c^2 + 12\chi t}}{r} - 1 + \frac{r}{\sqrt{r_c^2 + 12\chi t}} \right],$$

а закон перемещения зоны возмущения имеет вид:

Порядок выполнения работы

1. Определяется пьезопроводность пласта по формуле (17).
2. По приближенному методу, задавшись определенным размером зоны возмущения (от 500 м), определяется время (t) прохождения зоны возмущения заданного расстояния.
3. Для 5-ти моментов времени в полученном интервале рассчитывается давление на 5-ти различных расстояниях скважины/галереи стока. Расчет проводится по методам решения уравнения Фурье, принимаемым в соответствии с исходными данными (табл7).
4. Строятся графики распределения давления для 5-ти различных моментов времени.

Контрольные вопросы

1. Основные цели и этапы выполнения работы.
2. Установившаяся и неуставившаяся фильтрация в пласте.
- 3 Сущность точных методов решения уравнения пьезопроводности.
4. Сущность приближенных методов решения уравнения пьезопроводности. Метод ПССС.
5. Сущность приближенных методов решения уравнения пьезопроводности. Метод Пирвердяна.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 8 Гидродинамические исследования скважин методом восстановления давления

Цель

Определить фильтрационные параметры удаленной зоны пласта (УЗП) и оценить состояние прискважинной зоны пласта (ПЗП) по результатам исследования скважины при неуставившихся режимах.

В результате выполнения задания формируется компетенция: ПК-26 способность выбирать и применять соответствующие методы моделирования физических, химических и технологических процессов, ПК-27 готовность оценивать требуемые данные в своих исследованиях по средствам проектирования и проведения наблюдений, моделирования, компьютерной имитации или экспериментов

Актуальность: При эксплуатации скважин необходимо знать фильтрационные параметры удаленной зоны пласта.

Указания по выполнению работы

Исходные данные и результаты замера давлений представлены в приложении 1 (табл. 9-10). Коэффициент пористости принять равным 20%; коэффициент объемного сжатия жидкости 510-10 1/Па, коэффициент объемного сжатия породы 110-10 1/Па, радиус скважины 10 см, объемный коэффициент нефти 1,15. Для студентов заочной формы обучения методы для обработки КВД определяются на установочных лекциях.

Краткие теоретические сведения

Метод касательной.

Для определения свойств удаленной зоны пласта по кривым восстановления давления (КВД) может быть применен метод касательной, основанный на уравнении упругого режима, которое описывает процесс восстановления давления в скважине:

$$\Delta P = \frac{Q\mu_n}{4\pi kh} \cdot \ln \left(\frac{2,246 \gamma t}{r_c^2} \right) = \frac{Q\mu_n}{4\pi kh} \cdot \ln \frac{2,246 \gamma}{r_c^2} + \frac{q\mu_n}{4\pi kh} \cdot \ln t$$

$$\Delta P = A_{КВД} + B_{КВД} \cdot \ln t$$

где t - время, прошедшее после остановки скважины; ΔP - приращение давления на забое скважины за время t .

Формула (52) является уравнением прямой линии в координатах $\Delta P, \ln t$ (рис. 6). Поэтому теоретическая КВД в данных координатах должна иметь вид прямой с угловым коэффициентом $B_{КВД}$ и отсекаемым на оси ординат отрезком $A_{КВД}$. На практике форма КВД искажается из-за продолжающегося притока жидкости в скважину после ее остановки (немгновенная остановка скважины) и изменения характеристик пласта в ПЗП.

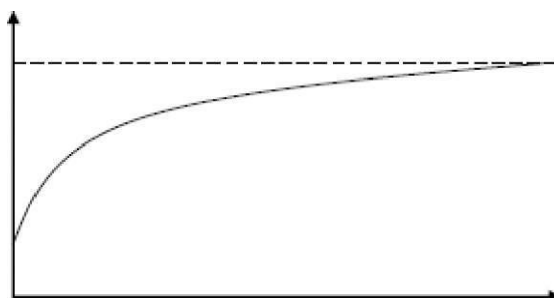


Рис. 5. КВД в координатах $P-t$ Эти факторы, как правило, влияют на форму начального участка кривой, который следует исключить из обработки.
AP

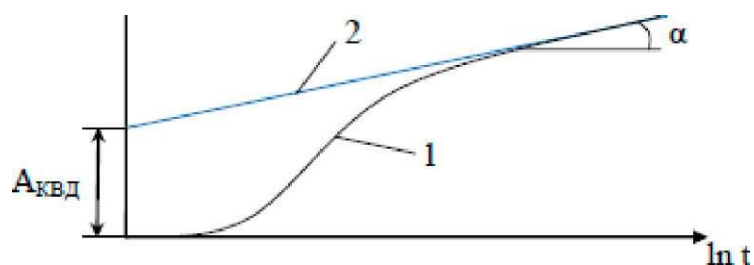


Рис. 6. Фактическая (1) и теоретическая (2) кривые восстановления давления
Для обработки следует выбирать участок, на котором КВД приближается к своей асимптоте. Продолжением прямолинейного участка до оси ординат определяют значение $A_{КВД}$, по уклону этого участка - значение

$$B_{КВД} (B \operatorname{tg} \alpha_{КВД}).$$

Определяется гидропроводность:

$$k_{ft} \underline{Q} P,$$

и проницаемость удаленной части пласта

Метод касательной является распространенным и часто используемым в практике интерпретации КВД. Его основным преимуществом считается простота применения, основным недостатком - сложность выбора прямолинейного участка для обработки. Метод Хорнера

Метод Хорнера, учитывающий продолжительность работы скважины до остановки на исследование, основан на использовании уравнения:

$$P_c(t) = P_m - \frac{Q\mu_n}{4\pi kh} \cdot \ln\left(\frac{t}{T+t}\right),$$

где Т - продолжительность работы скважины до остановки.

Обработка КВД по методу Хорнера ведется в координатах

$$P_c(t) - \ln\left(\frac{t}{T+t}\right)$$

В этих координатах на графике выбирается прямолинейный участок для дальнейшей обработки, соответствующий завершающему периоду восстановления давления. По уклону этого участка определяются гидропроводность (формула (54)) и проницаемость (формула (55)) удаленной зоны пласта. Также обработка КВД методом Хорнера позволяет определять пластовое давление, в качестве которого принимается величина отрезка, отсекаемого продолжением обрабатываемого участка на оси ординат (рис.7).

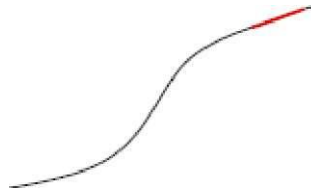


Рис. 7. Обработка КВД методом Хорнера

Методика определения скин-фактора.

Рассмотренные выше методы позволяют определять фильтрационные характеристики удаленных от скважин зон продуктивных пластов. На практике важной является задача оценки состояния прискважинных зон. Одним из распространенных методов решения этой задачи является методика, основанная на вычислении величины скин-фактора S , который выражает потерю полезной депрессии вследствие наличия дополнительных фильтрационных сопротивлений в этой зоне. Величина S будет положительной, если проницаемость ПЗП меньше проницаемости его удаленной части. И, наоборот, при улучшенном состоянии ПЗП скин-фактор принимает отрицательные значения. Скин-фактор может быть определен по формулам:

$$S = 1,15 \cdot \left(\frac{\Delta P}{B_{\text{КВД}}} - \lg \frac{2,246 \chi t}{r_c^2} \right)$$

в которой приведенный радиус скважины

где ΔP - прирос забойного давления после остановки скважины, соответствующий времени t ; $\Delta P_{\text{КВД}}$ - отрезок, отсекаемый продолжением выделенного прямолинейного участка на оси ординат; $B_{\text{КВД}}$ - уклон этого участка (рис. 6).

Коэффициент пьезопроводности χ определяется для удаленной зоны пласта по определенной при обработке проницаемости по формуле (55). Найденный таким образом скин-фактор характеризует суммарные потери давления в прискважинной зоне, обусловленные и изменением проницаемости, и гидродинамическим несовершенством скважины. Для того, чтобы разграничить эти факторы, нужно знать коэффициент, учитывающий несовершенство скважины и вычислять скин-фактор, отражающий изменение проницаемости, или наоборот. Данное условие является основным недостатком описанной методики оценки состояния ПЗП.

Построение «теоретической» КВД Методика основана на детальном анализе кривых распределения давления в зонально-неоднородных пластах и позволяет качественно оценить состояние околоскважинных зон продуктивных пластов.

Методика оценки состояния ОЗП следующая:

1. По данным исследования скважины производится обработка КВД методом касательной с определением фильтрационных параметров (проницаемость, гидропроводность, пьезопроводность) удаленной зоны пласта.

2. Находится значение A_t - отрезка на оси ординат в полулогарифмических координатах, отсекаемого теоретической КВД, построенной без учета влияния послепритока для однородного пласта,

$$A_m = \frac{Q\mu_n}{4\pi kh} \cdot \ln\left(\frac{2,246\chi}{r_c^2}\right)$$

3. По найденному значению A_t и определенному при обработке методом касательной уклону (который остается неизменным) строится теоретическая КВД.

4. По взаимному расположению теоретической КВД и выделенного прямолинейного участка на фактической КВД делается вывод о состоянии ОЗП:

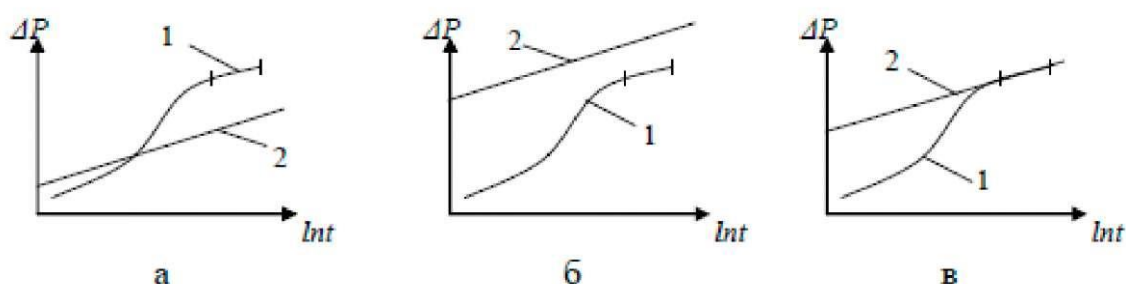


Рис.8. Взаимное расположение теоретической и фактических КВД 1 - выделенный прямолинейный участок фактической КВД, 2 - теоретическая КВД Взаимное расположение теоретической и фактической КВД на рис. 8,а соответствует ухудшенному, на рис. 8,б- улучшенному состоянию ПЗП. В случае однородного пласта взаимное расположение имеет вид, показанный на рис. 8,в.

Данная методика не может быть использована в том случае, когда КВД в полулогарифмических координатах не выходит на асимптоту, т.е. не выделяется прямолинейный участок для обработки.

Помимо описанных методов существует множество методик оценки свойств удаленной и прискважинной зон пласта. На практике широкое распространение получили методы обработки КВД с учетом послепритока (дифференциальные, интегральные), метод детерминированных моментов давления, метод Полларда.

Порядок выполнения работы

1. Подготовка исходных данных. Для проведения обработки КВД некоторыми методами необходимо аппроксимировать результаты исследования, т.е. разбить общее время исследования на равные промежутки и определить соответствующие значения давлений на забое и в затрубном пространстве;

2. Определение пластового давления;

2.1. Метод Хорнера;

2.2. Метод детерминированных моментов давления;

2.3. Метод произведения;

3. Определение свойств удаленной зоны пласта;

3.1. Метод касательной;

3.2. Метод Хорнера;

3.3. Дифференциальный метод Борисова [4];

3.4. Интегральный метод Баренблатта и др. [4];

4. Оценка состояния призабойной зоны пласта

4.1. Метод построения теоретической КВД;

- 4.2. Метод Полларда[3];
- 4.3. Метод определения скин-эффекта (по двум формулам);
- 4.4. Метод детерминированных моментов;
- 5. Выводы

Контрольные вопросы

- 1. Основные цели и этапы выполнения работы.
- 2. Сущность гидродинамических исследований скважин методом восстановления давления.
- 3. Методы оценки свойств УЗП по кривым восстановления давления.
- 4. Методы оценки свойств ПЗП по кривым восстановления давления.
- 5. Методы обработки КВД с учетом послепритока.

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**
**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования**
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по организации и проведению
самостоятельной работы

Исследование скважин и пластов

для студентов направления подготовки 21.03.01 Нефтегазовое дело
направленность (профиль) «Эксплуатация и обслуживание объектов
добычи нефти»

Ставрополь 2026

Методические рекомендации предназначены для студентов вуза «Северо-Кавказский федеральный университет»

Цели методических рекомендаций:

1. Методическое сопровождение процесса введения и реализации требований Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования (далее ФГОС ВО), помощь при разработке рабочих учебных программ дисциплин и профессиональных модулей образовательной программы (далее ОП).
2. Создание в образовательном учреждении учебно-методического обеспечения образовательного процесса.

Методические рекомендации определяют сущность самостоятельной работы студентов в вузе, её назначение, планирование, формы организации и виды контроля.

Содержание

- 1. Нормативное обеспечение самостоятельной работы в ФГОС ВО.**
- 2. Назначение и виды самостоятельной работы студентов.**
- 3. Контроль самостоятельной работы студентов преподавателями.**

1. Нормативное обеспечение самостоятельной работы в ФГОС ВО

1.1. ФГОС раздел: «Требования к условиям реализации ОП»:

– Требования к обязательному минимуму содержания образовательной программы подготовки специалиста, к условиям ее реализации и срокам ее освоения определяются настоящим федеральным государственным образовательным стандартом;

– основная образовательная программа подготовки специалиста состоит из дисциплин общенаучного и профессионального циклов, состоящих из базовой и вариативной частей и дисциплин по выбору;

– максимальный объем учебной нагрузки студента устанавливается 54 часа в неделю, включая все виды аудиторной и внеаудиторной (самостоятельной) учебной работы.

Во время самостоятельной подготовки обучающиеся должны быть обеспечены доступом к сети Интернет. Реализация образовательной программы подготовки специалиста должна обеспечиваться доступом каждого студента к библиотечным фондам и базам данных, формируемым по полному перечню дисциплин образовательной программы из расчета обеспеченности учебниками и учебными пособиями не менее 0,5 экземпляра на одного студента. Библиотека вуза должна иметь достаточное количество современных учебников и учебных пособий по всем циклам дисциплин и постоянно восполняться научной литературой и периодическими изданиями нефтегазового профиля

Объем времени, отведенный на внеаудиторную самостоятельную работу, находит отражение:

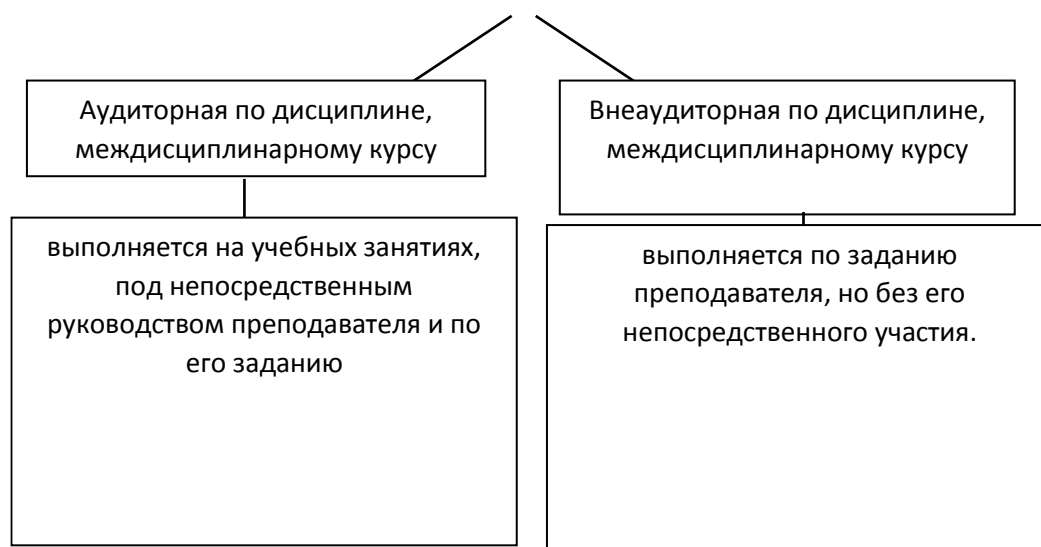
- в рабочем учебном плане – в целом по теоретическому обучению, каждому из циклов дисциплин;
- в рабочих программах учебных дисциплин циклов дисциплин с распределением по разделам или конкретным темам.

2. Назначение и виды самостоятельной работы студентов.

Самостоятельная работа проводится с целью:

- систематизации и закрепления полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- углубления и расширения теоретических знаний;
- формирования умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;
- развития познавательных способностей и активности студентов: творческой инициативы, самостоятельности, ответственности, организованности;
- формирование самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, совершенствованию и самоорганизации;
- формирования практических (общеучебных и профессиональных) умений и навыков;
- развитию исследовательских умений.

В учебном процессе ОУ выделяются два вида самостоятельной работы:



Внеаудиторная самостоятельная работа - планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия.

3. Контроль самостоятельной работы студентов преподавателями.

Контроль самостоятельной работы студентов предусматривает:

- соотнесение содержания контроля с целями обучения;
- объективность контроля;
- валидность контроля (соответствие предъявляемых заданий тому, что предполагается проверить);
- дифференциацию контрольно-измерительных материалов.

Формы контроля самостоятельной работы

1. Просмотр и проверка выполнения самостоятельной работы преподавателем.
2. Самопроверка, взаимопроверка выполненного задания в группе.
3. Обсуждение результатов выполненной работы на занятии.
4. Тестирование.
5. Письменный опрос.
6. Устный опрос.
7. Индивидуальное собеседование.
8. Коллоквиум.
9. Отчет о проделанной работе.
10. Защита рефератов или курсовой работы.
11. Творческий конкурс.
12. Интернет - конференции.
13. Контрольная работа.

Критерии оценки результатов самостоятельной работы

Критериями оценок результатов внеаудиторной самостоятельной работы студента являются:

- уровень освоения студентами учебного материала;
- умения студента использовать теоретические знания при выполнении практических задач;
- формирование набора из общекультурных и профессиональных компетенций будущего специалиста;
- умения студента активно использовать электронные образовательные ресурсы, находить требующуюся информацию, изучать ее и применять на практике;
- обоснованность и четкость изложения ответа;
- оформление материала в соответствии с требованиями;
- умение ориентироваться в потоке информации, выделять главное;
- умение четко сформулировать проблему, предложив ее решение, критически оценить решение и его последствия;
- умение показать, проанализировать альтернативные возможности, варианты действий;
- умение сформировать свою позицию, оценку и аргументировать ее.

Содержание внеаудиторной самостоятельной деятельности студентов

Методические указания для студентов по выполнению самостоятельной работы:

1. Подготовка к лекциям
2. Подготовка к практическим занятиям