Министерство образования и науки РФ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский (Приволжский) Федеральный Университет»

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ КАФЕДРА РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Направление: 011800.62 «РАДИОФИЗИКА» Профиль подготовки: Радиофизические методы по областям применения

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (Бакалаврская работа)

Моделирование течения вязких жидкостей

Работа завер	шена:	
··· ·· ·· ···	2015 г	Яганова А.Е.
Работа допуг	цена к защите:	
Научный рун	ководитель:	
к.т.н., старш	ий преподаватель	
	2015 г	Марфин Е.А.
Заведующий д.фм.н., про	кафедрой, офессор	
	2015 г.	Овчинников М.Н

Казань – 2015

оглавление

Введение	3
Глава 1. Состояние вопроса	5
1.1 Влияние волнового воздействия на добычу нефти	5
1.2 Изменение реологических свойств жидкостей в поле	
упругих колебаний	9
1.3 Методы измерения вязкости жидкостей	13
1.3.1 Метод Стокса	15
1.3.2 Закон Пуазейля	19
Глава 2. Моделирование течения жидкости в капилляре	23
2.1 Математическая модель течение жидкости в капилляре	23
2.2 Результаты расчетов и их анализ	28
Глава 3. Моделирование обтекания шарика вязкой жидкостью	34
Заключение	43
Список литературы	44

введение

В нефтяных, настоящее время разработка нефтегазовых И месторождений В России нефтегазоконденсатных характеризуется возрастанием доли трудноизвлекаемых запасов. Темпы ввода в эксплуатацию новых месторождений не обеспечивают восполнение извлекаемых запасов. Сложности добычи нефти часто обусловлены, во-первых, сложными физикогеологическими характеристиками месторождений. Во-вторых, ухудшением фильтрационных характеристик призабойных зон скважин в процессе эксплуатации. В-третьих, высокой обводненностью добываемой из скважин продукции. Таким образом, остается актуальным интерес специалистов нефтегазовой отрасли к практическому использованию новых эффективных технологий, которые обеспечили бы стабильное поддержание и прирост добычи нефти в сложных геолого-промысловых условиях.

Существует множество методов и технологий повышения эффективности добычи нефти. Как показывают предпосылки и промысловый опыт, серьезную перспективу в этих методах повышения эффективности добычи нефти имеет использование волнового воздействия на пласт. Однако существует ряд вопросов, касающихся эффективности его применения. В частности, это изучение влияния упругих волн на среду и механизмы его воздействия. На данный момент отсутствует инструментарий по исследованию влияния волнового поля в процессе воздействия его на среду и в частности на реологические свойства пластовых флюидов.

Целью настоящей работы является разработка метода измерения вязкости жидкости непосредственно в процессе акустического воздействия на нее.

Для достижения поставленной цели предусматривается решение следующих задач:

- анализ публикаций по данному вопросу;
- исследование гидродинамики жидкости в капилляре;

• исследование ламинарного обтекания шарика в трубе вязкой жидкостью;

• разработка блок-схемы экспериментальной установки и методики проведения эксперимента.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

1.1 Влияние волнового воздействия на добычу нефти

По способу воздействия волновые методы подразделяются на методы воздействия на призабойную зону скважин (ПЗС) и пласты. Призабойная зона это участок пласта, который непосредственно примыкает к стволу скважины, в пределах которого изменяются фильтрационные характеристики продуктивного пласта в период строительства, ремонта или эксплуатации скважины.

Влиянию упругих колебаний на процессы в продуктивных пластах посвящено множество исследований [1-6] таких авторов, как Дыбленко В.П., Камалов Р.Н., Шарифуллин Р.Я., Туфанов И.А., Кузнецов О.Л., Ефимова С.А., Симкин Э.М., Барская Е., Тухватуллина А., Ганеева Ю., Юсупова Т. и др. Недостатком этих исследований видится отсутствие инструментария по исследованию влияния волнового поля непосредственно в процессе воздействия на среду.

Впервые метод обработки призабойных 30H нагнетательных И добывающих скважин, использующий виброволновое воздействие, был испытан на нефтяных промыслах еще в 60-х годах, и сразу же были получены достаточно обнадеживающие данные по его технологической эффективности. Тем не менее, дальнейший опыт показал, что для достижения высокой успешности и рентабельности метода, при его применении в осложненных геолого-промысловых эксплуатации условиях скважин, необходимо осуществление целого ряда теоретических, лабораторных и промысловых исследований, конструкторских и технологических изысканий [4].

Наряду с этим, в 60-х годах на нефтяных месторождениях СССР начали применять воздействие упругими колебаниями на призабойную зону пласта (ПЗП) с помощью спускаемых в скважины различных забойных устройств. Именно в этом направлении были достигнуты наиболее впечатляющие предпосылки для развития виброволнового метода. Наибольшее

распространение получили генераторы, которые используют для работы гидродинамический напор закачиваемой в скважину технологической жидкости (вода, растворители, нефть, растворы ПАВ, кислоты и т.д.) [3].

Существует много различных понятий для обозначения воздействия упругими колебаниями на призабойную зону пласта: "вибрационное", "акустическое", "гидроакустическое", "волновое", "гидроволновое" и т.д. В основном эти термины применяются для обозначения одного и того же процесса и, в принципе, не несут в себе физического смысла. Остановимся на термине «акустическое воздействие» [4].

Максимальный "отклик" ПЗП на воздействие упругими колебаниями находится в избирательном низкочастотном диапазоне 20-300 Гц, а глубина эффективного воздействия, определяемая пространственно-энергетическим распределением упругих колебаний и энергетическими порогами наступления эффектов, достигает от нескольких до 10 метров и более. Это расстояния в среде пласта для рассматриваемых частот порядка длины волны. Воздействие упругими колебаниями на ПЗП при этом охватывает области вибрации среды и области формирования упругой волны в среде, а также области вступления волны в среду.

По энергетическому вкладу, который вносится волновым воздействием для достижения полезных эффектов, развивают энергоемкие методы, обеспечивающие прямые эффекты, и методы с незначительной энергетикой, эффективность которых достигается в основном за счет высвобождения потенциальной энергии пород и насыщающих их флюидов, находящихся в предельно напряженном состоянии. В частности, к 1-й группе относят все волновые методы воздействия на ПЗП.

При оптимальном воздействии в зоне обработки для обеспечения тех или иных полезных эффектов поглощается максимальное количество волновой энергии. За пределами этой зоны будет распространяться волна, имеющая по сути своей лишь информационный характер.

На практике в процессе воздействия участвуют обе вышеупомянутые зоны. В 1-й зоне реализуются прямые эффекты, во 2-й (волновой) зонеинициировано-аномальные, и это оправдывает энергетические затраты и позволяет осуществлять фактически рациональное воздействие.

К акустическому методу воздействия на пласт относят методы воздействия упругими колебаниями, которые имеют сформированный волновой характер в ПЗП.

Акустические методы делятся на 2 подгруппы по типу используемых волновых источников: пьезокерамических, магнитострикционных преобразователей и высокочастотных гидродинамических генераторов в основном кавитационного типа.

разработаны Изначально были пьезокерамические И магнитострикционные излучатели. Предпочтение получили пьезокерамические излучатели, поскольку они имели наибольшее КПД, равное 50 %. Поэтому именно они широко применялись для акустического воздействия на ПЗП для восстановления продуктивности добывающих И производительности нагнетательных скважин. Эти излучатели работают на частоте 19-25 кГц, основанный на применении, соответственно метод, ИХ называется высокочастотным. Такие излучатели входят в состав установки, включающей скважинный снаряд (излучатель), который опускается на каротажном кабеле в скважину, и наземный блок питания и управления. При работе излучателя в скважине возбуждается акустическое поле интенсивностью до 10 кВт/м² и более, при этом развиваются градиенты давления порядка десятых-сотых долей МПа на 1 м.



Рис. 1.1 Общий вид аппаратуры акустического воздействия [3]: 1-скважинный источник ВЧ акустических колебаний; 2-кабель; 3-наземная геофизическая станция с генератором, пультом управления и лебедкой; 4-блок и лубрикатор; 5-обсадная колонна; 6-насосно-компрессорные трубы.

Учитывая реальные размеры ПЗП и необходимость соблюдения условий прозрачности, при прохождении акустических волн через обсадные трубы, можно получить частоты выше 1000 Гц, т.е. высокочастотное акустическое воздействие. При высокочастотном акустическом воздействии на ПЗП и развитии вблизи источника достаточно большой интенсивности (выше 1 кВт/м²) в локальных объемах среды наблюдаются собственно волновые явления: искажение формы волны, возникновение звукового давления, акустические течения и др., которые проявляются в изменении проницаемости насыщенных пористых сред, увеличении относительной скорости фильтрации, понижении сдвиговой вязкости флюидов, повышении давления насыщения растворенных газов с усилением газовыделения, увеличении теплопроводности и в других явлениях [5]. Относительные изменения проницаемости искусственно сцементированных кернов доходят до 30% и связаны с образованием новых фильтрационных каналов в пористой среде, изменением пористости, раскрытием трещин, переупаковкой и изменением ориентации слагающих пористую среду зерен. При наличии глинистости вплоть до 35% эти явления усиливаются [2].

Другая группа явлений связана с влиянием упругих колебаний непосредственно на поровые жидкости и кольматанты в их взаимодействии с твердой поверхностью пор коллектора.

В процессе исследований многократно наблюдалась дегазация пластовых жидкостей под влиянием механических колебаний как высоких, так и низких частот. Процессы дегазации происходят вплоть до установления нового значения равновесной концентрации, которое всегда меньше равновесной концентрации газа без воздействия, причем интенсивность и частота колебаний определяют лишь скорость изменения концентрации газа и время установления новой равновесной концентрации, но не само ее значение. Явление выделения газа из пластовых флюидов в поле упругих колебаний может в зависимости от конкретных условий самым различным образом повлиять на состояние прискважинной зоны и на ее фильтрационные характеристики. Тем не менее, в промысловой практике известно немало положительных результатов по интенсификации технологических приемов добычи нефти, опробования и освоения пластов, связанных с явлением дегазации [5].

1.2 Изменение реологических свойств жидкостей в поле упругих колебаний

Экспериментально обнаружены изменения реологического поведения характеризующихся наличием вязкоупругих и вязкопластических свойств неньютоновских жидкостей. Наблюдалось изменение сдвиговой вязкости нефти под действием упругих колебаний. Установлено, что сдвиговая вязкость непосредственно после воздействия снижается на 20-30 %, а через некоторое

время восстанавливается полностью (при докавитационном режиме воздействия) или частично (если воздействие проводится в кавитационном режиме). Чем больше содержание асфальтосмолистых и парафинистых компонентов в нефтях, тем большие изменения вязкости в докавитационном режиме наблюдаются при низких частотах воздействия. Время восстановления вязкости после воздействия составляет 5-6 ч и более [6].



Рис. 1.2 Зависимость динамической вязкости нефти μ от частоты вращения ротора ω при различном времени t, прошедшем после акустической обработки [6]: 1-до обработки; 2-t=0; 3-t=22 ч; 4-t=120 ч.

Исследование Барской Е., Тухватуллиной А., Ганеевой Ю. и Юсуповой Т. в статье [1] посвящено изучению влияние ультразвука на дисперсные структуры сырой нефти. Они свидетельствую об изменении вязкости нефти после обработки ее ультразвуком интенсивностью 10 Вт/см² и выше. На рис.1.3-1.4 представлены результаты этого исследования.



Рис.1.3 Изменение динамической вязкости масла (в 900 S-1) через 5 мин после облучения ультразвуком с интенсивностью 10 Вт / см² [1]



Рис.1.4 Вязкость масла, до (1), и после ультразвуковой обработки, в зависимости от интенсивности [1]: 2- 10 Bt / см²; 3- 25 Bt / см²; 4- 30 Bt / см²; 5- 50 Bt / см²; 6 100 Bt / см².

В этих экспериментах нефть и масло в образцах до и после обработки ультразвуком были изучены с помощью ротационной вискозиметрии. Ротационный метод вискозиметрии заключается в том, что исследуемая жидкость помещается в малый зазор между двумя телами, необходимый для сдвига исследуемой среды. Одно из тел во время опыта остаётся неподвижным, другое, называемое ротором ротационного вискозиметра, вращается с постоянной скоростью. Вращательное движение ротора вискозиметра передается к другой поверхности (посредством движения вязкой среды). Следовательно, момент вращения ротора ротационного вискозиметра является мерой вязкости.

На рис.1.3-1.4 можно наблюдать структурные изменения, происходящие в нефти. Видно, что облучение ультразвуком может привести как к уменьшению вязкости, так и к ее увеличению. Масло с высоким содержанием парафина после обработки становится более вязким. Установлено, что интенсивность ультразвука значительно влияет на вязкость нефти. Изменение вязкости в течение первых 40 минут после ультразвуковой обработки представляет интерес. Однако через 2 часа вязкость нефти возвращает свои первоначальные значения, а через 3 часа вязкость увеличена в 1,5 раза. Вязкость при низких скоростях сдвига (структурная вязкость) уменьшается более чем в два раза, с интенсивностью роста структурная вязкость быстро уменьшается.

Вязкость нефти с высоким содержанием парафина после обработки увеличивается в отличие от нефти с высоким содержанием смол (рис.1.5-1.6).



Рис.1.5 Изменение вязкости нефти с высоким содержанием парафина от времени после ультразвуковой обработки [7].



Рис.1.6 Изменения вязкости нефти с высоким содержанием парафина в зависимости от времени ультразвуковой обработки [7]

Таким образом, воздействие акустического поля может приводить к необратимому снижению вязкости нефти при развитой кавитации, либо к кратковременному ее снижению в докавитационном режиме [2, 5].

1.3 Методы измерения вязкости жидкостей

Явления переноса включают в себя целый ряд процессов, связанных с неоднородностями плотности, температуры или скорости упорядоченного перемещения отдельных слоев вещества. Диффузия, теплопроводность и внутреннее трение (вязкость) принадлежат именно к таким явлениям [7].

Для решения задач, которые были поставлены в работе, рассмотрим некоторые методы вискозиметрии, позволяющие исследовать вязкость жидкостей.

Под явлением вязкости называется возникновение сил трения между слоями жидкости (газа), движущимися относительно друг друга параллельно и с отличающимися между собой по величине скоростями. Слой, который движется быстрее, действует с ускоряющей силой на другой слой, имеющий

более низкую скорость. Силы внутреннего трения, возникающие при этом, направлены по касательной к поверхности соприкосновения слоев (рис. 1.7, 1.8).

Величина силы внутреннего трения F между соседними слоями прямо

пропорциональна их площади ΔS и градиенту скорости $\frac{dv}{dx}$, то есть можно записать следующее соотношение, которое получил экспериментально Ньютон:

$$F = \eta \frac{dv}{dx} \Delta S \tag{1.1}$$

Величина η называется коэффициентом внутреннего трения или динамическим коэффициентом вязкости. В СИ η измеряется в Па · с.

dv

Величина \overline{dx} показывает, как изменяется скорость жидкости в пространстве при перемещении точки наблюдения в направлении, перпендикулярном слоям. Понятие градиента скорости иллюстрируется рис. 1.7, 1.8.



Рис. 1.7 Постоянный градиент скорости

Рис.1.7 показывает распределение скоростей слоев жидкости между двумя параллельными пластинами, одна из которых является неподвижной, а другая движется со скоростью v_0 . В таком случае слои жидкости, которые

прилегают к каждой из этих пластин, примут одинаковую с пластиной скорость. Движущиеся слои частично увлекают за собой соседние. Вследствие чего в пространстве между пластинами скорость жидкости меняется по направлению *х* равномерно. Соответственно, имеем

$$\frac{dv}{dx} = \frac{v_0}{x_0} = const$$
(1.2)

1.3.1 Метод Стокса



Рис. 1.8 Переменный градиент скорости

На рисунке 1.8 показано распределение скоростей жидкости около движущегося в ней вертикально вниз со скоростью ^V₀ шарика.

Предполагается, что скорость v_0 мала, так что завихрения в жидкости не образуются. В этом случае жидкость, непосредственно прилегающая к поверхности шарика, имеет скорость v_0 . В это движение частично вовлекаются удаленные от шарика слои жидкости. При этом скорость наиболее быстро меняется по направлению x вблизи шарика.

Наличие градиента скорости у поверхности тела указывает, что на него действует сила внутреннего трения, зависящая от коэффициента вязкости η . Сама величина η определяется природой жидкости и обычно существенно зависит от ее температуры.

Сила внутреннего трения и коэффициент вязкости жидкости может быть определен различными методами – по скорости истечения жидкости через

калиброванное отверстие, по скорости движения тела в жидкости и т.д. В данной работе для определения η используется метод, предложенный Стоксом.

Рассмотрим для примера равномерное движение маленького шарика радиуса r в жидкости. Обозначим скорость шарика относительно жидкости через v_0 . Распределение скоростей в соседних слоях жидкости, увлекаемых шариком, должно иметь вид, изображенный на рис. 1.7. В непосредственной близости к поверхности шара эта скорость v равна v_0 , а по мере удаления уменьшается и стремится к нулю на некотором расстоянии x от поверхности шара.

Соответственно, чем больше радиус шара, тем большая масса жидкости вовлекается им в движение, и x должно быть пропорционально радиусу шарика $r: x = \alpha \cdot r$. Тогда среднее значение градиента скорости на поверхности шара равно

$$\frac{\Delta v}{\Delta x} = \frac{v_0 - 0}{\alpha \cdot r} = \frac{v_0}{\alpha \cdot r}$$
(1.3)

Поверхность шара $S = 4\pi r^2$ и полная сила трения, испытываемая движущимся шаром, равна

$$F = \eta \frac{\Delta v}{\Delta x} S = \eta \frac{v_0}{\alpha \cdot r} \cdot 4\pi r^2 = \frac{4\pi}{\alpha} \eta \cdot r v_0$$
(1.4)

Более подробные расчеты показывают, что для шара $\alpha = \frac{2}{3}$, окончательно

$$F_{\rm TP} = 6\pi\eta \cdot rv_0 \tag{1.5}$$

Формула (1.5) называется формулой Стокса [7].

Упавший в жидкость шарик движется равноускоренно, но, по мере того, как растет его скорость, будет возрастать и сила сопротивления жидкости до тех пор, пока сила тяжести шарика в жидкости не сравняется с суммой силы сопротивления и силы трения жидкости движению шарика. После этого движение будет происходить с постоянной скоростью ^{V₀}.

При движении шарика слой жидкости, граничащий с его поверхностью, прилипает к шарику и движется со скоростью шарика. Ближайшие смежные слои жидкости также приводятся в движение, но получаемая ими скорость тем меньше, чем дальше они находятся от шарика. Таким образом, при вычислении сопротивления среды следует учитывать трение отдельных слоев жидкости друг о друга, а не трение шарика о жидкость.

Если шарик падает в жидкости, простирающейся безгранично по всем направлениям $r \le \ell \le \infty$, не оставляя за собой никаких завихрений (малая скорость падения, маленький шарик), то, как показал Стокс, сила сопротивления равна

$$F = 6\pi\eta vr \tag{1.6}$$

где η – коэффициент внутреннего трения жидкости; v – скорость шарика; r – его радиус.

Кроме силы F на шарик действует сила тяжести $F_{\rm T}$ и архимедова сила $F_{\rm A}$, равная весу P вытесненной шариком жидкости.



Рис.1.9 Вискозиметр, с падающим шариком внутри

Для шарика

$$P = \frac{4}{3}\pi r^{3}\rho_{1}g$$
(1.7)
$$E = -\frac{4}{3}\pi r^{3}\rho_{2}g$$

где ρ_1 , ρ_2 – плотность материала шарика и исследуемой жидкости.

Все три силы будут направлены по вертикали: сила тяжести – вниз, подъемная сила и сила сопротивления – вверх. Первое время, после вхождения в жидкость, шарик движется ускоренно. Считая, что к моменту прохождения шариком верхней метки скорость его уже установилась, получим

$$v = \ell/t \tag{1.9}$$

где t – время прохождения шариком расстояния между метками, ℓ – расстояние между метками.

Скорость движения шарика возрастает, ускорение уменьшается и, наконец, шарик достигнет такой скорости, при которой ускорение становится равным нулю, тогда

$$F = P - F_{\rm A} \tag{1.10}$$

$$\frac{4}{3}\pi r^3 g(\rho_1 - \rho_2) - 6\pi\eta r v_0 = 0 \tag{1.11}$$

Решая уравнение относительно коэффициента внутреннего трения, получаем расчетную формулу:

$$\eta = \frac{2}{9} \frac{(\rho_1 - \rho_2)}{v_0} gr^2 \tag{1.12}$$

1.3.2 Закон Пуазейля

Следующим метод основан на применении формулы Пуазейля [8], которая отражает зависимость скорости жидкости в трубе от вязкости.

При течении вязкой несжимаемой жидкости по цилиндрической трубе радиуса R линии тока жидкости параллельны оси трубы. Поэтому выделим произвольную бесконечно узкую трубку тока. Так как жидкость является несжимаемой, то скорость течения v будет постоянна вдоль всей трубки тока, но по мере удаления от оси трубы будет изменяться, т.е. v=f(r), где r - расстояние от оси трубы.

Выделим в трубе бесконечно малый цилиндрический элемент длины dx и радиуса г. Ось X совпадает с направлением течения жидкости и направлена вдоль оси трубы.



Рис.1.10 Бесконечно малый цилиндрический элемент.

В направлении течения жидкости на боковую поверхность действует касательная сила внутреннего трения

$$dF_1 = \eta 2\pi r L \frac{dv}{dr} dx \tag{1.13}$$

где h - коэффициент вязкости; L - длина трубы.

На основания цилиндра в том же направлении действует сила разности давлений

$$dF_{2} = \pi r^{2} [P(x) - P(x + dx)] = -\pi r^{2} \frac{dP}{dx} dx$$
(1.14)

В случае стационарного течения жидкости результирующая сумма этих двух сил будет равна нулю, значит

$$2\eta L\frac{dv}{dr} = r\frac{dP}{dx}$$
(1.15)

Скорость v(r) =const, а значит ее производная $\frac{dv}{dr}$ = const

Соответственно, постоянной будет производная $\frac{dP}{dx} = const$. То есть

$$\frac{dP}{dx} = \frac{P_2 - P_1}{L} = const \tag{1.16}$$

где Р₁, Р₂ - давления на входе и выходе трубы, соответственно.

Таким образом,

$$\frac{dv}{dr} = -\frac{P_1 - P_2}{2\eta L}r\tag{1.17}$$

После интегрирования выражения, получим

$$v = -\frac{P_1 - P_2}{4\eta L}r^2 + C \tag{1.18}$$

Постоянную интегрирования С определим из условия, что на стенке трубы скорость течения жидкости обращается в ноль при r=R, то есть

$$v = \frac{P_1 - P_2}{4\eta L} (\mathbf{R}^2 - r^2) \tag{1.19}$$

Отсюда следует, что скорость течения жидкости будет достигать максимального значения на оси трубы при r=0:

$$v_{\max} = \frac{P_1 - P_2}{4\eta L} \mathbf{R}^2 \tag{1.20}$$

По мере удаления от оси трубы скорость течения жидкости изменяется по параболическому закону:



Рис.1.11 Изменение скорости в трубе.

Найдем ежесекундный расход жидкости при протекании ее через поперечное сечение трубы. Массу жидкости, протекающую за одну секунду (расход жидкости) через сечение с внутренним г и внешним r+dr радиусами трубы, запишем в следующем виде:

$$dQ = 2\pi r dr \rho v \tag{1.21}$$

Подставим значение скорости в предыдущую формулу, полный расход жидкости тогда примет вид:

$$Q = \pi \rho \frac{P_1 - P_2}{2\eta L} \int_0^R (R^2 - r^2) r dr$$
(1.22)

После интегрирования получим формулу Пуазейля [8]:

$$Q = \pi \rho \frac{P_1 - P_2}{8\eta L} R^4$$
 (1.23)

Расход жидкости пропорционален разности давлений P₁-P₂, радиусу трубы в четвертой степени и обратно пропорционален длине трубы и коэффициенту вязкости жидкости.

ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В КАПИЛЛЯРЕ

Как уже говорилось в первой главе, наложение волнового поля на среду меняет ее характеристики, что подтверждают экспериментальные данные, но так же есть данные о том, что с течением времени свойства жидкости восстанавливаются.

Поскольку волновое воздействие осуществляется продолжительное время необходимо исследовать процесс воздействия пульсаций на свойства жидкости. Для этого необходимо провести ряд экспериментов. Однако непосредственно эксперимент может показать изменения, не связанные со свойствами самой жидкости. Соответственно, эти изменения нужно исключить, путем проведения Моделирование численного моделирования. основано на методах вычислительной гидродинамики. Вычислительная гидродинамика - это раздел науки, решающий проблему моделирования тепломассопереноса в различных технических и природных объектах. В численном моделировании свойства среды остаются постоянными, то есть влияние волнового поля не сказывается на реологических свойствах среды, тем самым мы исследуем воздействие упругих колебаний на гидродинамику потока. Чтобы провести моделирование, использовался программный комплекс для исследования течений жидкости и газа FlowVision.

Принцип работы ПК FlowVision основывается на численном решении трехмерных стационарных и нестационарных уравнений динамики газа и жидкости, включающие в себя законы сохранения импульса (уравнения Навье-Стокса), массы, уравнения состояния, теплопереноса и др. [9].

2.1 Математическая модель течения жидкости в капилляре

Течение в капилляре можно отнести к ламинарному несжимаемому течению, так как оно характеризуется малыми числами Рейнольдса и изменениями плотности.

Ламинарное течение описывается уравнениями Навье-Стокса:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -(\vec{v} \cdot \nabla) \,\vec{v} + \nu \Delta \,\vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla \,\mathbf{p} + \vec{\mathbf{f}}$$
(2.1)

 $\nabla \cdot \vec{\mathbf{v}} = \mathbf{0},\tag{2.2}$

где Δ - векторный оператор Лапласа, ∇ - оператор набла, t - время, ν - коэффициент кинематической вязкости, \vec{f} - векторное поле массовых сил, ρ - плотность, р - давление, \vec{v} - векторное поле скоростей.

Также течение жидкости в капилляре описывается уравнением неразрывности и уравнением Бернулли для случая горизонтальной струи:

$$v \cdot dS = dV_{CPK}, \tag{2.3}$$

где $dV_{ce\kappa}$ -секундный объемный расход жидкости, постоянный вдоль струи.

$$\frac{pv^2}{2} + p = const, \qquad (2.4)$$

где р-статистической давление, $\frac{pv}{2}$ - динамический напор.

Выведенная ранее формула Пуазейля также описывает движение жидкости в капилляре:

$$Q = \pi \rho \, \frac{P_1 - P_2}{8\eta L} \, R^4 \tag{2.5}$$

При исследовании течения жидкости в капилляре следует принять во внимание то, что на входе в капилляр поток имеет равномерное поле скорости

В качестве исследуемой жидкости возьмем глицерин.

Начальными условиями для капилляра являются характеристики жидкости:

- Температура жидкости при нормальных условиях T₀=293 K;
- Плотность глицерина р_г=1261 кг/м³;
- Молекулярный вес глицерина 92,09382 г/моль
- Вязкость глицерина при нормальных условиях η_r=1,49 Па*с
 В модели ламинарного течения определены следующие типы границ: Стенка:

На стенке задаем условие прилипания, что характерно для вязкой жидкости и обуславливает гидравлическое сопротивление. Данное условие определяется тем, что скорость жидкости на границе равна скорости самой границы, то есть стенки.

Bxod:

Скорость на входе примем равной 0,00001 м/с, что соответствует малому числу Рейнольдса, а соответственно ламинарному течению, по формуле.

$$\operatorname{Re} = \frac{\rho v d}{\eta},\tag{2.6}$$

где d-диаметр входной трубы капилляра, равный 10 мм, *ρ*-плотность жидкости, *η*-динамическая вязкость, *ν*-скорость потока.

Тогда скорость в самом капилляре составит 0,034 м/с по соотношению

$$v_1 S_1 = v_2 S_2, (2.7)$$

где S₁, S₂-площади поперечных сечений трубы, v₁, v₂-соответственно скорости в этих частях трубы.

Выход:

Выход устанавливается свободным.

Алгоритм моделирования. Для подготовки к моделированию в программе SolidWorks, предназначенной для твердотельного параметрического ассоциативного моделирования сложных деталей, создаются трехмерные геометрические модели капилляра и трубы с шариком внутри. После того, как был произведен перенос геометрии объектов в программу FlowVision, выполнили следующие действия для моделирования течения в капилляре, и впоследствии получения данных для анализа:

1. Определяем область расчёта. Т.е. указываем ту область, в границах которой будет происходит расчёт. Это внутренняя область наших моделей;

2. Указываем для этой области модель – ламинарное течение;

- 3. Задаем начальные условия расчёта;
- 4. Устанавливаем граничные условия;

5. Обозначаем: геометрические расположения входа, выхода, стенок, указывая к каким граничным условиям, относится та или иная геометрическая область (Рис. 2.1) [9].



Рис.2.1 Геометрия модели в программном комплексе FlowVision. Различными цветами обозначены граничные условия на вход (красный), выход(синий).

6. Строим расчетную сетку, выделяя наиболее важные области расчета сгущением ячеек в них (Рис. 2.2);



Рис.2.2 Расчетная сетка. Вид спереди



Рис.2.3 Расчетная сетка. Вид сбоку.

7. Указываем общие параметры расчёта, такие как время, шаг счета, учет гравитации;



Рис.2.4 Рабочее окно задания свойств и параметров расчета.

8. В постпроцессоре необходимо задать пользовательские переменные;

9. На входе и на выходе отмечаем 2 контрольные точки, где мы будем мерить давление.

10. Задаем визуализацию всех интересующих нас величин, и выводим массив значений величины давления в контрольных точках на входе и выходе в отдельные файлы;

11. Проводим анализ полученных данных при различных значениях частоты пульсаций, амплитуды колебаний и скорости жидкости на входе.

2.2 Результаты расчетов и их анализ

Исследование проводилось на основе тех данных, которые мы получили в программе FlowVision. Принцип исследования заключается в том, что мы сравниваем перепад давлений при стационарном течении и при наложении на жидкость пульсаций, при которых скорость течения будет иметь вид:

$$v = v_0 + \tilde{v}\sin(2\pi \,\mathrm{ft}), \qquad (2.8)$$

где *v*₀-основная составляющая скорости, *v* -амплитуда изменения, f-частота пульсаций.

Пусть на вход подается скорость потока, равная 0,00001 м/с. Зависимости давления на входе и выходе от времени показаны на рисунке.



Рис.2.5 Изменение давления на входе. Режим течения: 1-переходный; 2установившийся режим.



Рис.2.6 Изменение давления на выходе. Режим течения: 1-переходный; 2установившийся режим.

Видим, что давление в течение небольшого промежутка времени меняет свое значение, затем восстанавливается до своего постоянного значения. Исходя из этих графиков, можем определить перепад давления на входе и выходе:

∆р=7327,693 Па

Также были получены картины течения глицерина в капилляре.



б)

Рис.2.7 Картины течения глицерина. Заливка на давление (а), заливка на модуль скорости (б).

Наложение волнового поля осуществим заданием граничного условия на входе. Зададим частотой 1000 Гц и амплитудой колебаний, составляющей 10% от основной скорости. Расчет давления перед капилляром дает картину, показанную рис.2.8, на выходе капилляра соответственно на рис.2.9.



Рис.2.8 Давление на входе.



По этим зависимостям находим среднее значение и аналогично находим перепад давления:

∆р=7323,2257 Па

Аналогично определяется перепад давления для различных скоростей течения жидкости. На основании рис. 2.10 мы можем убедиться в справедливости закона Пуазейля, отражающего зависимость расхода жидкости от перепада давления в трубе и реологических свойств среды.



Рис.2.10 Зависимость перепада давления от скорости на входе

На рисунках 2.11-2.12 представлены зависимости среднего перепада давления от частоты и амплитуды колебательной скорости.



Рис.2.11 Зависимость перепада давления от частоты при скорости 0,03 мм/с на входе при доле амплитуды колебаний 10% от скорости.



Рис.2.12 Зависимость перепада давления от отношения амплитуды колебаний к скорости на входе при 0,01 мм/с и частоте 2000 Гц.

Видно, что колебания практически не влияют на перепад давления в капилляре. На рис.2.13 представлены зависимости относительной вязкости, т.е. вязкости рассчитанной по формуле Пуазейля, для различных режимов воздействия.



Рис.2.13 Зависимость отношения вязкости глицерина при воздействии на него волновым полем к вязкости без воздействия в процентах от частоты колебаний при скорости на входе 0,01 мм/с при различных амплитудах колебаний.

Полученные зависимости показывают, что частота колебаний и их амплитуда практически не оказывает никакого влияния на вязкость жидкости.

ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ ШАРИКА ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТЬЮ

Течение в вискозиметре Гепплера так же является ламинарным. Соответственно, оно будет описываться уравнениями Навье-Стокса (2.1), (2.2), уравнением неразрывности и уравнением Бернулли, но уже для случая вертикальной трубы

$$\frac{\rho v^2}{2} + p + \rho g h = const , \qquad (3.1)$$

где h-высота центра тяжести элемента объема жидкости.

Выведенная в первой главе формула Стокса также будет описывать течение жидкости:

$$F = 6\pi\eta vr_{.} \tag{3.2}$$

При исследовании течения жидкости в вискозиметре необходимо принять во внимание следующие допущения:

- Стенка капилляра является абсолютно скользкой;
- На входе в трубу поток имеет равномерное поле скорости

В качестве исследуемой жидкости также взят глицерин.

Начальными условиями являются следующие характеристики жидкости:

- Температура жидкости при нормальных условиях T₀=293 K;
- Плотность глицерина ρ_г=1261 кг/м³;
- Молекулярный вес глицерина 92,09382 г/моль;
- Вязкость глицерина при нормальных условиях η_г=1,49 Па*с;
- Диаметр трубы составляет 3 см;
- Диаметр шарика-5 мм.

В модели ламинарного течения определены следующие граничные условия:

Симметрия:

Это граничное условие определяется как проскальзывание, условие предполагает, что скорость жидкости на границе направлена вдоль касательной к границе (нормальная составляющая равна нулю).

Bxod:

Скорость на входе примем равной 0,011 м/с, что соответствует малому числу Рейнольдса, а соответственно ламинарному течению, по формуле (2.6).

Выход:

Выход устанавливается свободным.

Алгоритм моделирования. Для подготовки к расчетам необходимо выполнить аналогичный алгоритм моделирования, приведенный в предыдущей главе:

- Определяем область расчёта. Т.е. указываем ту область, в границах которой будет происходит расчёт. Это внутренняя область наших моделей;
- 2. Указываем для этой области модель ламинарное течение;
- 3. Задаем начальные условия расчёта;

4. Устанавливаем граничные условия;

5. Обозначаем: геометрические расположения входа, выхода, стенок, указывая к каким граничным условиям, относится та или иная геометрическая область;

6. Строим расчетную сетку, выделяя наиболее важные области расчета сгущением ячеек в них





Рис.3.1. Расчетная сетка. Вид спереди (а), вид сбоку (б).

- Указываем те же самые общие параметры расчёта, такие как время, шаг счета, учет гравитации, как и в случае капилляра;
- 8. В постпроцессоре необходимо задать пользовательские переменные;
- Задаем визуализацию всех интересующих нас величин, и выводим массив значений величины давления действующего на каждые 2⁰ поверхности шарика в отдельные файлы;
- Проводим анализ полученных данных без волнового воздействия и при различных значениях частоты пульсаций, амплитуды колебаний и скорости жидкости на входе.

Результаты расчетов и их анализ. Принцип исследования заключается в том, что мы сравниваем лобовое сопротивление жидкости, действующее на

шарик при стационарном течении и при наложении на жидкость пульсаций, при которых скорость течения будет иметь вид:

$$v = v_0 + \tilde{v}\sin(2\pi \,\mathrm{ft})\,,\tag{3.3}$$

где *v*₀-основная составляющая скорости, *v* -амплитуда изменения, f-частота пульсаций.

Были получены картины течения жидкости в вискозиметре.



1)



2)





3)





Рис.3.2 Картины течения жидкости в вискозиметре по порядку:

1) заливка модуля скорости при 0,022 м/с на входе;

2) заливка на давление при скорости глицерина 0,011м/с на входе;

- 3) вектор скорости потока при 0,011м/с на входе;
- 4) вектор скорости потока при 0,006 м/с на входе.

В массиве полученных данных получаем распределение давления, действующего на поверхность:



Рис.3.3 Распределение давления по поверхности шарика на различных скоростях: a) 0,011 м/с, б) 0,022 м/с.



Рис.3.4 Схематическое изображение шарика с действующим на него давлением

Далее необходимо спроектировать вектора давления, направленные перпендикулярно поверхности на ось x, для этого каждую величину необходимо умножить на $\cos((\theta - 270^0)*\pi/180)$, далее просуммируем все полученные значения. Что является интегралом по поверхности. В итоге, сила, действующая на шарик находится по формуле:

$$F = p \cdot S , \tag{3.4}$$

где S-площадь поверхности.

Получаем следующую зависимость силы сопротивления от скорости потока жидкости на входе:

v, м/с	F, H
0,006	0,000276
0,011	0,000918
0,022	0,001847



Рис.3.5 Зависимость силы сопротивления, действующей на шарик, от скорости жидкости на входе.

Полученная зависимость подтверждает закон Стокса.

Теперь накладываем пульсации на частотах 1000, 2000, 3000 Гц и с амплитудой колебаний, составляющей 1% от скорости жидкости на входе. После чего анализируя тем же способом получаем следующую зависимость:



Рис. 3.6 Зависимость силы сопротивления, действующей на шарик, от частоты колебаний.

На графике (3.6) видно, что наложенные пульсации сильно сказываются на сопротивлении движению шарика и это означает, что данный метод не может быть рекомендован в качестве инструментария для исследования воздействия волнового поля на среду.

Таким образом, на основе проведенных исследований оптимальным методом является метод, основанный на применении капиллярного вискозиметра.

Экспериментальная установка для измерения вязкости жидкости непосредственно в процессе воздействия может быть представлена в виде блоксхемы (рис.3.7). Установка включает: капилляр 7 через которых протекает исследуемая жидкость из емкости 5, упругие колебания формируются с помощью излучателя 4, усилителя 2 и генератора электрических сигналов 1.

Разность давления на капилляре определяется с помощью датчика разности давления, а расход с помощью мерной емкости.



Рис.3.7 Экспериментальная установка, основанная на капиллярном вискозиметре: 1. Генератор колебаний; 2. Усилитель низкой частоты; 3.Резервуар, где формируются колебания; 4. Излучатель колебаний; 5. Емкость с жидкостью; 6. Датчик разности давлений; 7. Капилляр; 8. Мерная емкость.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предложен метод исследования влияния волнового воздействия на вязкость жидкостей. Суть метода заключается в проведении численного моделирования и экспериментального исследования течения жидкости в стационарном режиме и в условиях наложения колебаний, и последующего проведения анализа полученных результатов.

Численно исследована гидродинамика жидкости в капилляре при воздействии на нее пульсаций и установлена зависимость перепада давления на входе и выходе от АЧХ. Показано, что наложенные пульсации практически не оказывают влияние на средний перепад давления при течении жидкости через капилляр.

Численно исследовано гидродинамическое обтекание шарика при стационарном течении потока и во время волнового воздействия. Установлено, что наличие пульсации приводит к значительному увеличению силы сопротивления.

На основании полученных результатов численных исследований разработана блок-схема установки для проведения лабораторного эксперимента. В качестве основного метода взят метод, основанный на использовании капиллярного вискозиметра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barskaya E., Tukhvatullina A., Ganeeva Y., Yusupova T. Influence of ultrasonication on the dispersed structure of the crude oils // Воздействие упругих волн на флюиды в пористых средах (EWEF-2012): Сборник трудов III международной конференции, Москва, 24-28 сентября 2012. – С.39-42.

 Гадиев С.М., Рабинович Е.З., Карандашева В.М. Влияние вибрации на реологические свойства жидкостей //Азербайджанское нефтяное хозяйство, 1981. № 1. – С. 43-46.

 Дыбленко В.П. Волновые методы воздействия на нефтяные пласты с трудноизвлекаемыми запасами. Обзор и классификация. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2008. – 80 с.

4. Дыбленко В.П., Камалов Р.Н., Шарифуллин Р.Я., Туфанов И.А. Повышение продуктивности и реанимация скважин с применением виброволнового воздействия. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000. – 381 с.

5. Кузнецов О.Л., Ефимова С.Л. Применение ультразвука в нефтяной промышленности. – М.: Недра, 1983. – 192 с.

 Соколов А.В., Симкин Э.М. Исследование влияния акустического воздействия на реологические свойства некоторых нефтей. – В кн.: Вопросы нелинейной геофизики. М., ОНТИ ВНИИЯГГ, 1981. – С.104-106.

Ревинская О.Г. Движение тела в вязкой среде: учебно-методическое пособие / О.Г. Ревинская, Н.С. Кравченко; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 22 с.

 Сивухин Д.В. Общий курс физики. Механика. Том 1. – М.: Наука, 1979. – 520 с.

9. Аксенов А.А., Шмелев В.В., Смирнова М.Л., Банкрутенко В.В., Нетронин И.В., Будников А.В., Рогожкин С.А. Сертификация системы моделирования движения жидкости и газа FlowVision // САПР и графика. 2006. №4. – С. 2-7.