РУКОВОДСТВО ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ И ТЕХНИКО – ЭКОНОМИЧЕСКОМУ АНАЛИЗУ РАЗРАБОТКИ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПЛАСТ ВОДОЙ, ЗАГУЩЕННОЙ ПОЛИМЕРАМИ

РД 39 – 3 – 36 – 77

gost.e-ecolog.ru

ГИПРОВОСТОКНЕФТЬ – 1978

МИНИСТЕРСТВО НЕФТЯНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Государственный институт по проектированию
и исследовательским работам в нефтяной промышленности

"Г И П Р О В О С Т О К Н Е Ф Т Ь"

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель Министра
нефтяной промышленности
А.В. Валиханов
29 декабря 1977г.

Р У К О В О Д С Т В О
ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОМУ АНАЛИЗУ РАЗРАБОТКИ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПЛАСТ ВОДОЙ, ЗАГУЩЕННОЙ ПОЛИМЕРАМИ

РД-39-2-36-77

1978

В руководстве рассмотрены физические основы и степень изученности метода заводнения с полимерами. Изложены требования, предъявляемые к водорастворимым полимерам, используемым при заводнении нефтяных пластов. Определена область эффективного применения растворов полимеров и даны критерии выбора объектов, пригодных для полимерного заводнения.

В руководстве изложены методики получения исходных данных для проектирования разработки месторождений при полимерном заводнении, а также методики расчета показателей процесса вытеснения нефти оторочкой раствора полимера. Рассмотрен основной принцип проектирования и технико-экономического анализа разработки нефтяных месторождений с применением водорастворимых полимеров, дано описание применяемых при этом технологии и оборудования. Освещены также вопросы промсанитарии и техники безопасности.

Руководство рассчитано на работников научно-исследовательских институтов, занимающихся проектированием разработки нефтяных месторождений, и инженеров нефтепромысловых предприятий.

В составлении руководства принимали участие: сотрудники института "Гипровостокнефть" И.А. Швецов, А.Н. Горбатова; В.П. Городнов, В.В. Кукин, В.П. Меркулов, П.А. Палий, Ю.В. Соляков, Ц.Б. Штейнгарт, ВНИИ – А.Т. Горбунов, Н.А. Токарева и О.Э. Цынкова, работники Миннефтепрома – Г.И. Григорашенко. Общую редакцию осуществлял кандидат технических наук И.А. Швецов.

Руководящий документ

РУКОВОДСТВО

по проектированию и технико-экономическому анализу разработки нефтяных месторождений с применением метода воздействия на пласт водой, загущенной полимерами

РД 39 - 3 - 36 - 77 Впервые

Приказом Министерства нефтяной промышленности

от 18.01-78г. № 44

Срок введения с 01.07.78

Срок действия до 31.12.1980

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Настоящее "Руководство по проектированию и технико-экономическому анализу разработки нефтяных месторождений с применением метода воздействия на пласт водой, загущенной полимерами" разработано в соответствии с приказом Министерства нефтяной промышленности от 29 октября 1976г. № 592 "О мерах по наиболее полному извлечению нефти из недр".

1.2. Руководство является результатом выполнения институтом "Гипровостокнефть" научно-исследовательской работы по теме 13-77 "Совершенствование техники и технологии промышленного применения поли-

меров при заводнении с целью увеличения нефтеотдачи", этап 3: "Составление руководства по проектированию и применению метода заводнения с полимерами. Разработка методик определения важнейших характеристик полимерных систем и пористой среды, влияющих на технологические параметры полимерного заводнения".

1.3. Руководство составлено на основании обобщения теоретических и лабораторных исследований, проведенных в институтах Гипровостокнефть, ИГ и РГИ, ВНИИнефть, БашНИПИнефть, АзНИПИнефть, ТатНИПИнефть, анализа многочисленных работ зарубежных авторов, а также обобщения опыта промысловых испытаний полимерного заводнения на месторождениях Советского Союза и за рубежом.

1.4. При разработке Руководства исходили из следующих основных положений:

- закачка в пласт воды, загущенной полимерами, направлена на повышение эффективности обычного заводнения, поэтому максимально должен быть учтен многолетний опыт проектирования и осуществления этого наиболее распространенного метода искусственного воздействия на пласт;

- лабораторные исследования для получения исходных данных имеют свои специфические особенности и некоторые трудности, поэтому в предварительных ориентировочных расчетах процесса вытеснения нефти оторочкой загущенной воды должен использоваться набор стандарт-

ных реологических кривых, величин адсорбции и других характерных параметров применяемых растворов полимеров;

- методики получения исходных данных для проектирования и расчета основных показателей процесса вытеснения нефти оторочкой раствора полимера должны максимально учитывать все особенности полимерного заводнения;

Используемая в Руководстве терминология отвечает физической сущности процессов, происходящих в нефтенасыщенной пористой среде при фильтрации растворов полимеров, и соответствует терминологии, общепринятой в нефтепромысловом деле, а также в специальной литературе по реологии и физико-химии полимеров.

1.5. Настоящее Руководство может применяться в следующих случаях:

- при составлении технологических схем и проектов разработки нефтяных месторождений при полимерном заводнении;

- при составлении комплексных проектов разработки, где в качестве одного из возможных вариантов предусматривается закачка оторочки растворов полимеров;

- при конструировании установок и оборудования, применяемых в процессе осуществления полимерного заводнения;

- при опытно-промышленных испытаниях и широком промышленном внедрении метода в различных геоло-

го-физических условиях;

– при анализе разработки месторождений и технико-экономической оценке результатов полимерного заводнения;

– при составлении "Руководства по проектированию обустройства нефтяных месторождений с применением новых методов увеличения нефтеотдачи пластов".

1.6. "Руководство по проектированию и технико-экономическому анализу разработки нефтяных месторождений с применением метода воздействия на пласт водой, загущенной полимерами" должно периодически уточняться и дополняться с учетом новых достижений научных разработок и обобщения результатов опытно-промышленных испытаний метода в различных геолого-физических условиях. Учитывая интенсивность проводимых исследований в данном направлении, первое уточнение Руководства должно быть осуществлено не позднее 1980 г. Последующая переработка должна проводиться не реже одного раза в 5 лет.

2. ТЕРМИНОЛОГИЯ

Адсорбция полимеров в пористой среде – собственно адсорбция (концентрирование адсорбируемого полимера на поверхности твердого тела под влиянием молекулярных сил поверхности адсорбента), а также механическое удержание полимерных частиц пористой средой.

Вязкость наибольшая (начальная) ньютоновская (η_0) - предельное значение эффективной вязкости, которая определяется как отношение касательного напряжения τ к скорости сдвига $\dot{\gamma}$. При достаточно низких значениях скоростей и напряжений является коэффициентом пропорциональности между этими параметрами и не зависит от них.

Вязкость эффективная, кажущаяся, структурная (η) - вязкость, определяемая как отношение касательного напряжения к скорости сдвига $\dot{\gamma}$, зависящая от этих параметров и механической предистории систем. Жидкости, у которых вязкость зависит от режимов деформирования, называют неньютоновскими, а явление зависимости вязкости от напряжения и скорости сдвига - аномалией вязкости.

Десорбция полимера - процесс удаления адсорбированного или механически удержанного пористой средой полимера. Десорбция обратна адсорбции и вызывается уменьшением концентрации адсорбируемого вещества в окружающей адсорбент среде или нарушением динамического равновесия между находящимся в движении и адсорбированным полимером.

Деструкция полимеров - разрушение макромолекул под действием тепла, кислорода, света, механических напряжений, биологических и других факторов. Чаще всего деструкция полимеров про-

исходит при совместном действии нескольких факторов.

Дилатансия – явление возрастания эффективной вязкости по мере увеличения скорости сдвига. Системы, проявляющие дилатантные свойства, называются дилатантными.

Касательное напряжение (τ) – сила, отнесенная к единице площади, сдвигающая две смежные части тела друг относительно друга.

Ньютоновская жидкость – жидкость, коэффициент вязкости которой является константой вещества, зависящей от температуры и давления, но не от условий измерений.

Остаточный фактор сопротивления – отношение подвижности воды, закачиваемой в пласт до раствора полимера, к подвижности воды, фильтрующейся в пористой среде за раствором полимера.

Полимеры – химические соединения с высокой молекулярной массой (от нескольких тысяч до многих миллионов), в состав молекул (макромолекул) которых входит большое число одинаковых группировок, соединенных химическими связями.

Полиэлектролитное набухание – электростатическое отталкивание одноименно заряженных звеньев цепи полимера, приводящее к развертыванию макромолекулярных клубков и увеличению их линейных размеров.

П о л и э л е к т р о л и т ы – полимеры, в состав макромолекул которых входят группы, способные к ионизации в растворе.

П с е в д о п л а с т и ч н о с т ь – явление снижения эффективной вязкости по мере возрастания скорости сдвига. Системы, проявляющие указанные свойства, называются п с е в д о п л а с т и ч н ы м и.

Р е о л о г и я (происходит от греческого "ρεο" – – течь) – наука о законах деформации различных реальных материалов под действием приложенного к ним напряжения. Упругость, пластичность, вязкость и прочность – основные реологические свойства материалов.

С к о р о с т ь с д в и г а ($\dot{\gamma}$) – скорость, с которой частицы жидкости перемещаются друг относительно друга.

С о л е с т о й к о с т ь п о л и м е р о в – устойчивость водных растворов полимеров к высаливающему действию электролитов, в частности, щелочноземельных катионов.

С р е д н е в е с о в о й м о л е к у л я р н ы й в е с (M_w) – сумма весовых долей молекул в смеси на их молекулярный вес $M_w = \sum_{i=1} w_i M_i$

С р е д н е ч и с л о в о й м о л е к у л я р н ы й в е с (M_n) – отношение массы полимера к числу молекул.

С т е п е н ь г и д р о л и з а (Г) – отношение количества акрилатных групп к общему числу мономерных звеньев в цепи макромолекулы, выраженное в процентах.

Степень полидисперсности - характеризует ширину молекулярно-весового распределения полимера и определяется как отношение средневесового к среднечисловому молекулярному весу (M_w / M_n)

Фактор сопротивления - отношение подвижности воды к подвижности раствора полимера при фильтрации в пористой среде.

Фильтруемость раствора полимера - способность полимера проникать в пористую среду, не забивая входного участка керна. Количественно может быть оценена коэффициентом фильтруемости.

Фильтруемости коэффициент - параметр, зависящий от свойств полимера и пористой среды, а также от скорости фильтрации; численно равен времени, в течение которого фактор сопротивления на входном участке керна изменяется на заданную величину $\Delta R_{вх}$.

СОКРАЩЕНИЯ

ПАА - полиакриламид,

ПААР - полиакриламид радиационный,

ПААГ - полиакриламид гидролизованный,

ПЭО - полиэтиленоксид,

МВ - молекулярный вес,

МВР - молекулярно-весовое распределение,

ДПР - датчик постоянного расхода,

УДПП - установка дозированной подачи полиакриламида.

3. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И СТЕПЕНЬ ИЗУЧЕННОСТИ МЕТОДА ЗАВОДНЕНИЯ С ПОЛИМЕРАМИ

Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования, а также промысловые наблюдения свидетельствуют о том, что наиболее важными факторами, оказывающими влияние на эффективность разработки нефтяных месторождений, являются отношение подвижностей нефти и воды в пластовых условиях и неоднородность пласта по проницаемости. С увеличением вязкости нефти коэффициент нефтеотдачи резко снижается. Неоднородность пористой среды усугубляет неравномерность продвижения фронта вытеснения. В сильно неоднородных по проницаемости пластах (при коэффициенте вариации проницаемости 0,8 и выше) вытеснение даже маловязкой нефти приводит к преждевременному прорыву вытесняющего агента по наиболее проницаемым зонам пласта. Вытеснение высоковязкой нефти сопровождается вязкостной неустойчивостью, которая проявляется и в однородных пластах. В реальных природных пластах с нефтью малой вязкости неоднородность коллекторских свойств может оказаться первопричиной неравномерного продвижения нефти и воды.

Процесс вытеснения нефти из неоднородного пласта может быть улучшен путем применения водорастворимых полимеров достаточно высокого молекулярного веса, небольшие добавки которых резко снижают подвижность воды. Вытеснение нефти высоковязкими вытесняющими

агентами приводит к гашению вязкостной неустойчивости и выравниванию фронта вытеснения в неоднородных пластах, что, в свою очередь, позволяет повысить охват пласта заводнением и в конечном счете нефтеотдачу месторождений.

Идея применения с этой целью различных загущающих добавок возникла в 1942 г. Однако только с появлением водорастворимых полимеров появилась реальная возможность осуществить на практике идею загущения воды.

Первые результаты лабораторных испытаний растворов полимеров в качестве загущающих добавок появились в зарубежной печати в 1964г. В это же время систематические исследования процессов повышения эффективности заводнения нефтяных пластов путем применения водорастворимых полимеров были начаты в СССР в КуйбышевНИИ НП, ИГ и РГИ и позднее в Гипровостокнефти, ВНИИ, БашНИПИнефть, АзНИПИнефть, Азиннефтехим. Изучению различных аспектов полимерного заводнения посвящены многочисленные работы зарубежных авторов.

К настоящему времени накоплен достаточно большой промысловый опыт применения водорастворимых полимеров для повышения нефтеизвлечения. Высокая эффективность полимерного заводнения доказана теоретически, экспериментально и результатами опытно-промышленных испытаний.

Высокая рентабельность полимерного заводнения в значительной мере определяется специфическим свойст-

вом растворов ПАА вести себя в пористой среде так, словно их вязкость гораздо выше вязкости, замеренной на вискозиметре. Поэтому для существенного снижения подвижности воды требуются небольшие концентрации полимера в растворе. Это явление обусловлено адсорбцией полимера в пористой среде и неньютоновским характером течения растворов. В зависимости от свойств полимера, растворителя и пористой среды могут проявляться самые различные типы течения: ньютоновское, псевдопластическое, дилатантное или их комбинация. Реологические свойства полимерной системы существенно влияют на эффективность полимерного заводнения. Наибольший прирост нефтеотдачи наблюдается при закачке дилатантной системы. Другой важной особенностью заводнения с использованием ПАА является снижение подвижности воды, закачиваемой вслед за раствором полимера. Величина остаточного фактора сопротивления оказывает решающее влияние на полноту вытеснения нефти из неоднородного пласта и является следствием адсорбции полимера в пористой среде. Характерно, что при сравнительно небольшой величине адсорбции снижение подвижности воды может быть значительным. Это создает предпосылки для закачки в пласт небольших по размеру оторочек раствора полимера с последующим вытеснением их водой, что повышает рентабельность метода.

4. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ВОДОРАСТВОРИМЫМ ПОЛИМЕРАМ

4.1. Реагент должен представлять собой линей-

ный полимер, в котором должно быть ограниченное количество поперечных связей.

4.2. Молекулярный вес полимера должен находиться в пределах 1-7 млн. для полиэлектролитов или 3-10 млн. для неионогенных полимеров.

4.3. Выпускаться полимер должен в виде мелкодисперсного порошка с концентрацией основного вещества не менее 90%.

4.4. Степень гидролиза у ПАА предпочтительно иметь в пределах 20-30% (см. п. 6.3).

4.5. Полимер должен быстро и полностью растворяться в воде. Растворение 5 кг полимера в 1 $м^3$ воды должно протекать не более одного часа и осуществляться в условиях, обеспечивающих минимальную деструкцию с сохранением технологических свойств растворов.

4.6. Полимер должен быть достаточно устойчивым, его физико-химические свойства не должны сильно изменяться во времени и от температуры.

4.7. Реагент должен быть устойчивым к высаливанию в пластовых водах плотностью 1,18-1,19г/$см^3$, содержащих до 5,0 г-экв/л ионов хлора, до 4,0 г-экв/л ионов натрия и калия и до 0,5 г-экв/л ионов кальция и магния.

4.8. Реагент должен эффективно загущать воду при небольших концентрациях. Вязкость 0,05%-ного раствора в дистиллированной воде должна быть не менее 5 сПз, желательно 10 и более сПз, а в 2%-ном растворе хлористого натрия - не менее 2 сПз.

4.9. Раствор полимера должен фильтроваться через пористую среду без затухания, то есть не должен забивать поверхности фильтрации. Снижение подвижности воды в поровом пространстве должно быть больше, чем обеспечивает стандартная вязкость.

4.10. Адсорбция полимера из раствора в пористой среде не должна превышать 100 г/м^3 породы, чтобы обеспечить продвижение оторочки реагента на значительное расстояние по пласту.

4.11. Адсорбированный полимер должен вызывать существенное снижение подвижности воды, которая движется вслед за раствором полимера, то есть должен проявляться "остаточный фактор сопротивления", равный не менее 1,5.

4.12. Срок хранения реагента – не менее 0,5 года.

4.13. Реагент не должен вызывать коррозию оборудования.

4.14. Реагент не должен быть токсичным.

5. ВОДОРАСТВОРИМЫЕ ПОЛИМЕРЫ, ПРИГОДНЫЕ ДЛЯ ЗАГУЩЕНИЯ ЗАКАЧИВАЕМОЙ В ПЛАСТ ВОДЫ

5.1. Класс водорастворимых полимеров достаточно широк, но далеко не все из них пригодны для полимерного заводнения (низкая вязкость малоконцентрированных растворов, плохая фильтруемость в пористой среде, аномально высокая адсорбция, нестабильность реагента при хранении и т.п.). Наиболее эффективными загустителями являются высокомолекулярные полимеры трех типов: на основе акриламида (в частности, гидролизованные полиакриламиды), полиэтиленоксиды, полисахариды.

Практическое применение нашел только полиакриламид. Он больше, чем другие полимеры, отвечает указанным выше "Требованиям" и выпускается в промышленном масштабе.

Однако свойства водного раствора полиакриламида в значительной степени зависят от состава растворителя. В минерализованной воде вязкость растворов ПАА резко снижается. В связи с этим в некоторых случаях в качестве загустителей целесообразно использовать полимеры неионогенного типа, на свойства которых не должны оказывать влияние pH среды и минерализация воды.

К неионогенным полимерам относятся полиэтиленоксиды (ПЭО), которые представляют собой твердые воскоподобные термопластичные гомополимеры линейного строения с высоким молекулярным весом / $-CH_2-CH_2-O-$ /$_n$

Они являются продуктами полимеризации окиси этилена в присутствии различных катализаторов. Молекулярный вес ПЭО колеблется в довольно широких пределах - от 10^5 до 10^7 и более. Для заводнения нефтяных пластов можно рекомендовать полиэтиленоксиды высокого молекулярного веса - выше 5.10^6.

Растворимость полиэтиленоксидов в воде зависит от pH среды: с увеличением pH от 4 до 10 растворимость полимера возрастает. Измерение pH от 4 до 11 оказывает небольшое влияние на вязкость водных растворов. ПЭО. При pH выше 12 концентрация гидроксильных ионов снижает вязкость осаждением полимера из раствора. Полиэтиленоксиды выгодно отличаются от гидролизованного полиакриламида тем, что вязкость их растворов в минерализованных водах не снижается. К недостаткам ПЭО следует отнести их неустойчивость. Они сравнительно легко подвергаются механической и окислительной деструкции. Окислительная деструкция полимеров под влиянием кислорода воздуха и других факторов - процесс самопроизвольный.

При течении в пористой среде растворы ПЭО слабо проявляют факторы сопротивления, тем самым снижается эффективность их применения. Однако, несмотря на эти недостатки, они могут быть рекомендованы для испытания при заводнении низкопроницаемых пластов.

5.2. Технический ПАА в Советском Союзе получают в основном в виде 7-9% геля по двум технологиям, отличающимся способом нейтрализации продукта

омыления нитрила акриловой кислоты. В одном случае омыленный продукт нейтрализуют известью, в другом - аммиачной водой. Характеристика полиакриламидов, вырабатываемых промышленностью СССР, представлена в табл. 5.1.

Таблица 5.1.

Характеристика технического ПАА

Показатели	Известковый ПАА	Аммиачный ПАА
Внешний вид	Коллоид в виде геля. Цвет-от бесцветного или молочно-белого до желтого	Коллоид в виде геля. Цвет-от желтого до голубого или зеленого
Содержание основного вещества, %, не менее	7	6
Молекулярный вес, млн.	1,5 - 3,5	3,0 - 5,5
Степень гидролиза, %	8 - 12	1,5 - 6
Содержание солей, %	-	14 - 18

ПАА представляет собой высоковязкий гель, который затаривается в 100-литровые деревянные или 200--250-литровые металлические бочки (иногда ПАА постав-

ляется в полиэтиленовых и холщовых мешках, затаренных в деревянные ящики). фонды на ПАА распределяются Союзглавхимом по заявкам территориальных Управлений материально-технического снабжения (УМТС).

Использование 7-9% геля нетехнологично (большие транспортные расходы, трудоемкость погрузочно-разгрузочных работ, сложности хранения). Промораживание ПАА ухудшает свойства его растворов вследствие деструкции макромолекул, поэтому для хранения требуются большие отапливаемые складские помещения. Из-за отсутствия более технологичных реагентов гель ПАА применяется при проведении промысловых испытаний метода полимерного заводнения. Широкое промышленное применение может найти только порошкообразный продукт.

Порошкообразные полиакриламиды в СССР выпускаются в незначительных количествах. Гель аммиачного полиакриламида обезвоживается путем добавления сульфата аммония с последующей сушкой высоленного полимера и помола его до определенной дисперсности. Характеристика полимеров дана в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Характеристика гранулированного сульфатного полиакриламида

Показатели	Днепродзержинский завод	Ленинск-Кузнецкий завод
Внешний вид	Крупно-дисперсный порошок, размеры частиц 5 - 7 мм	Порошок зеленоватого цвета, размеры частиц 3,6 мм
Содержание основного вещества, %	56-54	52
Молекулярный вес, млн.		3-5,0
Степень гидролиза, %	2	1,5-6
Содержание солей, %	34-36	40

Промышленный выпуск сульфатного гранулированного полиакриламида будет начат на Ленинск-Кузнецком заводе в 1978-1979гг.

В наибольшей степени требованиям, предъявляемым к полимерам-загустителям, в настоящее время отвечает полиакриламид радиационного способа производства, опытно-промышленный выпуск которого планируется начать в текущей пятилетке в Саратове и Брянске.

Характеристика радиационного полиакриламида

Внешний вид	Порошок 0,25 мм
Содержание основного вещества, %	62-85
Молекулярный вес,млн.	4-10
Степень гидролиза, %	8-13

6. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Закачка в пласт растворов полимеров рассматривается как процесс, повышающий эффективность обычного заводнения, поэтому сохраняется общий подход к проектированию разработки нефтяных месторождений. Однако при этом необходим дополнительный комплекс лабораторных исследований с целью получения исходных данных для проектирования полимерного заводнения. Требуется провести следующие работы:

- проверить растворимость полимера в закачиваемых водах и установить их совместимость :
- определить вязкостные характеристики растворов полимеров;
- исследовать фильтрационные и реологические свойства растворов;
- установить величину динамической адсорбции и десорбции полимера при пластовых скоростях в нефтенасыщенных кернах;
- определить величину коэффициента вытеснения

нефти водой и раствором полимера на естественных кернах.

6.1. Проверка совместимости полимера с закачиваемой в пласт водой.

6.1.1. Приготовление растворов ПААГ в сильноминерализованной воде (например, пластовой) приводит к резкому снижению вязкости и ухудшению фильтрационных характеристик. Растворение ПААГ иногда сопровождается появлением осадка, поэтому в каждом конкретном случае необходимо экспериментально проверить совместимость полимера с водой.

Возможны две причины выпадения осадка. Первая из них связана с высаливанием ПААГ в результате взаимодействия с катионами поливалентных металлов (щелочноземельных и особенно трехвалентным железом). Этот процесс сильно зависит от степени гидролиза ПААГ. В случае, когда степень гидролиза более 40%, вероятность осаждения полимера сильно возрастает. Поэтому степень гидролиза ПААГ не должна быть выше 30%.

Второй причиной является наличие в технических продуктах некоторых примесей, дающих осадки при взаимодействии с солями щелочно-земельных металлов, которые обычно присутствуют в пластовых водах. Высокодисперсные осадки образующихся гидроокисей щелочно-земельных металлов сорбируют на себе полимер, снижая его концентрацию в растворе.

6.1.2. Определение совместимости полимера с водой, идущей на приготовление его раствора, осуществляется в следующем порядке:

6.1.2.1. Готовится 2%-ный раствор полимера на дистиллированной воде.

6.1.2.2. К 50 мл технической воды добавляют 2 мл раствора ПААГ, интенсивно перемешивая.

6.1.2.3. В случае появления осадка операцию по п. 6.1.2.2. повторяют, последовательно разбавляя техническую воду дистиллированной. Относительное содержание технической воды в смеси уменьшают до тех пор, пока не прекратится появление осадка.

Таким образом определяется степень разбавления технической воды пресной, при которой приготовление раствора полимера не сопровождается появлением осадка.

6.1.3. В случае ограниченных ресурсов пресной воды необходимо подобрать полимер с меньшей степенью гидролиза, которая определяется по описанной ниже методике /см. приложение 2/.

6.1.4. При отсутствии полимера с гребуемой степенью гидролиза можно провести подкисление растворе ПААГ соляной кислотой при условии закачки растворов в терригенные коллекторы. Перевод части карбоксильных групп из солевой формы в кислую приводит к стабилизации полимера. Однако нельзя допускать сильного снижения pH (менее 6), так как полный перевод полимера в кислую форму вновь приводит к нестабильности, кроме того, при pH $\angle$ 6 сильно возрастает адсорбция полимера. Положительный эффект подкисления обусловлен также переводом нерастворимых гидроокисей и карбонатов в растворимые соли.

6.1.5. Для снижения вероятности образования осад-

ка в сильно минерализованных водах и уменьшения до минимума расхода пресной воды растворение ПААГ необходимо осуществлять в две стадии: вначале приготовить концентрированный раствор полимера (1-2%) в пресной воде, а затем разбавить его до требуемой концентрации пластовой водой.

6.1.6. В случае образования осадка отфильтровывание его неэффективно, так как фильтрат практически не содержит полимера. Поэтому, если все перечисленные мероприятия по ликвидации осадка оказались безуспешными, полимерное заводнение проводить не следует.

6.2. Растворимость полимера в воде.

6.2.1. Растворимость - одна из наиболее важных характеристик, по которой можно сделать заключение о некоторых физико-химических свойствах полимера, в частности, о степени сшивки макромолекул.

Растворимость характеризуется:

а) полнотой растворения полимера;

б) скоростью растворения.

Для определения и сравнения скорости и полноты растворения в воде полимеров различного происхождения рекомендуется пользоваться методикой, приведенной в п. п. 6.2.7.

Линейные полимеры, не содержащие сшитых структур, растворяются полностью и дают однородные растворы. Однако для некоторых образцов наблюдается неполная растворимость, обусловленная присутствием в их составе частично сшитой фракции. Эти образцы должны подвергаться

наиболее тщательному исследованию с определением фильтруемости растворов (см. п. 6.4).

Скорость растворения зависит от следующих основных физико-химических факторов: молекулярного веса и химического состава полимера, величины поверхности контакта полимера с растворителем интенсивности перемешивания, температуры, состава растворителя.

6.2.2. С увеличением молекулярного веса полимера скорость растворения уменьшается. Так, продолжительность растворения Ленинск-Кузнецкого полиакриламида с молекулярным весом 4 млн. в 4 раза больше, чем Калушского полимера молекулярного веса 2 млн. Время растворения Калушского ПАА - 1 час при $t=20^{\circ}C$.

6.2.3. Величина поверхности контакта полимера с растворителем оказывает существенное влияние на продолжительность приготовления раствора.

Малая поверхность контакта 7-9%-ного геля технического ПАА обусловливает большую продолжительность его растворения (см. табл. 6.1), однако в данном случае наибольшее влияние оказывает молекулярный вес полимера, находящегося в геле (см. п. 6.2.2).

Таблица 6.1

Продолжительность растворения Ленинск-Кузнецкого ПАА (интенсивность перемешивания 800 об/мин)

Внешний вид полимера	Размер частиц,мм	Продолжительность растворения в час при температуре, °С		
		18-22	50	70
7-9%-ный гель	3-5	3,5	-	-

Продолжение табл. 6.1.

Внешний вид полимера	Размер частиц,мм	Продолжительность растворения в час при температуре, °С		
		18-22	50	70
Порошок	3,6-1,0	более 8	6	4
	1,0-0,4	1,5	1,25	-
	0,4-0,25	1,75	0,35	-
	менее 0,25	3,5	2,5	-

Растворение порошкообразных ПАА проходит через стадию образования на поверхности частицы концентрированного геля, набухания и растворения поверхностного слоя, вследствие чего скорость растворения порошка будет зависеть от его дисперсности. Оптимальный размер частиц порошкообразного ПАА должен находиться в пределах 0,25-1 мм. Присутствие частиц меньшего размера нежелательно, так как введение в раствор высокодисперсных порошков приводит к слипанию их частиц с образованием медленно растворимых гелеобразных агрегатов.

Для предотвращения слипания порошка ПАА необходимо вводить его на движущуюся поверхность растворителя с использованием устройств, обеспечивающих равномерное распределение его по поверхности растворителя.

При соблюдении этих условий время приготовления 0,5%-ных водных растворов импортных полимеров, имеющих максимальный размер частиц не более 1 мм, и фракций с размером частиц не менее 0,25 мм составляло 1,0 - 1,5 часа (см. табл. 6.3).

6.2.4. При повышении температуры растворителя скорость растворения полимера увеличивается (см. табл. 6.1 и 6.2). Однако в этом случае возрастают трудности, обусловленные слипанием порошка. Поэтому необходимо тщательно соблюдать условия ввода порошка в растворитель, отмеченные в п. 6.2.3.

Приготовление растворов из порошкообразных полимеров с размером частиц 0,25–1,0 мм может проводиться при 10–20°С, тогда как при размере частиц более 1 мм необходима повышенная температура 50–70°С (см. табл. 6.1 и 6.2). Однако в последнем случае продолжительность растворения полимера остается высокой. Поэтому для ускорения приготовления растворов из низкодисперсных порошкообразных полимеров, кроме повышения температуры, рекомендуется добавка 0,05–0,1% (вес) каустической соды (NaOH) (см. табл. 6.2).

Таблица 6.2

Влияние добавки каустической соды (NaOH) на продолжительность растворения Ленинск-Кузнецкого порошкообразного ПАА

Размер частиц, мм	Температура, °С	Концентрация NaOH, % вес	Продолжительность растворения, ч
3,6–7,0	22	0	Более 24
3,6–7,0	70	0	8
3,6–7,0	70	0,05	5
3,6–7,0	70	0,10	4
1,0–3,6	22	0	Более 8

Продолжение табл. 6.2.

Размер частиц, мм	Температура, °С	Концентрация NaOH, % вес	Продолжительность растворения, ч.
1,0-3,6	70	0	4
1,0-3,6	70	0,05	2
1,0-3,6	70	0,10	1,5

Таблица 6.3

Продолжительность растворения импортных полимеров в дистиллированной воде при 20-22°С и концентрации полимера 0,5%

Марка полимера	Продолжительность растворения, ч
Pysher 500 (США)	1-1,5
Pysher 700 (США)	1-1,5
Syper Chaika (Япония)	1-1,5
Praestol (ФРГ)	1
Separan (США)	1
Образцы типа „Polydia" (Япония)	1-1,5
Образцы типа „OWP" (Япония)	1-1,5

6.2.5. Использование перемешивающих устройств для растворения полимера в воде (например, лопастных мешалок) ускоряет процесс приготовления раствора.

В табл. 6.4 показана зависимость времени растворения порошкообразного ПАА Ленинск-Кузнецкого завода полукоксования от центробежного критерия Рейнольдса ($Re_ц$), определяемого как $Re_ц = \frac{nd^2}{\nu}$,

где n – число оборотов мешалки, 1/С; d – диаметр лопастей мешалки, м; ν – кинематическая вязкость воды, $м^2/с$.

Концентрация полимера в растворе 0,5%.

Таблица 6.4

Влияние интенсивности перемешивания на продолжительность растворения Ленинск-Кузнецкого ПАА ($t = 22^oC$)

Число	Время растворения, мин	Вязкость 0,05% раствора ,сПз
8650	500	1,53
21200	440	1,50
37728	240	1,46
166650	50	1,35
332500	40	1,29

Повышать значение $Re_ц$ выше 40 тыс. не следует, поскольку резко ухудшаются технологические свойства раствора вследствие механической деструкции полимера.

6.2.6. Промысловые результаты работ по приготовлению водных растворов ПАА показали, что оптимальная концентрация полимера в приготовляемом растворе

составляет 1,0-2,0%. Причем, чем выше молекулярный вес полимера, тем меньше должна быть его концентрация в приготовляемом растворе и наоборот.

6.2.7. Методика определения скорости растворения полиакриламида в воде.

6.2.7.1. Сущность метода.

Методика основана на определении продолжительности растворения полиакриламида при приготовлении 0,5%-ного раствора его в воде при механическом перемешивании в стандартных условиях.

6.2.7.2. Необходимые приборы и принадлежности:

- лабораторная мешалка со ступенчатым редуктором, обеспечивающим постоянное число оборотов, с размахом лопастей 60 мм;

- стакан стеклянный емкостью 400 мл, внутренним диаметром 80 мм - 2 шт;

- секундомер с ценой деления 0,2 с;

- весы технические;

- термостат типа И-10.

6.2.7.3. Проведение испытания.

Растворение геля.

В стакане емкостью 400 мл на технических весах взвешивают рассчитанное количество геля с точностью 0,01 г (см. примечание 1) и добавляют необходимое количество дистиллированной воды (см. примечание 2) из расчета получения 0,5%-ного раствора полимера в пересчете на активное вещество (см. примечание 3). При слабом перемешивании скальпелем разрезают гель на неболь-

шие кусочки, чтобы сократить время растворения и избежать наматывания геля на мешалку. Далее стакан с содержимым помещают в термостат, отрегулированный на требуемую температуру, устанавливают число оборотов мешалки 800 об/мин и через каждые 30 мин останавливают мешалку для проверки полноты растворения.

Продукт считают растворенным, если в проходящем пучке света при перемешивании раствора стеклянной палочкой или переливания его тонкой струей в другой стакан не наблюдается сгустков полимера.

Растворение сухого полиакриламида.

На технических весах взвешивают рассчитанное количество сухого вещества с точностью 0,01 г. (см. примечание 1). В стакан емкостью 400 мл наливают рассчитанное количество дистиллированной воды (см. примечание 2) из расчета получения 0,5%-ного раствора полимера в пересчете на активное вещество (см. примечание 3). Стакан с водой помещают в термостат с заданной температурой и термостатируют в течение 20 мин. Затем при работающей мешалке небольшими порциями равномерно присыпают навеску сухого полиакриламида во избежание слипания частичек полимера и образования трудно растворимых комков. Полнота растворения определяется визуально, как и в предыдущем случае. Время растворения полимеров во всех случаях определяется суммарной продолжительностью работы мешалки.

Примечания:

1. Расчет навески полиакриламида производит-

ся по формуле:

$$m = \frac{0.5 \cdot 200}{C} \text{ г},$$

где С – содержание активного вещества в полиакриламиде, г.

2. Количество воды, необходимое для получения раствора 0,5%-ной концентрации, мл, определяется по формуле: $M = 200 - m$,

где 200 – принятый объем приготовляемого раствора полимера, мл,

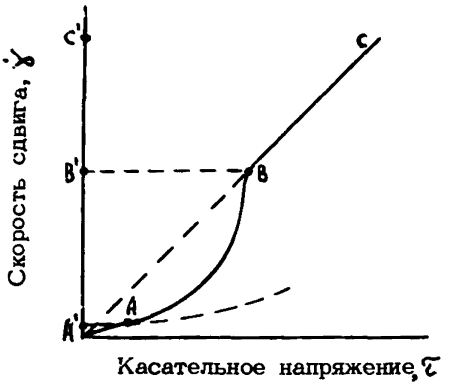
3. Содержание основного вещества в исходном продукте, определяется спектрофотометрически (см. приложение № 1).

6.3. Вязкостная характеристика растворов полимеров.

При проектировании оборудования для приготовления растворов полимеров и закачки их в пласт, при расчете трубопроводов, а также для сравнения между собой различных полимеров необходимо знать вязкость раствора.

Измерение вязкости связано с некоторыми особенностями, обусловленными тем, что рассматриваемые системы являются неньютоновскими жидкостями. Вследствие этого в некоторой области скоростей сдвига имеет место аномалия вязкости.

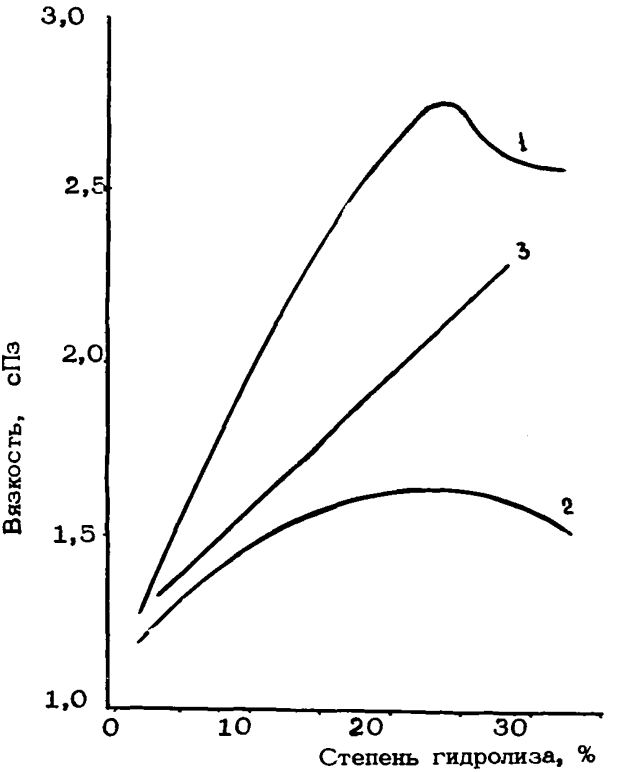
На рис. 1 помещена обобщенная кривая Оствальда для растворов полимеров, показывающая зависимость между касательным напряжением (τ) и скоростью сдвига ($\dot{\gamma}$). В некотором диапазоне низких скоростей



Р и с. 1. Обобщенная кривая Оствальда

сдвига (ОА) указанная зависимость линейная, вязкость, определяемая отношением $\tau/\dot{\gamma}$, не зависит от скорости сдвига и является максимальной для данного раствора (наибольшая ньютоновская вязкость η_0). На участке АВ вязкость раствора является функцией скорости сдвига и постепенно снижается с увеличением последней (аномалия вязкости). При высоких скоростях сдвига (B' C') вязкость раствора вновь постоянна – наименьшая ньютоновская вязкость (η_∞).

На вязкость водных растворов гидролизованного полиакриламида существенное влияние оказывает степень гидролиза полимера (см. рис. 2). Исходя из экспериментальных данных, нижний предел степени гидролиза ПААГ должен быть не менее 20%, а верхний – не более 30 %. Верхний предел степени гидролиза также лимитируется устойчивостью водных растворов ПААГ к солям жесткости



Р и с. 2. Зависимость вязкости разбавленных растворов ПАА от степени гидролиза:

1,2 – Днепродзержинский ПАА в технической воде и воде Голубого озера; 3 – Ленинск-Кузнецкий ПАА в технической воде

(см. 6.1).

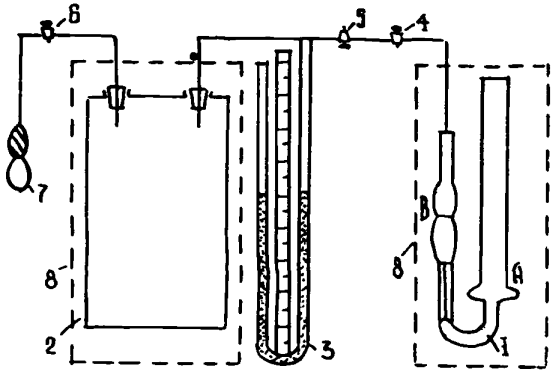
Наиболее простые и широко используемые вискозиметры (капиллярные и ротационные) позволяют проводить измерение вязкости растворов полимеров в области скоростей сдвига, где она аномальна.

6.3.1. В ротационных вискозиметрах (методика работы прилагается к каждому типу в паспорте прибора) возможность изменения скорости сдвига предусмотрена конструкцией и ее величина определяется скоростью вращения ротора и геометрическими размерами измерительного устройства. Приборы данного типа являются наиболее удобными для вискозиметрических исследований растворов полимеров.

6.3.2. Измерение вязкости полимерных растворов можно с успехом проводить на стандартных капиллярных вискозиметрах типа Оствальда-Пинкевича после несложной их модернизации. Регулирование скорости сдвига осуществляется путем изменения перепада давления на капилляре-вискозиметре с помощью моностата, который монтируется, как показано на рис. 3.

Объем буферной склянки должен быть не менее 2 л для того, чтобы можно было пренебречь изменением давления в ней во время опыта в результате увеличения объема, занятого воздухом, при истечении жидкости из измерительного шарика вискозиметра.

Перед началом работы проверяется герметичность всей системы и проводится тарировка вискозиметра с помощью ньютоновской жидкости известной вязкости и плот-



Р и с. 3. Модифицированный вискозиметр Оствальда - Пинкевича:

1 - вискозиметр: 2 - буфер: 3 - манометр жидкостный: 4,5,6 - краны: 7 - резиновая груша: 8 - термостат

ности. Она заключается в определении постоянной вискозиметра (К), равной отношению вязкости тарировочной жидкости (η) к ее плотности (ρ), и времени истечения (t) как функции перепада давления ΔP.

Перепад давления создается путем нагнетания воздуха резиновой грушей (7) в буферную склянку (2) и регулируется краном (5). Кран (4) служит для засасывания исследуемой жидкости из колена А вискозиметра в шарик В.

Определив постоянную К вискозиметра при 5-7 различных перепадах давления, строят кривую $K = f(\Delta P)$,

которой в дальнейшем пользуются при расчете вязкости растворов полимеров.

Указанным способом тарируются несколько вискозиметров, имеющих разный диаметр капилляра.

Подготовку раствора полимера для измерения вязкости, выбор и подготовку вискозиметра, работу на нем следует осуществлять в соответствии с ГОСТ 18249-72 "Пластмассы. Метод определения вязкости растворов полимеров". Дополнением является лишь проведение измерений при нескольких перепадах давления.

Динамическая вязкость раствора полимера при данном перепаде давления вычисляется по формуле

$$\eta = K \cdot \rho \cdot t,$$

где K – постоянная вискозиметра при данном перепаде давления; ρ – плотность раствора; t – время истечения.

При данном перепаде давления вычисляется также средняя скорость сдвига $\bar{\dot{\gamma}}$, равная $\dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi R^3 t}$, где Q – объем измерительного шарика вискозиметра;

R – радиус капилляра вискозиметра.

Результатом работы является построение кривой зависимости динамической вязкости раствора полимера от скорости сдвига.

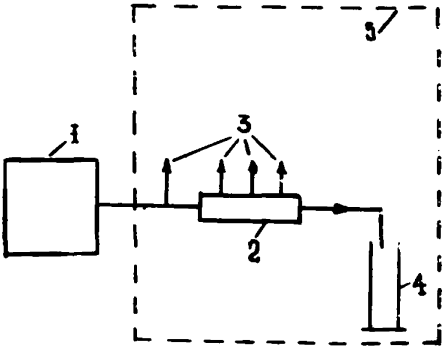
6.4. Определение фильтрационных, реологических, нефтевытесняющих и адсорбционных характеристик растворов полимеров.

Изучение указанных свойств растворов полимеров применительно к конкретному месторождению, на котором

намечается провести полимерное заводнение, должно обязательно выполняться на естественных кернах и флюидах этого месторождения. Опыты необходимо проводить при температуре, равной пластовой. Моделирование пластового давления необязательно, поскольку существенной зависимости изучаемых свойств растворов полимеров от абсолютного давления не обнаружено.

6.4.1. Оборудование.

Используются два типа установок – постоянного расхода и постоянного перепада давления. Методика проведения опытов и получаемые результаты на обеих уста-

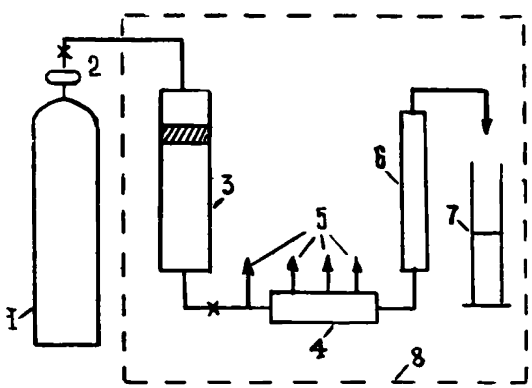


Р и с. 4. Схема установки:

1 – ДПР: 2 – кернодержатель; 3 – к измерителям давления; 4 – мерная емкость для сбора жидкостей; 5 – термостат

новках идентичны (при условии нормальной фильтруемости растворов полимеров в пористой среде).

6.4.1.1. Установка постоянного расхода показана на рис. 4. Регулируемый постоянный расход жидкости через керн создается датчиком постоянного расхода (ДПР), конструкция которого может быть самой различной, однако он должен удовлетворять следующим основным требованиям: а) должна быть достаточно высокая стабильность подачи жидкости (погрешность расхода не должна превышать 1%); б) должен быть достаточно широкий диапазон



Р и с . 5. Схема установки:

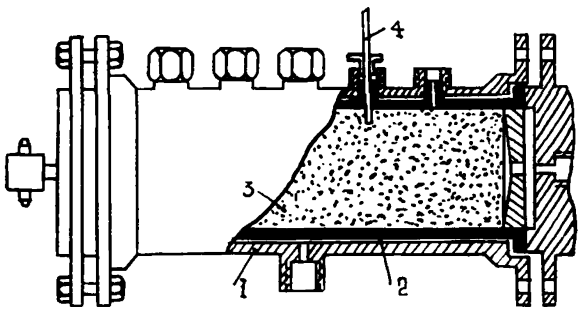
1 – баллон со сжатым воздухом; 2 – редуктор газовый; 3 – поршневой разделитель; 4 – кернодержатель; 5 – к измерителям давления; 6 – расходомер; 7 – мерная емкость для сбора жидкостей; 8 термостат

задаваемых расходов (от 1 до 2000 $см^3/ч$).

6.4.1.2. Установка постоянного перепада давления (рис. 5) имеет устройство для поддержания постоянного давления на входе в керн. Исследуемая жидкость из колонки (3) выдавливается газом. Для предотвращения растворения газа в жидкости между ними устанавливается разделительный поршень. Регулировка рабочего давления осуществляется при помощи регулятора давления "после себя" и газового редуктора, что обеспечивает достаточно стабильное давление на протяжении всего опыта. При работе в области малых перепадов давления (до 100 см вод. ст.) фильтрация обеспечивается напорной емкостью, устанавливаемой на нужной высоте. Постоянство уровня жидкости в напорной емкости достигается общепринятыми в таких случаях методами.

6.4.1.3. Замер давления в установке как первого, так и второго типа осуществляется приборами, погрешность которых не должна превышать 1%. Для этого используются пьезометры (при малых перепадах давления), образцовые манометры и датчики давления с автоматическими записывающими устройствами. Последние особенно удобны в работе.

6.4.1.4. Одним из наиболее важных элементов установок по фильтрации является кернодержатель. Непременным условием всех исследований фильтрационных и реологических свойств неньютоновских систем является регистрация распределения давления вдоль пути течения, поэтому в кернодержателе должна быть предусмотрена воз-



Р и с. 6. Схема кернодержателя:

1 – корпус; 2 – манжета гидрообжима; 3 – – керн; 4 – пьезометр

можность замера давления не только на входе, но и в нескольких промежуточных точках керна (рис. 6).

6.4.1.5. На выходе из керна рекомендуется устанавливать вискозиметр непрерывного действия, состоящий из стеклянного калиброванного капилляра (с внутренним диаметром 0,4–0,8 мм, длиной 200–400мм) и пьезометра, регистрирующего давление на входе в капилляр.

6.4.2. Подготовительные работы.

6.4.2.1. Подготовка кернов включает в себя все работы, предусмотренные в "Методическом руководстве по определению коэффициента вытеснения нефти водой в лабораторных условиях", утвержденном Миннефтепромом. При

этом определяется подвижность нефти при остаточной водонасыщенности, подвижность воды при остаточной нефтенасыщенности ($K_в / \mu_в$) и коэффициент нефтевытеснения по воде ($\beta_в$).

6.4.2.2. В соответствии с указаниями, приведенными в п. 6.3, приготавливается от 3 до 5 растворов полимера различной концентрации (минимальная - 0,01%, максимальная устанавливается в процессе опыта). Объем раствора каждой концентрации - 1 л.

6.4.2.3. Все приготовленные растворы полимера подвергаются механической обработке путем фильтрации через керн при скоростях, близких к скоростям в призабойной зоне нагнетательных скважин данного месторождения.

6.4.3. Проведение исследований.

Работа выполняется в два этапа. На первом этапе получают исходные данные для определения оптимальной концентрации полимера в растворе в соответствии с п.9.3. Опыт проводят на колонке кернов с проницаемостью, равной средней проницаемости пласта, выбранного для полимерного заводнения.

6.4.3.1. Вытесняют нефть водой, используемой на данном месторождении, соблюдая условия автомодельности. При этом определяют подвижность воды при остаточной нефтенасыщенности, а также коэффициент вытеснения по воде. Количество вытесненной из керна нефти определяется объемным и весовым методами.

6.4.3.2. Через керн последовательно прокачивают

подготовленные описанным в п. 6.4.2.2 методом растворы полимера различной концентрации. Закачку начинают с минимальной концентрации и при трех, пяти различных расходах (давлениях на входе), чтобы охватить возможно больший диапазон скоростей фильтрации, причем начинают с наибольшей. На каждой скорости опыт продолжается до установления стационарного режима фильтрации. Время выхода на установившийся режим зависит от фильтруемости раствора полимера в данной пористой среде. При хорошей фильтруемости режим устанавливается быстро (за несколько часов), и подвижность фильтрующихся жидкостей на всех участках керна (включая и входной) примерно одинакова.

6.4.3.3. Подвижность рассчитывается по уравнению Дарси по замеренным значениям расхода и перепада давления.

6.4.3.4. Возможны случаи, когда подвижность раствора ПАА на входном участке керна резко отлична от подвижности по всей остальной длине. Наличие в растворе большого количества сшитых молекулярных структур, высокая степень полидисперсности полимера и некоторые другие причины могут вызвать закупорку входного участка керна, которая, прогрессируя, приведет к резкому и непрерывному росту давления на выходе (снижение расхода в случае работы при постоянном давлении). В этом случае необходимо заменить его на другой образец с лучшими фильтрационными свойствами или быть готовым к борьбе со значительным снижением приемистости нагнетательных

скважин и частым ее восстановлением в процессе осуществления полимерного заводнения.

6.4.3.5. Фильтрационная способность растворов полимеров может быть количественно оценена величиной коэффициента фильтруемости, определяемого по формуле:

$$\Phi = \frac{T}{\Delta R_{вх}/R},$$

где $\Delta R_{вх}$ – изменение фактора сопротивления на входном участке керна за время T;

R – фактор сопротивления на основной части керна (исключая входной участок).

Коэффициент фильтруемости определяется в опытах после стабилизации фактора сопротивления в основной части керна и зависит от свойств раствора полимера и пористой среды, а также от заданной начальной скорости фильтрации. Чем больше величина коэффициента фильтруемости, тем лучше фильтрационная способность раствора. Для образцов полимера с хорошей фильтруемостью $\Phi > 1$. В идеальном случае $\Phi \to \infty$.

6.4.3.6. После определения фактора сопротивления по участкам керна вслед за раствором полимера через керн прокачивается вода, используемая на месторождении. Вначале следует фильтрацию воды проводить при малых скоростях с переходом к всевозрастающим. При каждой скорости подвижность воды определяется вышеописанным способом.

6.4.3.7. На основании полученных результатов по фильтрации растворов полимера и воды, закачиваемой после них, строят кривые зависимости фактора сопротив-

ления от скорости фильтрации.

6.4.3.8. Аналогичный цикл работ проводится на этом же керне с раствором полимера следующей более высокой концентрации и т. д.

Максимальной концентрацией, при которой заканчивают исследование, является концентрация раствора, имеющего подвижность, равную подвижности нефти в диапазоне пластовых скоростей фильтрации.

6.4.3.9. Полученные на каждой концентрации полимера кривые $R=f(V)$, $R_{ост}=f(V)$ закладываются в расчетную модель полимерного заводнения. Результатом является определение оптимальной концентрации данного полимера в растворе для проведения полимерного заводнения на данном месторождении (см. п. 9.4).

6.4.4. Определив оптимальную концентрацию полимера в растворе, переходят ко второму этапу исследований-изучению реологических, нефтевытесняющих и адсорбционных свойств этого раствора в зависимости от проницаемости пористой среды, поскольку последняя оказывает существенное влияние на указанные свойства.

6.4.4.1. Собирают несколько колонок кернов (длиной не менее 20-25 см) разной проницаемости с тем, чтобы охватить диапазон характерных для данного пласта проницаемостей, и проводят опыты с каждой колонкой отдельно.

6.4.4.2. Факторы сопротивления и остаточные факторы сопротивления для разных проницаемостей в зависимости от скорости фильтрации (реологические характери-

стики раствора) определяют так же, как это делалось в 6.4.3.

6.4.4.3. Коэффициент вытеснения нефти при полимерном заводнении (β_p) определяется для каждой проницаемости керна одновременно со снятием реологических характеристик.

Для этого с помощью бюретки, имеющей внизу сливной кран для раствора полимера и воды, измеряют количество нефти, дополнительно вытесненной в результате закачки раствора полимера (цена деления бюретки 0,1 $см^3$). Это количество приплюсовывают к нефти, вытесненной при обычном заводнении, и вычисляют коэффициент вытеснения по раствору.

Величина коэффициента вытеснения, закладываемая в расчет, берется как средняя из найденных значений коэффициентов вытеснения для каждой принцаемости керна.

6.4.4.4. Определение величины динамической сорбции и десорбции полимера проводится одновременно с определением других выше рассмотренных характеристик.

При скорости, близкой к средней пластовой, отбирают пробы жидкости на выходе из керна, в которых определяется концентрация полимера по описанной ниже методике (см. приложение № 1). При выходе на исходную концентрацию (и установившийся режим фильтрации) закачка раствора ПАА прекращается и полимер вытесняется водой с отбором проб, в которых также определяется концентрация ПАА. По данным анализа проб строится выходная кривая концентрации полимера в зависимости от объема закачки

раствора и воды после него.

Величина динамической сорбции полимера на данной пористой среде вычисляется методом материального баланса поступившего в образец и вышедшего из него полимера. При этом необходимо точно знать объем пор образца пористой среды, с которыми контактирует полимер. Сложность здесь заключается в том, что не все поры, свободные от остаточной нефти, могут быть доступны для макромолекул полимера. Поэтому для определения доступного полимеру порового объема поступают следующим образом.

Перед закачкой раствора полимера через керн пропускают раствор хлористого натрия, концентрация которого должна быть на 1-2% выше концентрации солей в воде - растворителе полимера.

В процессе закачки отбираются пробы, анализируемые затем на содержание хлористого натрия (ГОСТ 2401-62). После выхода на исходную концентрацию хлористого натрия проводят вытеснение его раствора водой, в которой растворяется полимер, с отбором проб и их анализом.

Строят выходную кривую концентрации хлористого натрия в зависимости от объема прокачки. Ее сравнение с аналогичной кривой, получаемой для раствора полимера, позволяет определить недоступный для макромолекул полимера поровый объем, так как молекулы хлористого натрия не адсорбируются на пористой среде и проникают во все поры образца.

На рис. 7А показан случай, когда адсорбция по-

лимера на пористой среде невелика. Выходная кривая концентрации полимера аномально смещена влево. Недоступный полимеру поровый объем равен

$$(\Delta_2 - \Delta_1) V_{пор}.$$

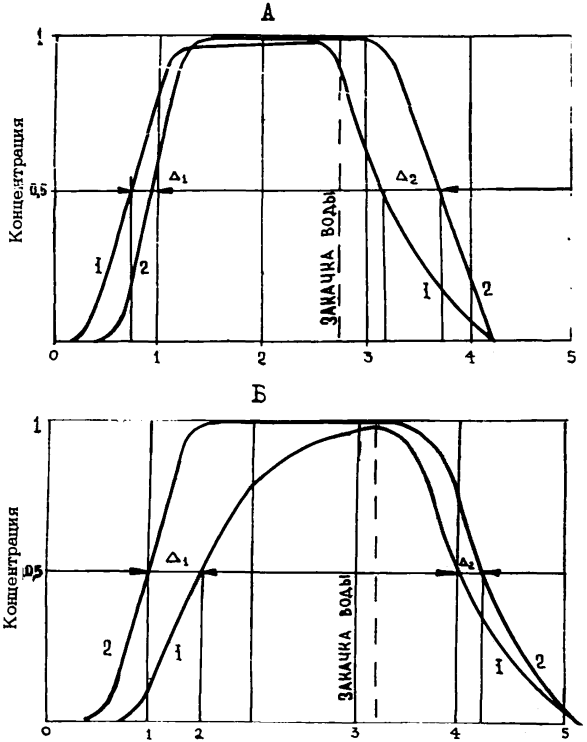
Когда адсорбция полимера значительна (рис. 7Б), выходная кривая концентрации полимера не имеет аномального смещения влево; недоступный для полимера поровый объем составляет $(\Delta_1 - \Delta_2) V_{пор}$.

В обоих случаях величина адсорбции полимера на пористой среде численно равна разности площадей фигур под выходными кривыми концентрации хлористого натрия и полимера.

Исследования, аналогичные рассмотренным выше, проводят при всех выбранных проницаемостях керна и затем находят среднюю величину динамической сорбции полимера.

Закладываемый в расчетную схему полимерного заводнения коэффициент Генри (Г) определяется как Г=А/С, где А - средняя величина динамической сорбции, г/см^3; С - концентрация полимера в растворе, г/см^3.

6.4.5. При отсутствии достаточного количества кернового материала все исходные данные, необходимые для проектирования полимерного заводнения, в первом приближении могут быть получены в одном опыте. Для этого собирают колонку из кернов разной проницаемости (каждый имеет длину 3-4 см) в порядке ее убывания от входа кернодержателя к выходу. При этом необходимо обеспечить измерение перепада давления на каждом от-



Р и с. 7. Изменение концентрации выходящего раствора в зависимости от суммарного объема прокачанной жидкости в объемах пор:

1 – раствор ПАА; 2 – раствор $NaCl$

дельном керне. Тогда реологические характеристики раствора будут определены сразу для всего набора проницаемостей.

Коэффициент вытеснения нефти как по воде, так и по раствору полимера, а также величина адсорбции являются автоматически осредненными.

После завершения опыта по фильтрации остаточная нефтенасыщенность устанавливается экстракцией кернов по общепринятой методике.

6.5. Лабораторные исследования для получения исходных данных при проектировании полимерного заводнения связаны с известными трудностями. Поэтому в предварительных ориентировочных расчетах показателей процесса вытеснения нефти оторочкой загущенной воды можно использовать нижеприведенные реологические характеристики и параметры динамической сорбции, полученные для растворов различных полимеров, используемых в настоящее время на практике или планируемых к использованию.

6.5.1. На рис. 8 представлены реологические кривые для растворов полимеров. В качестве растворителей использовалась модель волжской воды (с солевым составом 0,18 г/л $CaCl_2$ и 0,14 г/л $NaCl$) и 2%-ный раствор $NaCl$. Уравнение этих кривых имеет вид:

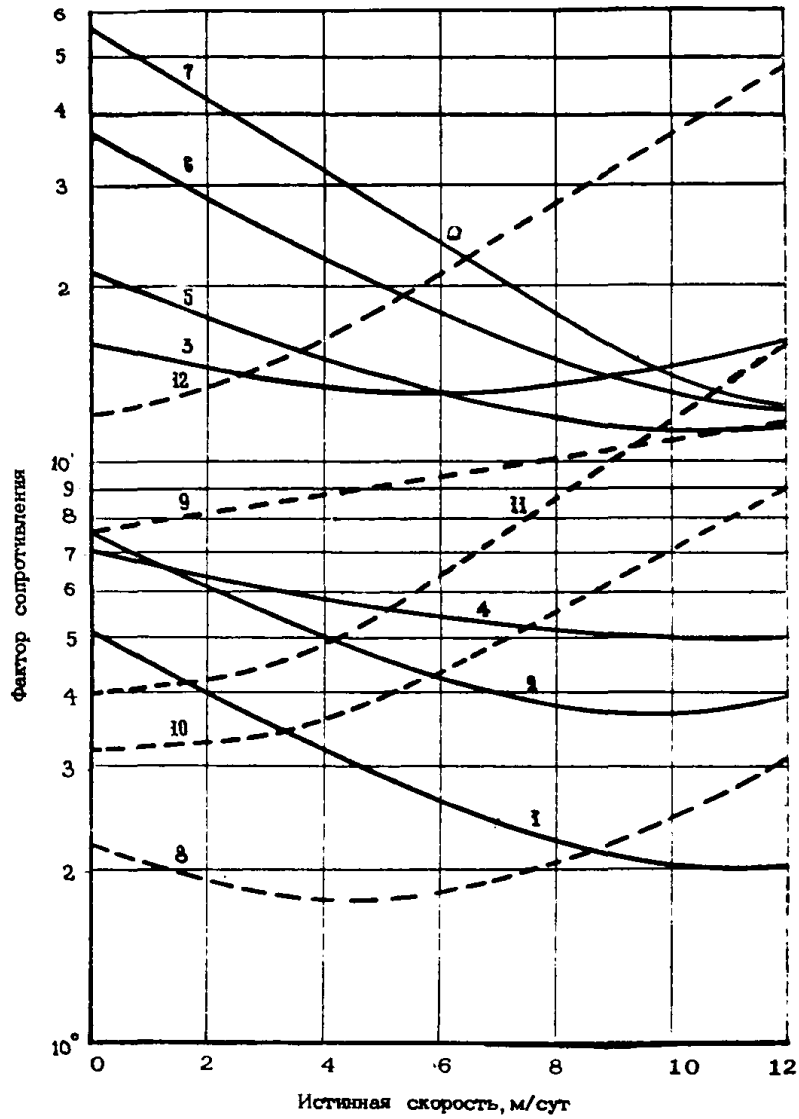
$$\lambda_1 = \left[A_1 v^2 + B_1 v + \left(\alpha_1 e^{-1,5H} + 1\right)\right] f(C) + 1,$$

где для пресной воды $f(C) = e^{\gamma C} - 1$ при $0 < C < 0,03\%$,

$f(C) = a_1 + b_1 C$ при $C > 0,03\%$,

а для 2%-ного раствора $NaCl$

$$f(C) = B_1 \cdot C$$



Р и с. 8. Зависимость фактора сопротивления от скорости течения.
Проницаемость пористой среды – 0, 4Д,
Концентрация полимера в растворе – 0, 05%.
Номера кривых соответствуют номерам полимеров в таблице 6.5.

Значение коэффициентов этого уравнения для каждой кривой помещены в табл. 6.5.

6.5.2. На рис 9 представлены реологические кривые для воды, фильтрующейся после полимеров.

Общий вид уравнений этих кривых имеет вид:

$$\lambda_2 = \left[\left(A2\,v^2 + B2\,v + 1\right) a1\, e^{-1,5K}\right] f_2(C) + 1,$$

где $f_2(C) = b_2 \cdot C$

Значение коэффициентов в уравнении фактора остаточного сопротивления для конкретных полимеров даны в табл. 6.6.

6.5.3. Значения величин динамической сорбции, полученных при исследовании 0,05%-ных растворов полимеров, приготовленных на воде разного солевого состава в различных пористых средах, представлены в табл. 6.7. Здесь же приведены значения коэффициента Генри рассчитанные из условия линейной изотермы сорбции, которая реализуется в диапазоне практически используемых концентраций полимера (0-0,3%).

Таблица 6.5.

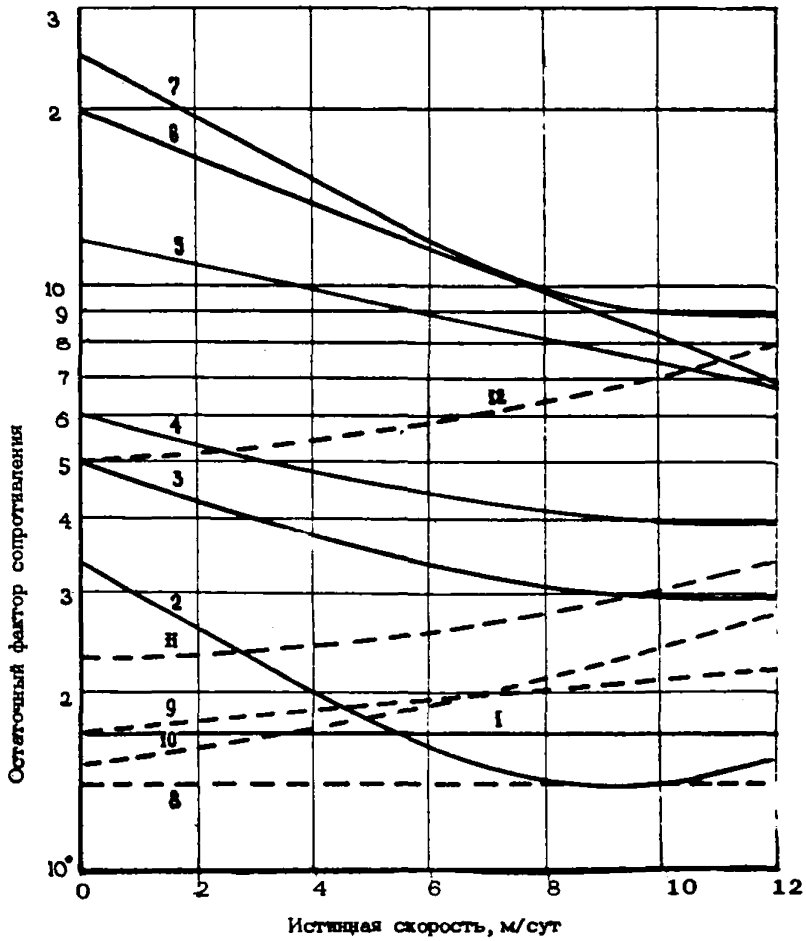
Значение коэффициентов уравнений реологических кривых для растворов полимеров

№ полимера	Полимер	Молекулярный вес $M \cdot 10^{-6}$	Коэффициенты					$\dot{\gamma}$
			A1	B1	1	a1	в1	
	Растворитель – водопроводная вода							
1	Известковый ПАА	1,5	0,009	–0,20	0,46	1,35	37,0	41,4
2	То же	2,0	0,011	–0,22	1,14	1,70	46,0	46,9
3	"	3,4	0,014	–0,17	2,38	2,75	75,0	59,7
4	Аммиачный ПАА	3,5	0,024	–0,46	0,84	1,72	47,0	47,5
5	ПААР	3,6	0,012	–0,25	1,49	4,67	126,0	74,9
6	Пушер–500	4,6	0,037	–0,64	0,63	11,0	300,0	101,5
7	Пушер–700	5,2	0,041	–0,69	0,36	19,0	520,0	119,1
	Растворитель – 2%-ный NaCl							
8	Известковый ПАА	2,0	0,014	–0,122	–0,46	0	32,2	–
9	То же	3,4	0	+0,074	0,74	0	92,4	–
10	ПААР	3,6	0,025	–0,048	0,25	0	38,6	–
11	Пушер–500	4,6	0,046	–0,092	0,70	0	43,4	–
12	Пушер–700	5,2	0,041	0	1,44	0	122,8	–

Таблица 6.6.

Значения коэффициентов уравнений реологических кривых для воды, фильтруюшейся после раствора полимеров

№ полимера	Полимер	Молекулярный вес МВх10^6	Коэффициент			
			A2	B2	a1	в2
	Растворитель - водопроводная вода					
1	Известковый ПАА	1,5	0,01	-0,19	1,06	24,1
2	То же	2,0	0,004	-0,09	1,6	54,7
3	"	3,4	0,002	-0,03	2,0	72,9
4	Аммиачный ПАА	3,5	0,007	-0,133	3,1	58,8
5	ПААР	3,6	0,004	-0,09	3,4	117,9
6	Пушер-500	4,6	0,007	-0,140	4,4	157,4
7	Пушер-700	5,2	0,008	-0,152	5,1	171,5
	Растворитель - 2%-ный NaCl					
8	Известковый ПАА	2,0	0,01	-0,086	0,2	72,9
9	То же	3,4	0,005	+0,009	0,92	27,7
10	ПААР	3,6	0,008	-0,010	0,68	26,8
11	Пушер-500	4,6	0,006	+0,001	1,15	41,2
12	Пушер-700	5,2	0	+0,057	1,44	101,2



Р и с. 9. Зависимость остаточного фактора сопротивления.
Проницаемость пористой среды – 0, 4Д
Концентрация полимера в растворе – 0, 05%.
Номера кривых соответствуют номерам
полимеров в табл. 6. 6.

Таблица 6.7

Полимер	Растворитель	Пористая среда	Адсорбция		Коэффициент Генри
			мг/г	г/м³	
ПАА, Калушский	Дистиллированная вода	Нецементированный кварцевый песок, размер зерен 0,1–0,15 мм	0,01–0,03	18–54	0,036–0,108
Гомополимер	То же	Искусственно сцементированный кварцевый песок, без нефти	0,017	30	0,06
Гидролизованный гомополимер	"	То же	0,012–0,015	21–26	0,042–0,052
ПАА, Калушский	"	"	0,029	51	0,102
ПАА, Калушский	2% раствор NaCl	Искусственно сцементированный песок с остаточной нефтью	0,035	59,8	0,12
ПАА, Калушский	Вода "Голубого озера"	Естественный керн (известняк) с остаточной нефтенасыщенностью	0,059	127	0,254

Продолжение табл. 6.7

Полимер	Растворитель	Пористая среда	Адсорбция		Коэффициент Генри
			мг/г	г/м³	
ПАА, Калушский	Сеноманская вода-хлоридно-натриевая с минерализацией 18-20г/л	Естественный песчаник пласта Усть-Балыкского месторождения с остаточной нефтью	0,057	120	0,24

7. ОБЛАСТЬ ЭФФЕКТИВНОГО ПРИМЕНЕНИЯ РАСТВОРОВ ПОЛИМЕРОВ И КРИТЕРИИ ВЫБОРА ОБЪЕКТОВ, ПРИГОДНЫХ ДЛЯ ПОЛИМЕРНОГО ЗАВОДНЕНИЯ

7.1. Область рентабельного применения полимерного заводнения довольно широка, однако определить ее границы достаточно обоснованно можно только при комплексном анализе результатов лабораторных исследований, отечественного и зарубежного опыта, а также путем сравнительных расчетов процесса вытеснения нефти из неоднородных пластов растворами полимеров и водой.

Для выяснения влияния различных параметров на нефтеотдачу пласта при полимерном заводнении были проведены многовариантные расчеты показателей процесса вытеснения нефти оторочкой раствора полимера по представленной ниже методике. Приняты следующие характеристики пласта, нефти и вытесняющих агентов: средняя проницаемость пласта 0,5Д; коэффициент вариации проницаемости 0,535 и 0,877; относительная проницаемость для воды при остаточной нефтенасыщенности 0,5; пористость 0,19; коэффициент вытеснения нефти водой 0,675, раствором полимера – 0,700; вязкость нефти в пластовых условиях от 1 до 300 сПз. Предполагалось, что на различной стадии разработки пласта закачивается раствор Калушского ПАА концентрации 0,05%, реологическая характеристика которого соответствует кривой на рис. 8, кривая 3.

В расчетах учитывались адсорбция и частичная десорбция

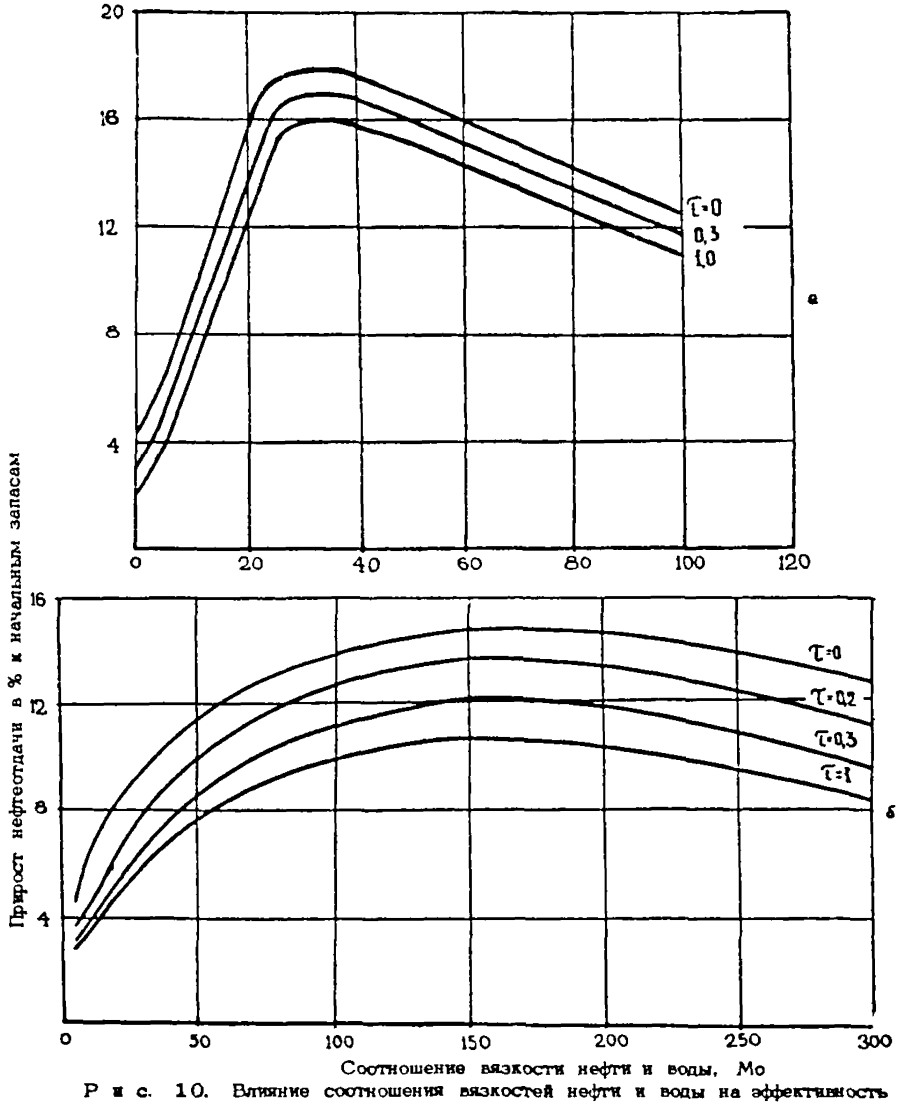
полимера, а также остаточный фактор сопротивления в зоне, охваченной полимером (рис. 9 , кривая 3).

Коэффициент Генри принят равным 0,3. Объем закачиваемой в пласт оторочки раствора полимера варьировал в пределах от 5 до 100% от объема пор пласта, первоначально насыщенного нефтью.

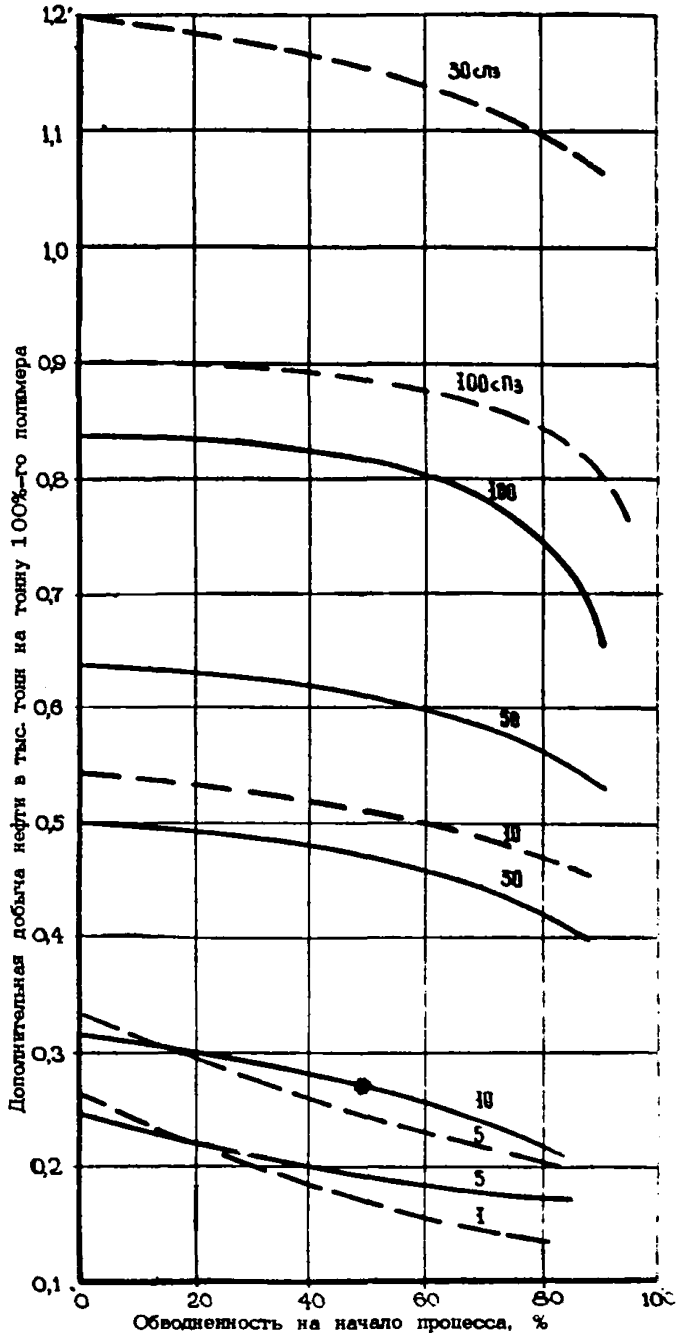
Результаты расчетов представлены на рис. 10-12, из которых видно, что количество дополнительно добытой нефти в значительной степени зависит от следующих параметров месторождения:

- вязкости вытесняемой нефти;
- степени неоднородности пласта / коэффициента вариации проницаемости/;
- обводненности продукции /или относительного объема добытой жидкости - $\mathcal{T}$ /, достигнутой на момент нагнетания полимера в пласт.

7.2. С увеличением вязкости вытесняемой нефти эффективность полимерного заводнения возрастает. В результате закачки загущенной воды в пласт, насыщенный нефтью вязкостью 100 сПз, можно дополнительно добыть в 4-6 раз больше нефти на 1 т полимера, чем при вытеснении этим же раствором нефти вязкостью 1 сПз. Наибольшее увеличение прироста добычи по сравнению с обычным заводнением наблюдается при повышении вязкости нефти от 1 до 30 сПз. При дальнейшем росте вязкости темп увеличения прироста нефтеотдачи падает, а для сильно неоднородных пластов / с коэффициентом вариации проницаемости 0,8-0,9/ при вязкости нефти 30 сПз наблюдается



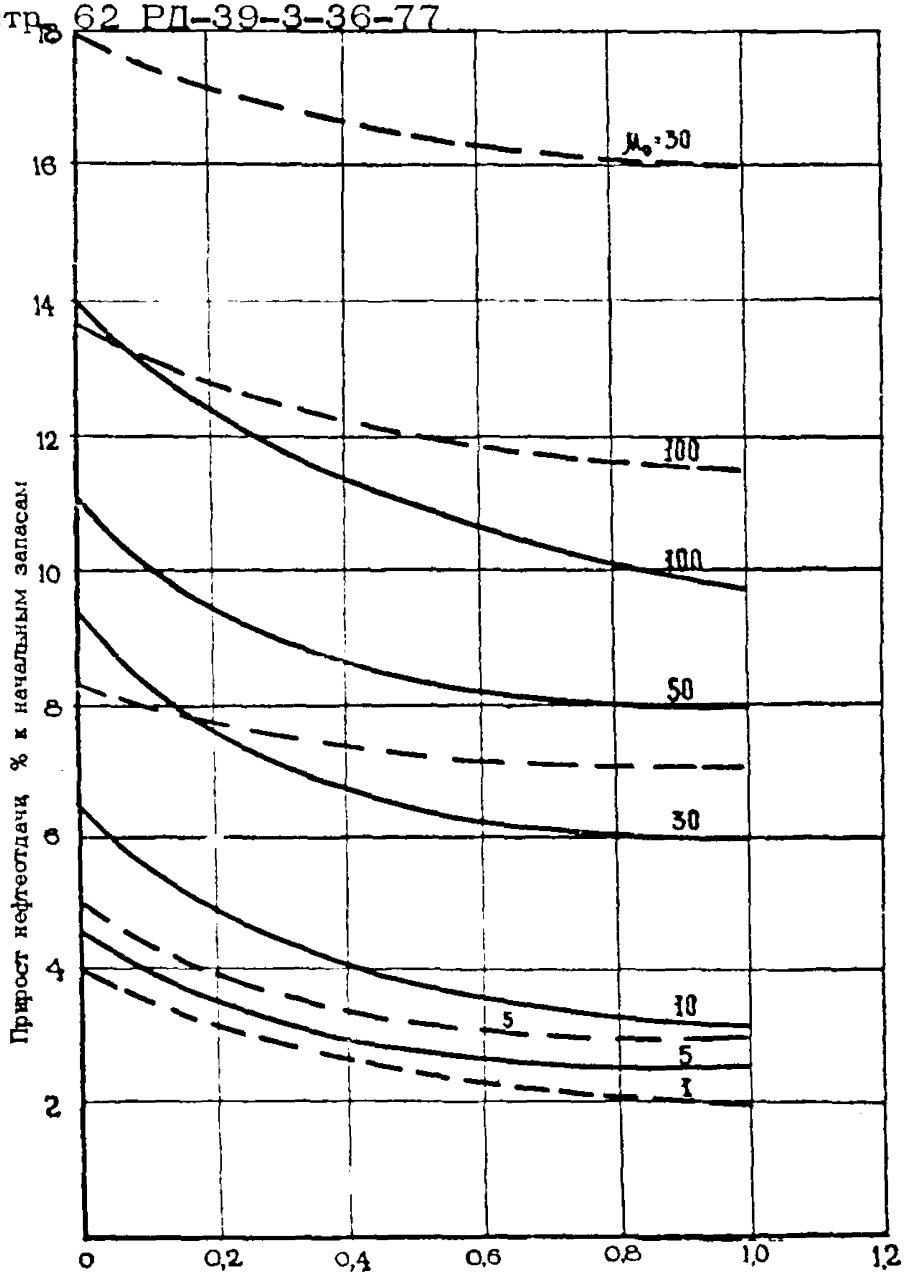
Р и с. 10. Влияние соотношения вязкостей нефти и воды на эффективность полимерного заводнения при различной стадии начала процесса: а, б – коэффициент вариации проницаемости 0, 877 и 0, 535 соответственно



Р и с. 11. Зависимость эффективности полимерного заводнения от стадии начала процесса, вязкости нефти и степени неоднородности пласта.

——— коэффициент вариации проницаемости 0, 535

– – – – коэффициент вариации проницаемости 0. 877



Суммарная добыча жидкости до закачки полимера в пласты (в объеме пор пласта, первоначально насыщенных нефтью)

Р и с. 12. Влияние стадии закачки оторочки раствора ПАА на эффективность процесса при различной вязкости нефти.

———— коэффициент вариации проницаемости 0, 535

– – – – – коэффициент вариации проницаемости 0, 877

максимальный прирост нефтеотдачи. При вытеснении более вязких нефтей оторочкой ПАА из сильно неоднородных пластов эффективность несколько снижается.

7.3. Степень неоднородности пласта оказывает сильное влияние на коэффициент охвата и нефтеотдачу коллекторов. Особенно велико влияние изменения неоднородности пласта на нефтеотдачу при малых вязкостях нефти /меньше 10 сПз/ и высоких значениях коэффициента вариации проницаемости. Закачку раствора полимера следует рассматривать как мероприятие, выравнивающее неоднородность пласта, так как при этом полимер проникает в основном в высокопроницаемые пропластки, снижая их проницаемость. Поэтому применение загущенной воды для сильно неоднородных пластов, насыщенных маловязкой нефтью, может оказаться не менее рентабельным, чем при вытеснении из аналогичных пластов высоковязких нефтей /30 и более сПз/, для которых требуются более концентрированные растворы а это приводит к повышенным расходам полимера.

7.4. Стадия разработки, при которой начато полимерное заводнение, сказывается в большей мере, если процесс осуществляется на пластах с низкой степенью неоднородности и насыщен маловязкой нефтью. Стадия разработки оказывает существенное влияние на сроки разработки залежи, величину безводной нефтеотдачи, а также на эксплуатационные расходы, связанные с подъемом жидкости из пласта, и на деэмульсацию.

7.5. На основании всего вышесказанного и с учетом результатов лабораторных исследований можно реко-

мендовать следующие критерии выбора залежей нефти, пригодных для заводнения с применением полимеров.

7.5.1. Вязкость нефти в пластовых условиях должна находиться в пределах 3-100 сПз. При более низких значениях закачка загущенной воды будет достаточно эффективной только в сильно неоднородных пластах при коэффициенте вариации проницаемости больше 0,8. Применение полимерного заводнения на месторождениях с вязкостью нефти более 50 сПз желательно осуществлять в относительно однородных пластах. В этом случае эффект достигается за счет подавления вязкостной неустойчивости высоковязким вытесняющим агентом.

7.5.2. Залежи могут быть представлены терригенными и карбонатными коллекторами со средней проницаемостью 0,2-1Д. В карбонатных коллекторах эффективность процесса ниже, чем в песчаниках, в связи с более высокой адсорбцией полимера и наличием в них, как правило, достаточно разветвленной системы трещин. Однако в слаботрещиноватых известняках может быть достигнута высокая степень использования геологических запасов.

Нижний предел проницаемости устанавливается из соображений сохранения темпов отбора жидкости в период закачки оторочки полимера. При очень низкой проницаемости коллектора могут возникнуть осложнения с нагнетанием высоковязкого раствора. В этом случае более целесообразно применять полимер с низким молекулярным весом / МВ=1-2 млн./, Верхний предел проницаемости предопределяется особенностью фильтрации растворов ПАА в пори-

стой среде. Выше были приведены данные влияния проницаемости пористой среды на фильтрационные и реологические свойства растворов ПАА. Отмечалось, что с ростом проницаемости подвижность раствора возрастает при прочих равных условиях. В связи с этим применение полимеров в пластах с высокой средней проницаемостью может привести к повышенному расходу полимера и к некоторому снижению экономических показателей процесса.

7.5.3. Разработка месторождения должна осуществляться путем внутриконтурного заводнения. С целью более рационального использования оторочки полимера и поддержания выского уровня отбора жидкости в период ее закачки рекомендуются высокоактивные площадные или однорядные системы разработки. В случае применения малоактивных многорядных систем не исключена потеря полимера в результате отбора его первым рядом скважин, что приводит к снижению охвата пласта процессом за пределом первого ряда.

7.5.4. Для приготовления раствора полимера полиэлектролитного типа /например, ПААГ/ рекомендуется использовать слабоминерализованную воду, поэтому в период закачки оторочки загущенной воды необходимо иметь источник пресной воды. Последующее вытеснение можно осуществлять и пластовой сточной водой. Однако в этом случае остаточный фактор сопротивления окажется значительно ниже, чем при вытеснении оторочки полимера пресной водой.

7.5.5. Применять полимерное заводнение желатель-

но с начала разработки залежи нефти. При этом достигается более высокая безводная и конечная нефтеотдача. Рентабельность метода резко возрастает.

7.5.6. Глубина залегания залежи и мощность продуктивной части пласта не лимитируются.

7.5.7. Температура пласта не должна превышать $100^{\circ}C$. При более высокой температуре эффективность снижается в результате падения вязкости полимерного раствора и деструкции макромолекул.

Таковы условия наиболее эффективного применения полимеров при заводнении нефтяных пластов.

7.6. Однако область рентабельного применения метода значительно шире.

7.6.1. Вязкость нефти в пластовых условиях может находиться в пределах от 0,1 до 400 сПз.

7.6.2. Коллектор может быть сложен не только, песчаником, но и слаботрещиноватым известняком, доломитом со средней проницаемостью от 0,1 - 4Д.

7.6.3. Водонефтяное отношение, при котором начинается закачка оторочки полимера, может находиться в пределах 10-30.

8. МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЦЕССА ВЫТЕСНЕНИЯ НЕФТИ ОТОРОЧКОЙ РАСТВОРА ПОЛИМЕРА

8.1. Методики института "Гипровостокнефть".

Рассматриваются две возможные формы фильтрационного потока: течение жидкостей в элементах пяти - и семиточечных площадных систем заводнения;

линейное течение жидкости.

В расчетной схеме неоднородный по проницаемости пласт представляется набором несообщающихся трубок тока с различной проницаемостью; принимается поршневой характер вытеснения нефти; учитывается адсорбция полимера в процессе фильтрации раствора в пористой среде; при последующем вытеснении полимера водой происходит частичная его десорбция; растворы полимеров рассматриваются как неньютоновские жидкости, поэтому расчеты осуществляются с учетом реологических свойств, проявляющихся при течении в пористой среде; учитывается остаточный фактор сопротивления и неньютоновский характер течения воды после раствора полимера; не учитываются упругие свойства системы, влияние давления на вязкость жидкостей, гравитационные, капиллярные и диффузионные процессы

Задача решается для трех возможных этапов полимерного заводнения:

- вытеснение нефти водой до заданных объемов прокачанной жидкости или до заданной доли нефти в продукции;

- закачка оторочки раствора полимера любого размера на любой стадии заводнения;

- вытеснение оторочки полимера водой до заданной предельной обводненности.

Задача решена для условий $Q = Const$ или $\Delta p = Const$.

8.2. Методика расчета показателей полимерного заводнения площадных систем основана на некоторой схематизации реальной формы фильтрационного потока, для чего в элементе площадного заводнения выделяется система трубок тока, каждая из которых в свою очередь делится на N прослоев, различающихся по проницаемости. Истинные трубки тока сложного фильтрационного потока заменяются двумя плоско-радиальными жесткими трубками, соединенными последовательно (рис. 13). Ввиду симметричности фильтрационного потока рассматривается один из повторяющихся элементов площадной системы.

8.2.1. Средний радиус каждой плоско-радиальной схематизированной трубки определяется:

$$R1_j = R1 \cdot \cos\left[\varphi 1/M \cdot \left(\gamma - \frac{1}{2}\right)\right]; \quad R2_j = R2/\cos\left[\frac{\varphi 2}{M} \cdot \left(\gamma - \frac{1}{2}\right)\right].$$

8.2.2. Реологическая характеристика растворов полимеров представляется следующим уравнением:

$$\lambda 1 = A1\upsilon^2 + B1\upsilon + C1(K,C). \qquad (8.1)$$

Предполагается, что реологическая кривая описывается данным уравнением, когда скорость фильтрации не

Р и с. 13. Схема элементов площадных систем с разбивкой на трубки:

1 – 5-точечная

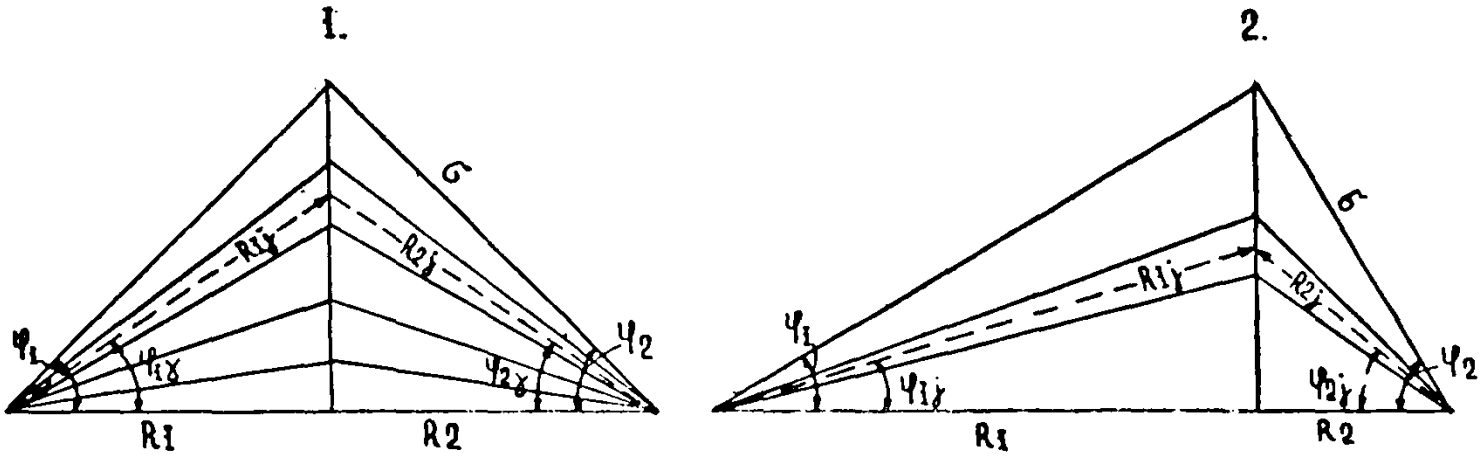
$R_1 = R_2$

$\varphi_1 = \varphi_2 = 45^\circ$

2 – 7-точечная

$\varphi_1 = 30^\circ$

$\varphi_2 = 60^\circ$



превосходит некоторого критического значения и находится в диапазоне от 0 до $U_{кр.}$ При $U > U_{кр}$ фактор сопротивления зависит только от проницаемости пористой среды и концентрации полимера в растворе.

Аналогичным уравнением выражается и реологическая кривая для воды, фильтрующейся после полимера, с соответствующими коэффициентами А2, В2, С2.

8.2.3. Начальный дебит j -й трубки тока определяется исходя из ее объема и времени обводнения. Время перемещения фронта в схематизированной трубке принимается равным времени перемещения фронта вытеснения "разноцветных" жидкостей в соответствующей трубке реального пласта, которое в свою очередь определяется с помощью карт фильтрационных потоков, полученных на электроинтеграторе.

Начальный дебит по трубкам тока в различных прослоях определяется по формуле:

$$\bar{q}^{0}_{ji} = z_j \cdot \bar{K}_i \Big/ \sum_{i=1}^{N} \bar{K}_i \cdot \qquad (8.2)$$

8.2.4. Дебиты по трубкам тока в прослоях на каждом временном шаге рассчитываются по формуле:

$$\bar{q}^{n}_{ji} = \frac{\bar{K}_i}{G^{n}_{ji}} \cdot \frac{1}{\sum_{j=1}^{M} \sum_{i=1}^{N} \bar{K}_i / G^{n}_{ji}} \cdot \qquad (8.3)$$

Для условий заданного постоянного перепада давлений между забоями нагнетательной и эксплуатационной скважин относительный дебит элемента площадной сисмемы на каждом временном шаге определяется из уравнения

$$\bar{q}^{n}_{*} = \frac{\mu_0 \bar{K}_i}{G^{0}} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} \frac{\bar{K}_i}{G^{n}_{ji}} \cdot \qquad (8.4)$$

8.2.5. Положение фронтов закачиваемых жидкостей определяется в общем случае по следующим уравнениям:

$$\overline{R1}^{n}_{\Phi_{ji}} = \sqrt{\left(\overline{R1}^{n-1}_{\Phi_{ji}}\right)^2 + \overline{q}^{n}_{ji}\,\Delta\tau\,\cos\varphi 1_j^2\left(D1 - D3 \cdot D4\right)} \quad (8.5.)$$

при вытеснении нефти водой Д4 = 0.

Если $\overline{R1}^{n}_{\Phi_{ji}} < 1$, то $\overline{R2}^{n}_{\Phi_{ji}} = 1$, $\overline{R2}^{n}_{3в_{ji}} = 1$, $\overline{R2}^{n}_{б_{ji}} = 1$.

$$\overline{R1}^{n}_{3в_{ji}} = \sqrt{\left(\overline{R1}^{n-1}_{3в_{ji}}\right)^2 + \overline{q}^{n}_{ji}\,\Delta\tau\,\cos\varphi 1_j^2\,D5} \quad (8.6.)$$

$$\overline{R1}^{n}_{б_{ji}} = \sqrt{\left(\overline{R1}^{n-1}_{б_{ji}}\right)^2 + \overline{q}^{n}_{ji}\,\Delta\tau\,\cos\varphi 1_j^2\,D6} \quad (8.7)$$

Если $\overline{R1}^{n}_{\Phi_{ji}} > 1$ и $\overline{R1}^{n}_{3б_{ji}} < 1$, то $\overline{R1}^{n}_{\Phi_{ji}} = 1$;

$\overline{R2}^{n}_{3в} = 1$; $\overline{R2}^{n}_{б_{ji}} = 1$.

$$\overline{R2}^{n}_{\Phi_{ji}} = \sqrt{\left(\overline{R2}^{n-1}_{\Phi_{ji}}\right)^2 - \overline{q}^{n}_{ji}\,\Delta\tau\,\cos\varphi 2_j^2\left(D2 - D3 \cdot D8\right)} \quad (8.8.)$$

Если $\overline{R1}_{3в_{ji}} \geq 1$ и $\overline{R1}^{n}_{б_{ji}} < 1$, то $R1_{3в_{ji}} = 1$ и

$R2_{б_{ji}} = 1$.

$$\overline{R2}^{n}_{\Phi_{ji}} = \sqrt{\left(\overline{R2}^{n-1}_{\Phi_{ji}}\right)^2 - \overline{q}^{n}_{ji}\,\Delta\tau\,\cos\varphi 2_j^2\left(D2 - D4D5\right)} \quad (8.9.)$$

$$\overline{R2}^{n}_{3в_{ji}} = \sqrt{\left(\overline{R2}^{n-1}_{3в_{ji}}\right)^2 - \overline{q}^{n}_{ji}\,\Delta\tau\,\cos\varphi 2_j^2\,D5} \quad . \quad (8.10.)$$

Если $\overline{R1}^{n}_{вji} > 1$, то $\overline{R1}^{n}_{вji} = 1$.

$$\overline{R2}^{n}_{вji} = \sqrt{\left(\overline{R2}^{n-1}_{вji}\right)^2 - \overline{q}^{n}_{ji} \cdot \Delta\tau \cos\varphi 2^2_j D7}. \quad (8.11.)$$

Если в процессе счета $\overline{R1}^{n}_{вji} \geqslant \overline{R1}^{n}_{зв\,ji}$ (или $\overline{R2}^{n}_{вji} \leqslant \overline{R2}^{n}_{зв\,ji}$), то принимается $\overline{R1}^{n}_{вji} = \overline{R1}^{n}_{зв\,ji}$ (или $\overline{R2}^{n}_{вji} = \overline{R2}^{n}_{зв\,ji}$). Это условие исчезновения оторочки полимера и в последующих расчетах $\overline{R1}_{зв\,ji}$ или $\overline{R2}_{зв\,ji}$ сохраняет свои значения.

Если $\overline{R2}^{n}_{ф\,ji} \leqslant \overline{R1}_c \cos\varphi 2_j$, то $\overline{R2}^{n}_{ф\,ji} = \overline{R1}_c \cos\varphi 2_j$ и j-я трубка тока i-го прослоя дает воду.

$$\overline{R1}^{n}_{н\,ji} = F1\,\overline{q}^{n}_{ji} \cdot q^{n}_{*} \cdot \cos\varphi 1_j\,; \quad (8.12.)$$

$$\overline{R2}^{n}_{н\,ji} = F2\,\overline{q}^{n}_{ji} \cdot q^{n}_{*} \cdot \cos\varphi 2_j\,. \quad (8.13.)$$

8.2.6. Расчет сопротивлений производится по следующим уравнениям:

$$G^{n}_{ji} = \Big[G1^{n}_{вji} + G2^{n}_{вji} + G1^{n}_{зв\,ji} + G2^{n}_{зв\,ji} + \ln\frac{\overline{R1}_{ф\,ji}}{\overline{R1}_{зв\,ji}} + \ln\frac{\overline{R2}_{зв\,ji}}{\overline{R2}_{ф\,ji}} + t_j \mu_0 \overline{K}_в \left(\ln\frac{1}{\overline{R1}_{ф\,ji}} + \ln\frac{\overline{R2}_{ф\,ji}}{\overline{R1}_c}\frac{1}{\cos\varphi 2_j}\right)\Big]. \quad (8.14.)$$

Если $\overline{R1}^{n}_{н\,ji} < \overline{R1}^{n}_{вji} < \overline{R1}^{n}_{зв\,ji}$,

то $$G1_{вji} = A2E1^2 q^2_{ji} \frac{\cos\varphi 1^2_j}{2}\left(\frac{1}{\overline{R1}^2_{н\,ji}} - \frac{1}{\overline{R1}^2_{вji}}\right) + B2E1 q_{ji} \cos\varphi 1_j \times$$

$$\times\left(\frac{1}{\overline{R1}_{н\,ji}} - \frac{1}{\overline{R1}_{вji}}\right) + C2_i \ln\frac{\overline{R1}_{вji}}{\overline{R1}_{н\,ji}} + \theta 2_i \ln\frac{\overline{R1}_{н\,ji}}{\overline{R1}_c \cos\varphi 1_j}, \quad (8.15)$$

при $\overline{R1}_{нji} > \overline{R1}_{вji}$ величина $\overline{R1}_{нji} = \overline{R1}_{вji}$.

Если $\overline{R1}^{n}_{вji} < \overline{R1}^{n}_{нji} < \overline{R1}^{n}_{звji}$,

то $$G1^{n}_{звji} = A1E1q^{2}_{ji}\frac{\cos\varphi 1^{2}_{j}}{2}\left(\frac{1}{\overline{R1}^{2}_{нji}} - \frac{1}{\overline{R1}^{2}_{звji}}\right) + B1E1q_{ji} \times$$

$$\times \cos\varphi 1_{j}\left(\frac{1}{\overline{R1}_{нji}} - \frac{1}{\overline{R1}_{звji}}\right) + C1_{i}\ln\frac{\overline{R1}_{звji}}{\overline{R1}_{нji}} + \Theta 1\ln\frac{\overline{R1}_{нji}}{\overline{R1}_{вji}} \quad (8.16)$$

при $\overline{R1}^{n}_{звji} < \overline{R1}^{n}_{нji}$ величина $\overline{R1}^{n}_{нji} = \overline{R1}^{n}_{звji}$,

при $\overline{R1}^{n}_{нji} < \overline{R1}^{n}_{вji}$ величина $\overline{R1}^{n}_{нji} = \overline{R1}^{n}_{вji}$

$$G2^{n}_{вji} = A2E2^{2}q^{2}_{ji}\frac{\cos\varphi 2^{2}_{j}}{2}\left(\frac{1}{\overline{R2}^{2}_{нji}} - 1\right) + B2E2q_{ji}\cos\varphi 2_{j} \times$$

$$\times \left(\frac{1}{\overline{R2}_{нji}} - 1\right) + C2_{i}\ln\frac{1}{\overline{R2}_{нji}} + \Theta 2_{i}\ln\frac{\overline{R2}_{нji}}{\overline{R2}_{вji}}; \quad (8.17)$$

при $\overline{R2}^{n}_{вji} > \overline{R2}^{n}_{нji}$ величина $\overline{R2}^{n}_{нji} = \overline{R2}^{n}_{вji}$.

$$G2^{n}_{звji} = A1E2^{2}q^{2}_{ji}\frac{\cos\varphi 2^{2}_{j}}{2}\left(\frac{1}{\overline{R2}^{2}_{нji}} - \frac{1}{\overline{R2}^{2}_{вji}}\right) + B1E2q_{ji} \times$$

$$\times \cos\varphi 2_{j}\left(\frac{1}{\overline{R2}_{нji}} - \frac{1}{\overline{R2}_{вji}}\right) + C1_{i}\ln\frac{\overline{R2}_{вji}}{\overline{R2}_{нji}} + \Theta 1\ln\frac{\overline{R2}_{нji}}{\overline{R2}_{звji}} \quad (8.18)$$

при $\overline{R2}^{n}_{звji} > \overline{R2}^{n}_{нji}$ величина $\overline{R2}^{n}_{нji} = \overline{R2}^{n}_{звji}$,

при $\overline{R2}^{n}_{вji} < \overline{R2}^{n}_{нji}$ величина $\overline{R2}^{n}_{нji} = \overline{R2}^{n}_{вji}$.

8.2.7. Расчет основных показателей процесса.

Относительный накопленный отбор жидкости на n-м временном шаге:

для $Q = const$ $$\tau = n\Delta\tau, \quad (8.19)$$

$\Delta P = const$ $$\tau = \sum_{1}^{n}\bar{q}^{n}_{*}\Delta\tau. \quad (8.20)$$

Доля нефти в продукции элемента:

$$f_н = \sum_{j=1}^{M} \sum_{i=1}^{y} \bar{q}_{нji}^{n} \qquad (8.21)$$

Нефтеотдача (охват процессом заводнения)

для $Q = const$ $\quad \eta = \eta^{n-1} + \Delta\tau f_н^n$, (8.22.)

" $\Delta P = const$ $\quad \eta = \eta^{n-1} + \Delta\tau f_н^n q_ж^n$. (8.23.)

Перепад давления, отнесенный к начальному ΔP_1^0 для условий $Q = const$

$$\Delta\bar{P}^n = \frac{1}{\mu_0 \bar{K}_в \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} \bar{K}_i / G_{ji}^n} G^0. \qquad (8.24.)$$

Дебит элемента, отнесенный к начальному, при

$\Delta P = const$

$$\bar{q}_ж^n = \frac{\mu_0 \bar{K}_в}{G^0} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} \bar{K}_i / G_{ji}^n. \qquad (8.25.)$$

Расчет повторяется на каждом временном шаге. Для повышения точности запрограммировано на каждом временном шаге осреднение. Разработанный алгоритм запрограммирован и реализован на ЭВМ "Минск - 32".

8.3. Аналогичный подход был сделан и для условий линейного течения жидкостей.

Последовательность расчета и основные расчетные уравнения следующие:

8.3.1. Дебит прослоев на каждом временном шаге

$$\bar{q}_i^n = \frac{\bar{K}_i}{G_i^n} \cdot \frac{1}{\sum \bar{K}_i / G_i^n}. \qquad (8.26.)$$

8.3.2. Положение фронтов жидкостей

$$\bar{L}_{в_i}^{n} = \bar{L}_{в_i}^{n-1} + \bar{q}_i^{n} \Delta\tau \cdot D3; \qquad (8.27)$$

$$\bar{L}_{зв_i}^{n} = \bar{L}_{зв_i}^{n-1} + \bar{q}_i^{n} \Delta\tau\, D2; \qquad (8.28)$$

$$\bar{L}_{ф_i}^{n} = \bar{L}_{ф}^{n-1} + \bar{q}_i^{n} \Delta\tau \left(D1 - D2 \cdot D4\right). \qquad (8.29)$$

8.3.3. Фильтрационные сопротивления в общем виде

$$G_i^{n} = \left[\lambda 2\left(\bar{q}_i^{n}\right) L_{в_i}^{n} + \lambda 1\left(\bar{q}_i^{n}\right)\left(\bar{L}_{зв_i}^{n} - \bar{L}_{в_i}^{n}\right) + \left(\bar{L}_{ф_i}^{n} - \bar{L}_{зв_i}^{n}\right) + \right.$$
$$\left. + \mu_0 \bar{H}_в \left(1 - \bar{L}_{ф_i}^{n}\right)\right] \qquad (8.30)$$

8.3.4. Расчет основных показателей производится по тем же уравнениям, что и для площадных систем.

ОБОЗНАЧЕНИЯ:

для 5-точечной системы

$D1 = D2 = \frac{8NM}{\pi \beta_в}$;

$D3 = \frac{8NM}{\pi\left[\beta_в (a_1 - 1) + \beta_n\right]}$;

$D4 = \frac{\beta_n - \beta_в}{\beta_в}$; $D5 = D3$;

$D6 = \frac{8NM}{\pi \beta_n a_2}$; $D7 = D6$;

$D8 = D4$;

для 7-точечной системы

$D1 = \frac{12NM}{\pi \beta_в} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{9}$; $D2 = 9D1$;

$D3 = \frac{12NM}{\pi\left[\beta_в (a_1 - 1) + \beta_n\right]} \frac{2\sqrt{3}}{9}$;

$D4 = \frac{\beta_n - \beta_в}{\beta_в}$; $D5 = 9D3$;

$D6 = \frac{12NM}{\pi \beta_n a_2} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{9}$; $D7 = 9D6$;

$D8 = 9D4$;

$$E1=E2=\frac{4\sqrt{2}\,NM}{\pi\,Hm\,G}\;;\qquad K1=\frac{4NM}{\pi Hm G}\;;\quad E2=\frac{12NM}{\pi\,Hm\,G}\;;$$

$$F1=F2=E1/\upsilon_{кр}\;;\qquad F1=E1/\upsilon_{кр};\ F2=E2/\upsilon_{кр};$$

$$G^{o}=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M}\frac{\overline{K}_i}{2\ln\frac{1}{\overline{R}_c\cos\varphi_j}}\;;\qquad G^{o}=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M}\frac{\overline{K}_i}{\ln\frac{1}{\overline{R1}_c\cos\varphi1_j}+\ln\frac{1}{R2_c\cos\varphi2_j}};$$

$$Z_j=\frac{\frac{1}{t_j\cos\varphi_j^2}}{\sum_{j=1}^{M}\frac{1}{t_j\cos\varphi_j^2}}\;;\qquad Z_j=\frac{\frac{0}{\cos\varphi1_j^2}+\frac{1}{\cos\varphi2_j^2}}{\sum_{j=1}^{M}\frac{1}{t_j}\left(\frac{0}{\cos\varphi1_j^2}+\frac{1}{\cos\varphi2_j^2}\right)}$$

для линейной системы

$$D1=\frac{N}{\beta_в}\;;\qquad D2=\frac{N}{\beta_в(a_2-1)+\beta_n}\;;\qquad D3=\frac{N}{a_2\beta_n}\;;\qquad D4=\frac{\beta_n-\beta_в}{\beta_в}\;;$$

$$C1_i=a_1e^{\beta_1\overline{K}_iK_{ср}+\gamma_{11}};\ C2_i=a_2e^{\beta_2\overline{K}_iK_{ср}+\gamma_{21}};\ \Theta1_i=a_{11}e^{\beta_{11}\overline{K}_iK_{ср}+\gamma_{11}};$$

$$\Theta2_i=a_{22}e^{\beta_{22}K_iK_{ср}+\gamma_{22}};\quad a_1=\frac{\Gamma_1}{m}+1;\quad a_2=\frac{\Gamma_2}{m}+1;$$

$A1,B1,C1$ – коэффициенты уравнений реологических кривых, получаемых при фильтрации полимеров;

$A2,B2,C2$ – то же, для воды, фильтрующейся после полимера;

Γ_1,Γ_2 – коэффициенты Генри из изотерм адсорб-

ции и десорбции;

G^{o} – начальное сопротивление в элементе;

G^{n}_{ji} – суммарное сопротивление в j-й трубке тока, i-го прослоя на n-м временном шаге;

$G1_{зв_{ji}}, G2_{зв_{ji}}$ – сопротивление в зоне фильтрации загущенной воды соответственно в I и II секторах;

$G1_{в_{ji}}, G2_{в_{ji}}$ – то же, в зоне фильтрации воды, закачиваемой после полимера;

H – средняя мощность пласта;

$\bar{L}_{ф_i}, \bar{L}_{зв_i}, \bar{L}_{в_i}$ – положение фронтов воды и воды, фильтрующейся после полимера по трубкам тока линейной системы;

M – число трубок тока в элементе системы;

N – число прослоев различной проницаемости;

ΔP – перепад давлений между забоями нагнетательной и эксплуатационной скважин;

$Q_ж$ – дебит жидкости элемента (приемистость нагнетательной скважины);

$R1, R2$ – радиусы главных линий тока;

$R1_j, R2_j$ – средний радиус сочлененных плоскорадиальных трубок тока в I и II секторах;

$\overline{R1}_{ф_{ji}}, \overline{R2}_{ф_{ji}}$ – относительное положение фронтов воды и j-й трубки тока, i-го прослоя;

$\overline{R1}_{зв_{ji}}, \overline{R2}_{зв_{ji}}$ – соответственно для фронтов загущен-

ной воды;

$\overline{R1}_{в_{ji}}, \overline{R2}_{в_{ji}}$ – соответственно для фронтов воды, закачиваемой после полимера;

$\overline{R1}_{н_{ji}}, \overline{R2}_{н_{ji}}$ – положение границы, отделяющей область скоростей выше $U_{кр}$;

$\overline{R1}_c, \overline{R2}_c$ – радиус скважин, отнесенный к радиусу главной линии тока, в I и II секторах;

a_1 – степень отставания фронта загущенной воды от фронта закачиваемого раствора в результате адсорбции;

a_2 – то же, для фронта воды, закачиваемой после полимера, в результате десорбции;

$f_н$ – доля нефти в продукции;

i – порядковый номер прослоя, $i = 1,2...N$;

j – порядковый номер трубки тока, начиная от главной, $j = 1,2...M$;

$K_{ср}$ – средняя проницаемость;

$\overline{K}_в$ – относительная проницаемость по воде при остаточной нефтенасыщенности;

$\overline{K}_i$ – проницаемость i-го прослоя, отнесенная к средней;

m – пористость;

n – номер временного шага;

$\overline{q}^n_{ji}$ – относительный дебит j-й трубки тока, i-го прослоя на n-м временном шаге;

$\overline{q}^n_{ji}$ – то же, для начального момента времени;

$\bar{q}_{ж}^{n}$ – дебит элемента на n-м временном шаге, отнесенный к начальному, для условий $\Delta P = const$;

t_j – время перемещения фронта вытеснения "разноцветных" жидкостей в j-й трубке тока реального пласта, отнесенное к этой же величине для главной линии тока;

v – истинная скорость течения жидкости;

x – номер трубки тока, начиная с которого во всех последующих в скважину поступает нефть;

$\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$
$\alpha_2, \beta_2, \gamma_2$
$\alpha_{11}, \beta_{11}, \gamma_{11}$
$\alpha_{22}, \beta_{22}, \gamma_{22}$ – коэффициенты реологических кривых;

$\Theta 1_i, \Theta 2_i$ – то же, зависящие от проницаемости;

$\beta_в, \beta_п$ – коэффициенты вытеснения нефти водой и раствором полимера;

η – нефтеотдача;

$\lambda 1$ – отношение подвижностей воды и раствора полимера (фактор сопротивления);

$\lambda 2$ – отношение подвижности воды до и после полимера (остаточный фактор сопротивления);

$\frac{\mu_н}{\mu_в}$ – отношение вязкостей нефти и воды;

δ – полурасстояние между эксплуатационными скважинами;

τ – отношение объема прокачанной жидкости к объему пор, первоначально насыщенных нефтью (или к активным запасам);

$\Delta\tau$ – относительный шаг времени;

φ_1, φ_2 – углы в выделенном элементе площадной системы (рис. 13).

8.4. МЕТОДИКА ВНИИ

Для определения технологических показателей процесса разработки нефтяных месторождений с применением водных растворов полимеров используются уравнения одномерной фильтрации двухфазной несжимаемой жидкости с добавлением уравнения сохранения для полимера и учетом кинетики сорбционного процесса.

Рассмотрен нелинейный закон фильтрации.

Приняты следующие условия и допущения: фильтрация изотермична ; жидкости и порода несжимаемы; влияние капиллярных, гравитационных сил и диффузия не учитываются. Процесс адсорбции предполагается равновесным. Связь адсорбции с концентрацией задана изотермой Генри. Неньютоновский характер течения раствора полимера (а также воды, следующей за оторочкой) учитывается путем введения зависимости коэффициента подвижности от градиента давления. Пласт предполагается слоисто-неоднородным, составленным из пропластков различной мощности и проницаемости. Перетоки между слоями отсутствуют.

З а д а н ы:

8.4.1. Система уравнений неразрывности для раствора (воды), нефти и полимера.

$$
\begin{aligned}
&m dh_i \frac{\partial S_1}{\partial t} + \frac{\partial U_{1i}}{\partial x} + \sum_{G=1}^{N_G} q_{1i}^G \delta(x - x_G) = 0;\\
&m dh_i \frac{\partial S_2}{\partial t} + \frac{\partial U_{2i}}{\partial x} + \sum_{G=1}^{N_G} q_{2i}^G \delta(x - x_G) = 0;\\
&m dh_i \left(\frac{\partial S_1 C}{\partial t} + \frac{1}{m}\frac{\partial a}{\partial t}\right) + \frac{\partial U_{1i} C}{\partial x} + \sum_{G=1}^{N_G} q_{1i}^G C \delta(x - x_G) = 0,\\
&a = \Gamma S C, \qquad S_1 + S_2 = 1.
\end{aligned}
\tag{8.31}
$$

8.4.2. Закон движения фаз:

$$
\left.
\begin{aligned}
U_{1i} &= -\frac{K_i}{\mu_1}\varphi_1\left(\frac{\partial P}{\partial x}, C\right) f_1(S_1)\frac{\partial P}{\partial x} dh_i;\\
U_{2i} &= -\frac{K_i}{\mu_2}\varphi_2\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right) f_2(S_1, C)\frac{\partial P}{\partial x} dh_i.
\end{aligned}
\right\}
\tag{8.32}
$$

8.4.3. Принимается линейная зависимость между фактором сопротивления и концентрацией в зоне раствора полимера.

8.4.4. Функция φ_1 в различных зонах имеет вид:

$$
\varphi_1\left(\frac{\partial P}{\partial x}, C\right) = \begin{cases} 1 & \text{перед отворочкой}\\ \left[CR\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)\right]^{-1} & \text{в зоне отворочки}\\ \left[R\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)\right]^{-1} & \text{за отворочкой} \end{cases}
\tag{8.33}
$$

8.4.5. Дебит жидкости ряда с номером G

$$
q_i^G = q_{1i}^G + q_{2i}^G = \pm\frac{K_i}{\mu_1}\left[\varphi_1 f_1 + \varphi_2 f_2 \frac{\mu_1}{\mu_2}\right]_{x=x_G} 2\pi h_i \frac{P_3^G - P_2^G}{\ln\frac{\delta_G}{r_c^G}}\frac{d}{2\delta_G}
\tag{8.34}
$$

Соотношения (8.34) получены из рассмотрения радиального квазистационарного течения в области скважины. Предполагается, что для больших скоростей течения, имеющих место в области скважины, справедлив закон фильтрации с предельным значением коэффициента подвижности.

Для условий закачки оторочки раствора полимера, закачиваемого в необводненный пласт, задана следующая система начальных и граничных условий:

$$S_1(x,0)=S_1^* \quad C(x,0)=0 \qquad P(x,0)=P_k$$

$$S_1(0,t)=S_1^0 \quad C(0,t)=\begin{cases} C^0 \text{ если } Q\le Q^0 & P(0,t)=P_3^0 \\ 0 \text{ если } Q>Q^0 & P(x_G,t)=P_3^G \end{cases}$$

$$(1\le G\le N_G) \qquad (8.35)$$

Для случая задания постоянной скорости закачки и всевозможных вариантов нагнетания оторочки (закачка в пласт раствора полимера после нагнетания определенного объема воды или начиная с некоторого значения обводненности продукции и т.д.) условия могут быть изменены соответствующим образом.

Переход к безразмерным переменным производится согласно формулам:

$$\overline{X}=X/L, \qquad \overline{t}=t/t_0, \qquad \overline{P}=P/P_0;$$

$$K_i = K_i / K_0 , \qquad \mu_0 = \mu_1 / \mu_2 , \quad H_i = K_i h_i \Big/ \sum_{i=1}^{N_1} h_i$$

$$\left(t_0 = \frac{m \mu_1 L^2}{K_0 P_0} , \quad K_0 = \max K_i , \quad 1 \le i \le N_1 \right)$$

Уравнения (8.31) – (8.35) решаются совместно для всех слоев. К решению уравнений применена конечно-разностная схема "Уголок", позволяющая определять распределение водонасыщенности и концентрации на $n+1$ временном слое в момент времени T. Давление на $n+1$ слое определяется из уравнения (8.31), (8.32)

$$-K_i \frac{\partial}{\partial x}\left\{\left[\varphi_1\left(\frac{\partial P}{\partial x}, C\right) f_1(S_1) + \mu_0 \varphi_2\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right) \cdot f_2(S_1, C)\right]\frac{\partial P}{\partial x}\right\} + \sum_{G=1}^{N_G} q_i^G \delta(x - x_G) = 0 \qquad (8.36)$$

методом "прогонки" с последовательными итерациями.

8.4.6. Порядок проведения расчетов. Показатели по i-му прослою:

Скорость фильтрации жидкости в i-м прослое на участках x_{G-1}, x_G :

$$u_i^{n+1}\Big|_{x=x_G} = -\varkappa_i \left[\left(\varphi_1^{n+1} \cdot f_1^{n+1} + \mu_0 \varphi_2^{n+1} \cdot f_2^{n+1}\right)\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)^{n+1}\right]_{x=x_G}^{-}$$

Дебит жидкости в G-й галерее:

$$q_i^{n+1}\Big|_{x=x_G} = u_i^{n+1}\Big|_{x=x_G} - u_i^{n+1}\Big|_{x=x_{G+1}}$$

Дебит нефти в G-й галерее:

$$q_i^{n+1}\Big|_{x=x_G} = \varkappa_i \mu_0 \left\{\left[\varphi_2 \cdot f_2^{n+1}\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)^{n+1}\right]_{x=x_G}^{-} - \left[\varphi_2 f_2^{n+1}\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)^{n+1}\right]_{x=x_G}^{+}\right\},$$

здесь знак " – " соответствует параметрам слева от точки x_G , знак " + " – параметрам справа.

Накопленный отбор жидкости в G-й галерее:

$$Q_j^{n+1}\Big|_{x=x_G} = \sum_{i=0}^{n+1} q_j^i\Big|_{x=x_G}\,\tau^i.$$

Накопленный отбор нефти:

$$Q_{Hj}^{n+1}\Big|_{x+x_G} = \sum_{i=0}^{n+1} q_{Hj}^i\Big|_{x=x_G}\,\tau^i.$$

Объем закачки в j-м прослое:

$$Q_{3j}^{n+1} = \sum_{i=0}^{n+1} U_j^i\Big|_{x=0}\,\tau^i.$$

8.4.7. Показатели процесса по галереям и пропласткам:

Суммарный дебит жидкости в момент времени T:

$$q^{n+1} = \sum_{G=1}^{N_G}\cdot\sum_{j=1}^{N_j} q_j^{n+1}\Big|_{x=x_G}.$$

Суммарный дебит нефти:

$$q_H^{n+1} = \sum_{G=1}^{N_G}\sum_{j=1}^{N_j}\cdot q_{Hj}^{n+1}\Big|_{x=x_G}.$$

Объем закачки:

$$Q_3^{n+1} = \sum_{j=1}^{N_j} Q_{3j}^{n+1}.$$

Объем добытой нефти:

$$Q_H^{n+1} = \sum_{G=1}^{N_G}\sum_{j=1}^{N_j} Q_{Hj}^{n+1}\Big|_{x=x_G}.$$

Нефтеотдача на момент времени T:

$$\eta^{n+1} = \frac{Q_H^{n+1}}{Q_3\,(1-S_1^*)}.$$

ОБОЗНАЧЕНИЯ

S_1 – водонасыщенность;

C – концентрация полимера;

p – давление;

a – адсорбция;

Γ – коэффициент Генри;

U_{1j}, U_{2j} – расходы фаз в j-м прослое;

μ_1, μ_2 – вязкости воды и нефти;

f_1, f_2 – относительные фазовые проницаемости;

δ – дельта-функция;

φ_1, φ_2 – функции, учитывающие неньютоновский характер течения раствора полимера и нефти;

$1/\varphi_1, 1/\varphi_2$ – фактор сопротивления в соответствующих зонах;

d – ширина элемента пласта;

K_j, h_j – проницаемость и мощность j-го пропластка;

N_1 – число пропластков;

N_G – число рядов;

q^G_{1j}, q^G_{2j} – дебиты фаз в скважинах G-го ряда;

q^G_i – суммарный дебит жидкости в G-м ряду;

$2\sigma^G$ – расстояние между скважинами в G-м ряду;

r_c^G – радиус скважины;

p_3^G, p_2^G – забойное давление и давление на галерее в G-м ряду;

S_1^* – водонасыщенность в пласте до закачки оторочки полимера;

S_1^0, C^0 – водонасыщенность и концентрация в точке X=0 во время закачки оторочки.

На основе предложенного алгоритма составлена программа расчета для ЭВМ БЭСМ-6, которая находится во ВНИИ под названием "РОЛУМ".

Для определения показателей полимерного заводнения по описанной методике необходимо дополнительно к исходным данным, представленным в (9.3.), иметь функции фазовых проницаемостей.

9. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПРИ ПОЛИМЕРНОМ ЗАВОДНЕНИИ

При проектировании разработки нефтяных месторождений с применением водорастворимых полимеров необходимо решить следующие основные задачи:

- выбрать и обосновать рациональную систему разработки;
- оценить запасы нефти, охваченные процессом;
- подготовить исходные для расчета данные;
- установить оптимальные величины оторочки раствора полимера и его концентрацию для рассматриваемых условий;
- рассчитать показатели разработки залежи по намеченным вариантам и выбрать оптимальный вариант.

9.1. Выбор рациональной системы разработки,

9.1.1. Учитывая специфику полимерного заводнения, рекомендуется принимать в основном интенсивные системы разработки – однорядную, площадную и избирательную системы. Последняя может быть особенно эффективна, так как она позволяет воздействовать на пласт загущенной водой с учетом его геологического строения, что обеспечивает наибольший охват заводнением и помогает сохранить высокий темп разработки. Многорядные или блоковые системы для полимерного заводнения неприемлемы по двум причинам: во-первых, нерационально используется полимер, который совершает полезную работу по увеличению охвата заводнением в основном в пределах первого эксплуатационного ряда скважин, а затем отбирается этим рядом с попутно добываемой водой; во-вторых, в период закачки оторочки раствора полимера возможно значительное снижение темпов разработки месторождения. Это сосбенно сказывается на месторождениях с низкими коллекторскими свойствами, где продолжительность закачки оторочки полимера относительно велика.

9.1.2. К решению вопроса о выборе системы разработки можно подойти следующим образом.

На разрабатываемых месторождениях при внутриконтурном заводнении существующую систему необходимо перепроектировать таким образом, чтобы приблизить ее к однорядной или площадной с сохранением или увеличением прежнего темпа отбора жидкости. В тех редких случаях, когда и интенсивная система не обеспечивает компенсацию в потере темпа добычи нефти в период закачки оторочки

полимера при неизменном расстоянии между скважинами, необходимо рассмотреть варианты по уплотнению сетки скважин или увеличению давления нагнетания. Однако окончательный выбор варианта возможен только после экономических расчетов.

На новых месторождениях необходимо с самого начала планировать однорядную или площадную системы заводнения.

9.1.3. При составлении технологических схем разработки, как правило, рассматривается несколько вариантов, отличающихся системой заводнения и плотностью сетки скважин, из них выбирается оптимальный. Для полимерного заводнения можно рекомендовать систему разработки оптимального варианта обычного заводнения (базисного) с учетом высказанных выше соображений.

9.2. Оценка запасов, охваченных процессом.

При рассмотрении залежи нефти для осуществления полимерного заводнения необходимо выделить на ней площадь, которая будет охвачена процессом, и определить ее балансовые и активные запасы.

Если на выделенной под полимерное заводнение площади пласт резко различен по таким параметрам, как мощность, проницаемость, вязкость нефти, степень выработки или если процесс планируется проводить не единовременно по всей залежи, то площадь разбивается на отдельные участки. По выделенным (в соответствии с теми или иными признаками) участкам определяются основные геолого-промысловые параметры, а при необходимости иссле-

дуются реологические, фильтрационные и адсорбционные характеристики раствора полимера для конкретной пористой среды. Показатели полимерного заводнения (и базисного) рассчитываются для каждого участка.

9.3. Исходные данные для расчета основных показателей процесса следующие:

- функции распределения проницаемости, количество прослоев (до 100) и выборка проницаемости по ним;
- средняя проницаемость пласта;
- соотношение вязкостей нефти и воды;
- средняя мощность пласта;
- пористость;
- относительная проницаемость по воде при остаточной нефтенасыщенности;
- коэффициенты вытеснения нефти водой и раствором полимера;
- значение коэффициентов Генри при адсорбции и десорбции;
- уравнение реологической кривой для раствора полимера выбранной концентрации;
- уравнение реологической кривой для воды, фильтрующейся после раствора полимера той же концентрации;
- система разработки;
- расстояние между нагнетательной и эксплуатационными скважинами или соответствующими рядами;
- радиусы эксплуатационной и нагнетательной скважины;
- стадия разработки пласта на начало процесса

полимерного заводнения, выраженная через объем добытой жидкости, отнесенный к активным запасам нефти (или балансовым);

– относительный размер оторочки раствора полимера в тех же величинах;

– среднесуточная приемистость нагнетательной скважины для условий $Q = const$ или начальная приемистость для условий $\Delta P = const$

9.4. Выбор оптимального размера оторочки раствора полимера и его концентрации

9.4.1. С увеличением количества закачанного полимера абсолютный прирост нефтеотдачи непрерывно возрастает, однако темп прироста дополнительно добытой нефти с увеличением расхода полимера снижается. Существует оптимальный расход полимера, зависящий от его свойств и ряда геолого-физических факторов.

Из расчетов, проведенных для неоднородного пласта (коэффициент вариации проницаемости 0,877, $\int\mu_o$ =30 и 100), следует, что при $\int\mu_o$=30 основной прирост нефтеотдачи наблюдается при расходе Калушского ПАА до 0,2 кг/м^3 объема пор, первоначально насыщенных нефтью, и при $\int\mu_o$=100 до 0,3 – 0,5 кг/м^3 (рис. 14). Целесообразность увеличения расхода полимера выше этих значений должна определяться экономически.

Выбранное количество полимера следует закачивать в виде оторочки, объем которой (в первом приближении) должен находиться в пределах 10–30% от объема пор пласта, первоначально насыщенных нефтью. Из графика

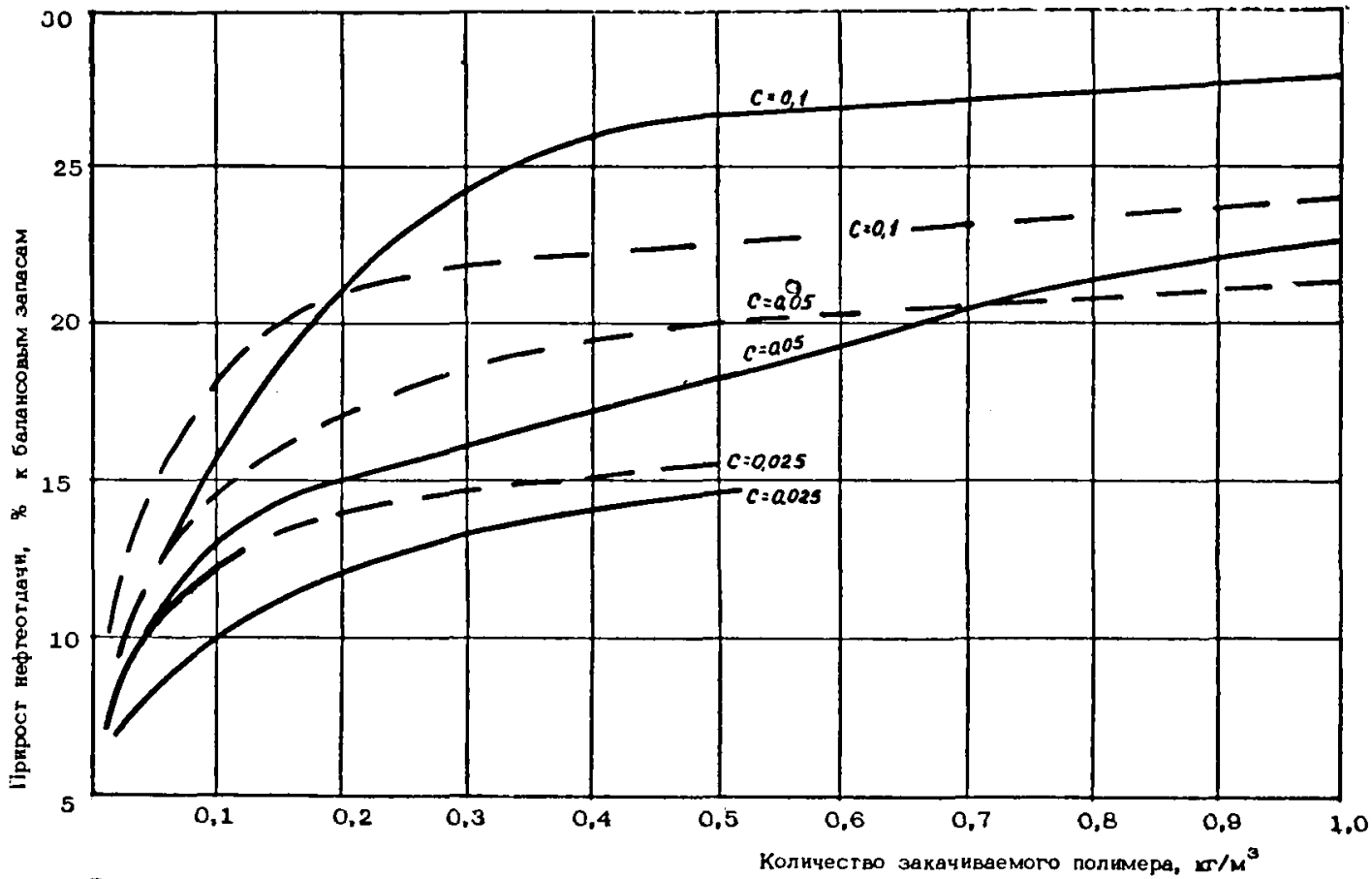


Рис. 14. Влияние концентрации закачиваемого раствора полимера на эффективность полимерного заводнения

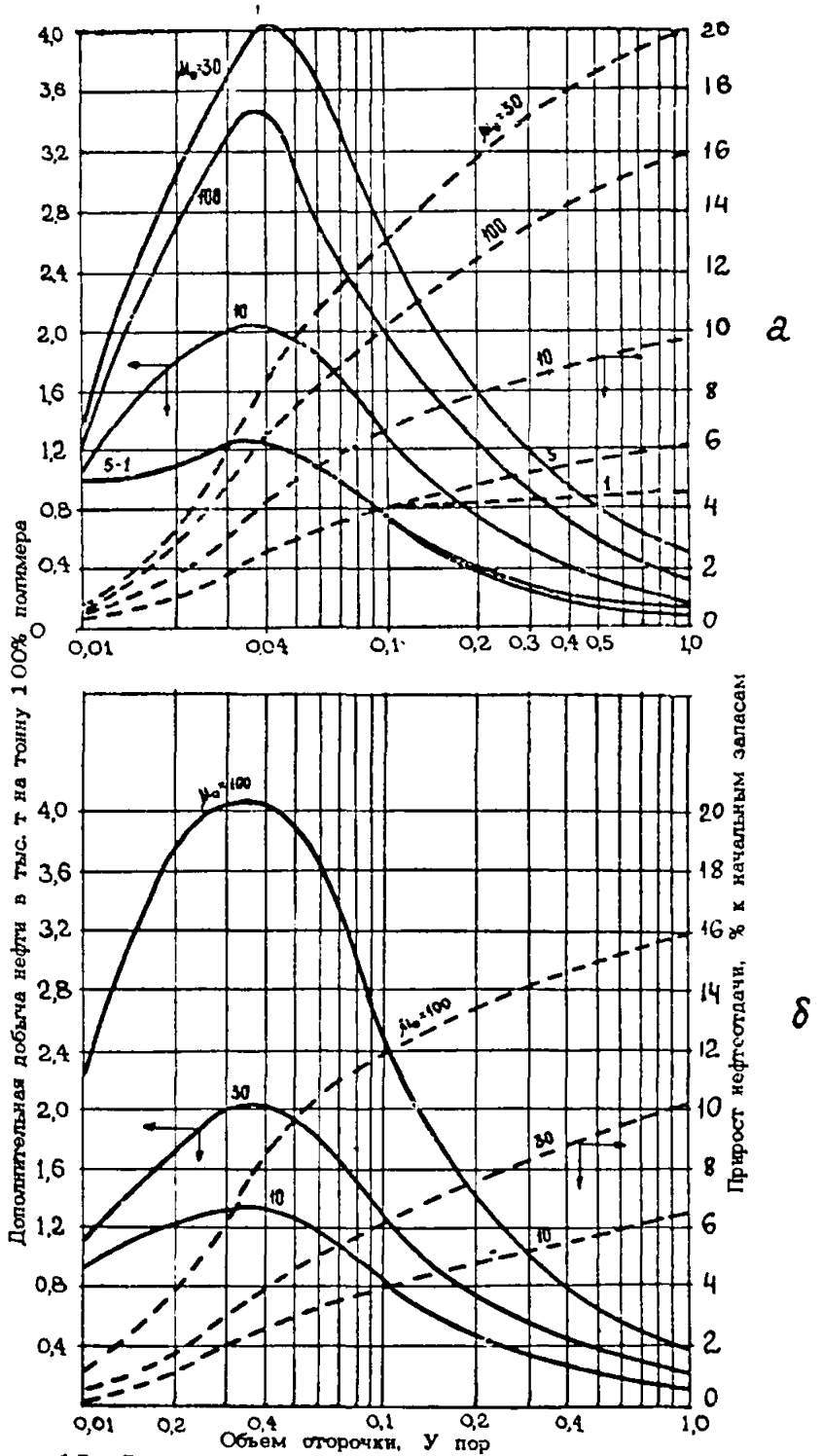
——— M_0 = 100 - - - - M_0 = 30

рис. 15а следует, что вытеснение нефти вязкостью 30сПз оторочкой объемом 0,3 от объема пор пласта повышает нефтеотдачу на 17% от начальных балансовых запасов. Увеличение оторочки до одного порового объема позволяет дополнительно увеличить нефтеотдачу всего на 3%. Аналогичная зависимость наблюдается и для других вязкостей нефти. Следовательно, закачивать оторочку объемом более 30% в подавляющем большинстве случаев нецелесообразно. Кроме того, как показывает график на рис. 14, для условий слоисто-неоднородного пласта с разобщенными прослоями при одном и том же количестве использованного полимера увеличивается прирост нефтеотдачи с ростом концентрации полимера в растворе (и уменьшением объема оторочки).

Как следует из рис. 16, при разработке месторождений с вязкостью нефти менее 30 сПз нецелесообразно повышать концентрацию полимера выше 0,07% при объеме оторочки 0,3 и более. При вытеснении высоковязких нефтей (100 сПз и выше) концентрация полимера может быть повышена до 0,1 – 0,15%.

9.4.2. Графики на рис. 14-16 могут служить первым ориентиром в поиске оптимальных значений объема оторочки и концентрации полимера в растворе. Более точно и обоснованно искомые параметры могут быть установлены только после проведения комплекса работ, рассмотренных в п. 6.

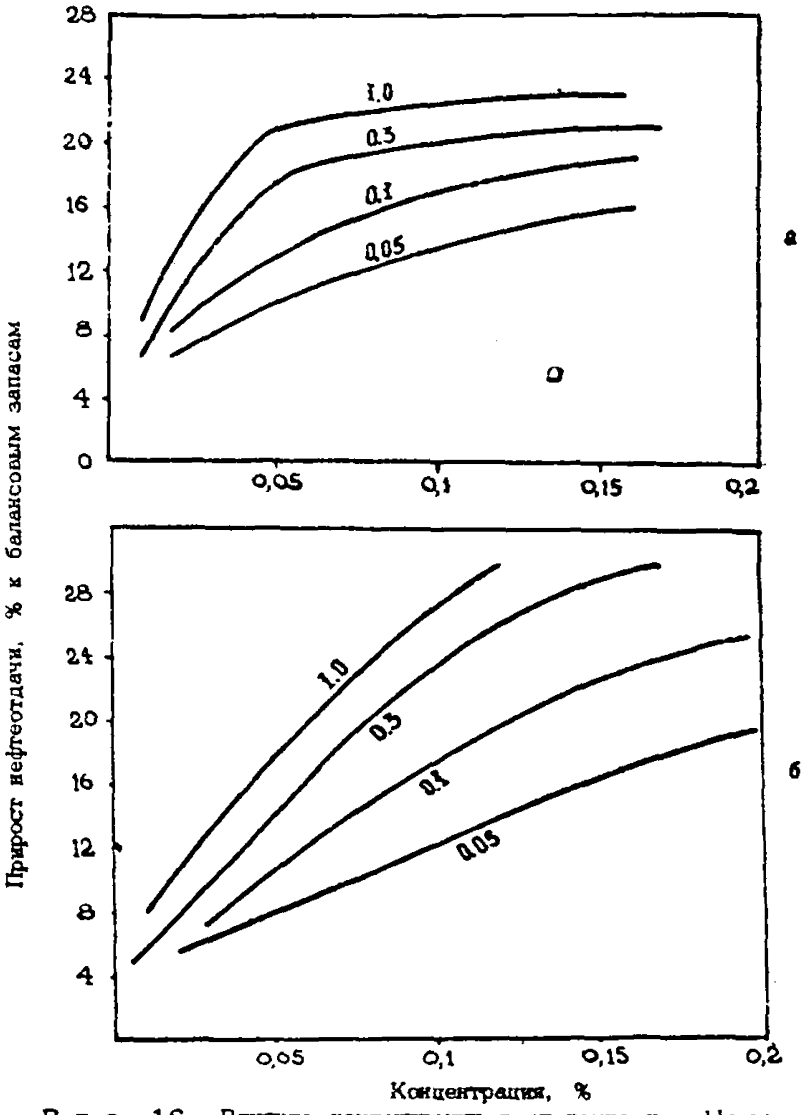
9.4.2.1. Используя описанную выше "Методику расчета показателей процесса вытеснения нефти оторочкой раствора полимера", рассчитывают несколько вариантов



Р и с. 15. Влияние размера оторочки на эффективность полимерного заводнения: а) Коэффициент вариации проницаемости – 0, 877
б) Коэффициент вариации проницаемости – 0, 535

———— дополнительная добыча нефти на тонну 100% полимера

– – – – прирост нефтеотдачи в % к начальным балансовым запасам.



Р и с. 16. Влияние концентрации в оторочке на эффективность полимерного заводнения, в неоднородном пласте с коэффициентом вариации проницаемости Кв = 0. 877

а - $M_н$ = 30 сПз, б - $M_н$ = 100 сПз.

вытеснения нефти оторочкой при различной концентрации полимера в растворе. Для сокращения общего количества вариантов и затрат машинного времени рекомендуется использовать (в качестве ориентиров) графики на рис. 14-16, а также соображения, высказанные в п. 9.3.1.

9.4.2.2. Полученные расчетные показатели процесса сравниваются с показателями обычного заводнения для выбранной системы разработки и определяются оптимальные значения искомых величин по приросту дополнительно добытой нефти.

9.4.2.3. Подбирают несколько вариантов, различающихся величиной искомых параметров и дающих различный технологический эффект. Оптимальные значения размера оторочки раствора полимера и его концентрации в этом случае должны быть установлены последующими экономическими расчетами.

9.5. Расчет показателей разработки залежи по вариантам и выбор оптимального варианта

9.5.1. По предварительно выбранным вариантам полимерного заводнения, отличающимся между собой:

- системой заводнения и темпами отбора жидкости;

- технологическими параметрами процесса (размером оторочки, концентрацией полимера в закачиваемом растворе, качеством полимера) рассчитывают основные показатели процесса: зависимость доли нефти в продукции и охвата пласта заводнением (или нефтеотдачи) от безразмерного времени τ - отношения нарастающего объема добываемой жидкости к активным запасам (или балансовым).

9.5.2. В соответствии с заданной динамикой отбора жидкости по годам и полученным зависимостям $f_н = f(\tau)$ определяются: годовой отбор нефти, воды и газа, накопленные объемы жидкости, нефти, воды и газа, нефтеотдача и все остальные показатели процесса разработки по годам. Расчет проводится на заданный период разработки или до предельной обводненности продукции.

9.5.3. Выбор оптимального варианта разработки залежи с полимерным заводнением производится после экономических расчетов путем сравнения технико-экономических показателей разработки по рассмотренным вариантам, включая и обычное заводнение.

10. ИССЛЕДОВАНИЕ СКВАЖИН И ПЛАСТА, КОНТРОЛЬ ЗА РАЗРАБОТКОЙ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ПОЛИМЕРНОГО ЗАВОДНЕНИЯ

При полимерном заводнении применяются те же методы контроля за работой скважин и пласта, что и при обычном заводнении. Однако в связи с повышенной требовательностью к надежности данные измерения должны проводиться чаще, чем обычно.

Непосредственно перед закачкой раствора полимера необходимо:

10.1. Очистить стволы нагнетательных скважин от грязи, парафина и т.п. (что достигается, например, прохождением ствола райбером) и спустить новые насосно-

компрессорные трубы с воронкой на конце.

10.2. Снять профили приемистости в нагнетательных скважинах и, если возможно, то и профили притока в эксплуатационных скважинах.

10.3. Провести комплекс гидродинамических исследований скважин и пласта (построение индикаторных диаграмм, снятие кривых падения и восстановления давления, гидропрослушивания и т.п.).

10.4. Осуществлять тщательный контроль за приемистостью нагнетательных скважин, дебитом и обводненностью эксплуатационных скважин; а также пластовым давлением и динамическими уровнями.

10.5. В первую порцию раствора полимера добавить индикатор.

10.6. В ходе закачки раствора полимера и при возобновлении закачки воды необходимо периодически проводить все вышеуказанные виды исследований, наладить контроль за концентрацией полимера в попутных водах, а также проследить за направлением движения полимера с помощью индикатора.

В настоящее время полимерное заводнение осуществляется на экспериментальных участках, результаты разработки которых могут служить основой для проектирования процесса по залежи в целом. На основании данных опытно-промышленных работ делаются выводы об области рентабельного применения метода и его эффективности в различных геолого-промысловых условиях. Поэтому разработка таких участков должна проводиться под тщательным

контролем и регулировкой, при которой гидродинамическое поле залежи не вносило бы искажений в разработку участка. Для однозначной интерпритации результатов промысловых исследований должны быть достаточно надежными.

11. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИМЕРОВ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ ПЛАСТОВ, ПОСТРОЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫТЕСНЕНИЯ

В зависимости от стадии разработки месторождения, на которой начался процесс полимерного заводнения, могут быть два подхода к анализу его технологической эффективности.

11.1. Процесс полимерного заводнения начат на ранней стадии разработки. В этом случае сравниваются показатели разработки залежи (участка), находящейся под полимерным заводнением, и близкой ей по параметрам залежи (участка), разрабатываемой при обычном заводнении. При этом опытное и базисное месторождения должны быть идентичны по следующим показателям:

- тип коллектора;
- геологическая неоднородность пласта;
- свойства пластовых жидкостей;
- система размещения эксплуатационных и нагнетательных скважин.

При анализе подобранных таким образом месторож-

дений необходимо учитывать гидродинамические условия их эксплуатации (динамику давлений, темпы освоения системы заводнения, стабильность "границ" участков, не изолированных от основной площади месторождения, и т.д.) и делать ту или иную корректировку на их различие и изменения. Сравнение интересующих зависимостей производится в безразмерных величинах.

11.2. Процесс закачки раствора полимера начат на относительно поздней стадии разработки. В этом случае анализ основан на экстраполяции характеристик вытеснения, полученных до применения полимерного заводнения, и сравнении их с фактической характеристикой.

Для последнего случая анализ облегчается, так как соблюдены все геолого-промысловые условия, но появляется трудность в точной экстраполяции характеристик вытеснения. Одновременно может быть применен метод сравнения с разработкой других месторождений, находящихся под обычным заводнением.

11.3. Оценка технологической эффективности полимерного заводнения как в первом, так и во втором случаях основана на сравнении промысловых характеристиках вытеснения. Для оценки эффективности процесса можно рекомендовать характеристики вытеснения, построенные в координатах:

11.3.1. "Нефтеотдача - логарифм накопленной добычи жидкости".

11.3.2. "Нефтеотдача - логарифм накопленной добычи воды".

11.3.3. "Отношение накопленных объемов жидкости и нефти - накопленная добыча воды".

11.3.4. "Логарифм водонефтяного отношения - нефтеотдача".

Все эти зависимости в процессах вытеснения нефти водой в указанных координатах в определенных пределах обводненности имеют прямолинейный характер, что позволяет экстраполировать их в допустимых пределах. По первым двум характеристикам вытеснения линейность зависимости наблюдается при обводненности от 20 до 60-80%, по третьей - соответственно от 60% и выше. Предлагаемые характеристики вытеснения не исключают использование других соотношений между величинами добываемых объемов нефти, воды, жидкости, которые для конкретных геолого-промысловых условий более приемлемы.

11.4. При оценке прироста нефтеотдачи сравниваются прогнозные (или фактические на базисном участке) зависимости, полученные при обычном заводнении, с фактическими данными полимерного заводнения. При этом величину прироста в добыче нефти привязывают, как правило, к одной и той же величине соответствующего параметра - к накопленной добыче жидкости или воды, доле нефти или водонефтяного фактора.

Анализ показывает, что если при оценке эффективности по указанным методикам не привязывать расчет к одному и тому же времени, то полученные величины прироста будут различны. Поэтому для определения текущей эффективности полимерного заводнения необходимо увязать

процесс во времени, то есть найти на базисной (прогнозной) зависимости точку, отвечающую рассматриваемому моменту времени.

Все существующие методы увеличения нефтеотдачи при сохранении неизменной системы разработки влияют на темп отбора жидкости, увеличивая или уменьшая его. Поэтому перед оценкой эффективности процесса на ту или иную дату необходимо предварительно задаться темпом отбора жидкости при базисном варианте на прогнозируемый период.

Наиболее просто привязка ко времени осуществляется по характеристике, представленной в координатах $\eta = f(\lg \Sigma Q_ж)$. Здесь достаточно задаться отбором жидкости за рассматриваемый период времени, который имел бы место при обычном заводнении, чтобы определить нефтеотдачу и, следовательно, прирост нефтеотдачи, полученный за счет полимерного заводнения.

Для других характеристик вытеснения определяющий параметр необходимо выразить через прогнозную величину отбираемой жидкости. Так, к примеру, зависимость $\lg$ ВНО$= a + b\eta$ в этом случае представляется в следующем виде: $\lg = \frac{\bar{q}_ж - \bar{q}_н}{\bar{q}_н} = a + b(\eta_t + \bar{q}_н)$, где ВНО – водонефтяное отношение за период (месяц, квартал); a и b – коэффициенты уравнения; $\bar{q}_ж$ –заданное значение отбираемого количества жидкости за выбранный шаг времени; $\bar{q}_н$ – искомое значение прогнозной добычи нефти за этот период времени; η_t – прогнозная нефтеотдача на конец предшествующего периода времени. Это уравнение решается относительно $\bar{q}_н$ и затем определяется

прогнозная нефтеотдача на конец рассматриваемого периода.

12. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИМЕРНОГО ЗАВОДНЕНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

12.1. ОБОЗНАЧЕНИЯ:

C_1 и C_2 – себестоимость единицы продукции (нефти), руб.;

$E_п$ – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений;

$З_1$ и $З_2$ – приведенные затраты единицы продукции (нефти), руб;

K_1 и K_2 – удельные капиталовложения в производственные фонды, руб;

$K_р$ – удельные капиталовложения на разведку, руб;

Q_1 и Q_2 – годовой объем производства продукции (нефти), т;

ΔQ – прирост выпуска продукции (добычи нефти) при внедрении новой техники (полимерное заводнение), т;

$Ц_з$ – замыкающие затраты, руб.

Индексы 1 и 2 относятся соответственно к базовой (обычное заводнение) и новой технике (полимерное заводнение).

12.2. Определение экономической эффективности

применения процесса полимерного заводнения является одним из вопросов определения экономической эффективности методов разработки нефтяных месторождений. Полимерное заводнение повышает конечную нефтеотдачу пласта и способствует высвобождению капиталовложений на разведку и освоение новых месторождений с запасами нефти, равными дополнительному объему добычи, который может быть получен за счет внедрения метода. Поскольку применение полимеров является одним из новых технологических процессов разработки нефтяных месторождений, экономическая эффективность метода должна рассчитываться на основе "Методики определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений", утвержденной 14 февраля 1977г.

В соответствии с указанной методикой (раздел II) расчет годового экономического эффекта от применения новых технологических процессов производится по формуле:

$$Э = (З_1 - З_2) \; Q_2 . \qquad (12.1)$$

Приведенные затраты представляют собой сумму себестоимости и нормативной прибыли:

$$З = С + E_{н}K . \qquad (12.2)$$

12.3. Экономический эффект от применения полимеров при заводнении определяется за период, позволяющий выявить технологический эффект предлагаемого метода.

12.4. За базу сравнения для определения экономи-

ческого эффекта от применения полимерного заводнения принимаются показатели разработки при обычном заводнении нефтяных месторождений.

12.5. Капитальные вложения на бурение определяются по сметной стоимости 1 м проходки, на обустройство месторождения – по действующим на период составления проекта нормативам. Дополнительные капитальные вложения, связанные с применением ПАА, включают затраты на установку по приготовлению раствора полимера, бурение и обустройство дополнительных нагнетательных скважин, строительство которых предопределено закачкой ПАА для сохранения темпа отбора жидкости.

12.6. Эксплуатационные расходы определяются в соответствии с действующей в отрасли инструкцией по расчету себестоимости добычи нефти. В эксплуатационных расходах на закачку раствора полимера учитываются: стоимость полимера; транспортные расходы; затраты, связанные с приготовлением раствора (амортизация установки, электроэнергия, зарплата рабочих, обслуживающих установку, и т.п.).

12.7. Приведенные затраты сравниваемых вариантов определяются при условии равенства объемов добычи за равный период разработки месторождения. Выравнивание показателей по вариантам с различными объемами добычи (разной конечной нефтеотдачей) производится на недостающий объем добычи. Для выравнивания принимаются утвержденные приведенные замыкающие затраты. До утверждения приведенных замыкающих затрат в качестве коэффициента

для выравнивания показателей на недостающий объем добычи принимается замыкающая оптовая цена на нефть ("Оптовые цены предприятий на нефть", введенные с 1 июля 1975г., прейскурант № 04-01).

12.7.1. Приведенные затраты на выравнивание объемов добычи по варианту с закачкой воды без загустителя (вариант с меньшим объемом добычи) определяются по уравнению:

$$З_1 = C_1 + \frac{E_n(K_1 + K_p)\cdot Q_1 + Ц_3\cdot \Delta Q}{Q_2}. \quad (12.3.)$$

12.7.2. Приведенные затраты по варианту полимерного заводнения определяются по уравнению:

$$З_2 = C_2 + \frac{E_n[(K_2 + K_p)\, Q_1 + K_2\cdot \Delta Q]}{Q_2} \quad (12.4.)$$

12.7.3. Определяется среднеговодой экономический эффект от применения ПАА по формуле (12.1.).

12.8. Пример расчета экономической эффективности. Исходные данные представлены в табл. 12.1.

Таблица 12.1

	Показатели по вариантам	
	с закачкой воды без загустителя	с закачкой загущенной воды
1. Период разработки, лет	30	30
2. Среднегодовая добыча нефти, тыс. т	123	165
3. Суммарная дополнительная добыча нефти, тыс. т	-	1258

Продолжение табл.12.1

	Показатели по вариантам	
	с закачкой воды без загустителя	с закачкой загущенной воды
4. Капитальные вложения в разработку месторождения, тыс. руб.	7522	7907
5. Дополнительные капитальные вложения на осуществление метода, тыс. руб.	-	385
6. Удельные капитальные вложения в разработку, руб.	61,15	47,92
7. Удельные капитальные вложения в разведку по району, руб,	2,67	2,67
8. Дополнительные эксплуатационные затраты на закачку ПАА, тыс. руб.	-	5785
9. Себестоимость добычи нефти без отчисления на геологоразведочные работы, руб.	5,79	5,67
10. Замыкающие затраты на добычу нефти, руб.	26,50	26,50
11. Нормативный коэффициент эффективности (Е)	0,1	0,1

12.8.1. Пп. 1-6,8 и 9 табл. 12.1 включаются из проекта разработки.

12.8.2. Данные в п. 7 включаются на основании отчетных данных об эффективности геологоразведочных работ по району, руб.

12.8.3. Замыкающая оптовая цена на нефть принимается на основании "Оптовых цен предприятий на нефть", прейскурант № 04-01.

12.8.4. Нормативный коэффициент эффективности установлен для нефтедобывающей промышленности равным 0,1 (письмо Госплана СССР № АЛ-184/25-213 от 18 марта 1977г.).

Подставляя данные табл. 12.1 в формулы (12.3)-(12.5), получим:

$$\Delta Q = 165 - 123 = 42 \text{ тыс. т;}$$

$$З_1 = 5,79 + \frac{0,1 \cdot 61,15 \cdot 123 + 26,50 \cdot 42}{165} = 17,09 \text{ руб;}$$

$$З_2 = 5,67 + \frac{0,1 \cdot 47,92 \cdot 165}{165} = 10,46 \text{ руб;}$$

$$Э = (17,09 - 10,46) \cdot 165 = 1094 \text{ тыс. руб.}$$

13. ТЕХНИКА И ОБОРУДОВАНИЕ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ РАЗРАБОТКЕ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛИМЕРОВ

13.1. Закачка раствора полиакриламида в продуктивные пласты должна проводиться в соответствии с принятой технологической схемой разработки, а необходимое для ее осуществления обустройство должно выполняться по соответствующему проекту, разработанному и согла-

сованному в установленном порядке.

13.2. При обустройстве промысла для полимерного заводнения дополнительно к обычному оборудованию требуется установка для приготовления раствора полимера и закачки его в нагнетательные скважины. Эта установка обычно монтируется рядом с кустовой насосной станцией (КНС).

Для растворения полимеров используются различные устройства, конструкция которых зависит от товарного вида реагента (гель, порошок).

В настоящее время при проведении опытно-промышленных работ используется 8%-ный гель ПАА. В ближайшей перспективе может быть использован порошкообразный ПАА, производство которого намечено организовать в текущей пятилетке.

13.3. При конструировании установок для растворения ПАА и закачки растворов в пласт, а также в процессе растворения полимера в промысловых условиях необходимо учитывать рекомендации, изложенные в п. 6.2. настоящего руководства.

13.4. Принципиальная схема установки для приготовления раствора из геля ПАА и закачки его в пласт представлена на рис. 17. Эта установка использовалась при проведении полимерного заводнения на Орлянском месторождении. Она рассчитана на приготовление 100м^3/сут 0,7%-ного раствора ПАА. Гель из бочек подается в волчок (7), где он диспергируется до 3-5 мм частиц, которые смываются с сетки волчка потоком воды, подаваемой

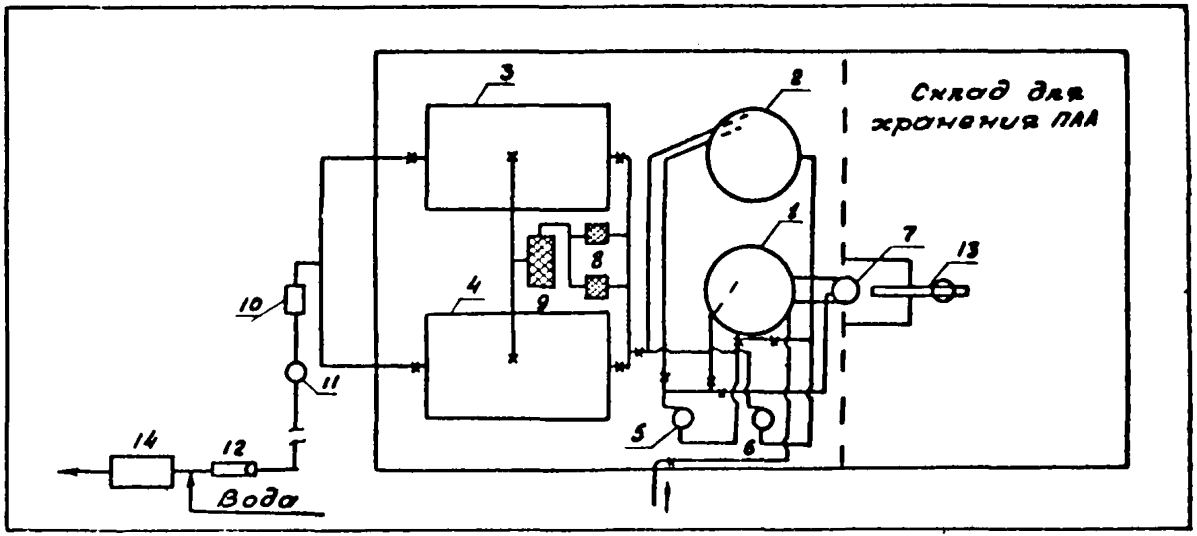


Рис. 17. Схема установки по приготовлению растворов ПАА на Орлянском месторождении.

1,2- ёмкости для растворения геля; 3,4- ёмкости для раствора ПАА; 5,6- фекальные насосы; 7- волчок; 8- фильтры грубой очистки; 9- фильтры тонкой очистки; 10- дозировочные насосы ВКО; 11- счётчик СВШ-25; 12- обратный клапан; 13- электроталь; 14- насос ЦН-100.

фекальными насосами (5,6). Последние обеспечивают также рецеркуляцию жидкости в емкостях (1,2). Полученный раствор через фильтры грубой (8) и тонкой очистки (9), работающие последовательно, подается в накопительные емкости (3,4), откуда он насосами (10) через счетчик (11) и обратный клапан (12) дозируется на прием насоса КНС (14). Прием фекальных насосов (5,6) должен быть врезан в нижнюю часть емкостей (1,2), а выкид - по касательной, чтобы в емкостях создавалось вращательное движение жидкости. фильтры ставятся попарно, чтобы обеспечить непрерывность процесса в случае выхода из строя одного из них. фильтры грубой очистки предназначены для очистки раствора от грубых примесей (щепок, грязи). Их роль могут выполнять металлические листы, перфорированные отверстиями диаметром 1-2мм. В качестве фильтрующего элемента в фильтрах тонкой очистки рекомендуется использовать металлическую сетку с размером ячеек 0,2-0,3 мм.

13.4.1. В случае подачи раствора на прием насосов КНС (как это показано на рис. 17) дозировочными насосами могут служить центробежные или вихревые насосы, например, ВКО-2/26 или аналогичные.

13.4.2. При дозировании раствора ПАА в линию высокого давления использование плунжерных насосов не рекомендуется, так как они приводят к существенной деструкции макромолекул. Наилучшим вариантом представляется применение винтовых насосов конструкции ОКБ БН.

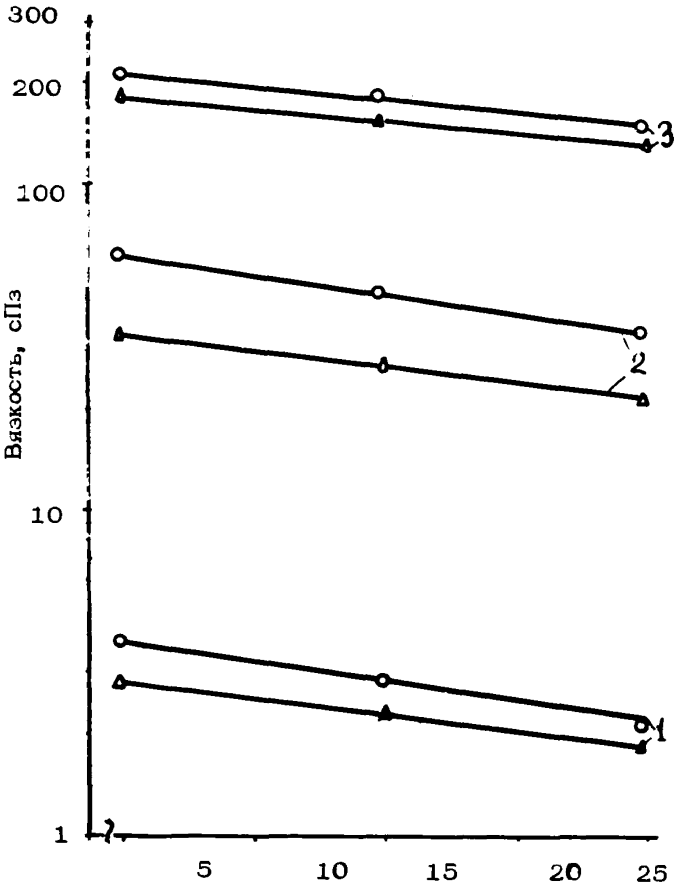
13.4.3. Для измерения расхода раствора полиме-

ра могут использоваться счетчики типа "Вольтман", СВШ или другие.

13.4.4. В зимний период гель ПАА замерзает, для его оттаивания требуется большое складское помещение. Для приготовления раствора полиакриламида из замороженного геля можно использовать гидромониторную установку, в которой движение насадки регулируется таким образом, чтобы при размыве бочки с замерзшим гелем струя равномерно охватывала всю поверхность бочки. При этом образуется дисперсия частичек льдообразного полимера, дальнейшее растворение которых осуществляется перемешиванием.

13.5. Схема распределительной сети водоводов определяется сеткой нагнетательных скважин, принятой в проекте разработки залежи. Если полимерное заводнение осуществляется на части залежи, то от КНС к ВРП необходимо проложить специальные коллекторы для раствора ПАА. Способ прокладки водоводов - подземный. Защита от коррозии при использовании известкового ПАА не требуется. Растворы аммиачного ПАА агрессивны примерно так же, как сточные воды. В гидравлических расчетах по формуле Дарси-Вейсбаха расход принимается исходя из приемистости скважин при закачке воды. Ориентировочные величины вязкости растворов ПАА могут быть взяты из рис. 18.

13.6. Для приготовления раствора из дисперсных порошкообразных полимеров институтом "ТатНИИнефтемаш"



Р и с. 18. Зависимость вязкости растворов полиакриламидов от концентрации и температуры:

-o- – известковый ПАА; -Δ- – аммиачный ПАА; 1,2,3, – концентрация соответственно 0,05; 0,5; 1,0%

сконструирована установка УДПП-1,5, опытные образцы которой будут выпущены заводом "Красный молот" в 1977 году. Техническая характеристика установки приведена в табл. 13.1.

Таблица 13.1.

Техническая характеристика установки

УДПП - 1,5

Исходный реагент	Мелкозернистый порошок полимера
Максимальная производительность, т/сут (в пересчете на 100%-ную концентрацию)	1,5
Максимальное давление дозирования, кгс/см^2	200
Максиальная концентрация рабочего раствора, %	2
Температура воды для приготовления рабочего раствора, ^{o}C, не ниже	8
Наработка на отказ, ч	1500
Средний ресурс до капитального ремонта, ч	25000
Средний срок службы, лет	8
Стоимость (ориентировочная), тыс. руб.	60
Вес (ориентировочный), т	25

13.6.1. Схема установки представлена на рис. 19. Установка состоит из трех основных блоков: смесительного, растворения, высоконапорного.

Смесительный блок предназначен для смешения заданных

количеств порошка ПАА и воды, блок растворения - для приготовления концентрированного раствора ПАА, высоконапорный блок - для подачи рабочего раствора в напорный водовод КСН.

13.6.2. Гидравлическая схема установки УДПП-1,5 предусматривает два варианта смесительного блока: эжекторного типа и с емкостным смесителем, где подача порошка осуществляется в открытый поток воды.

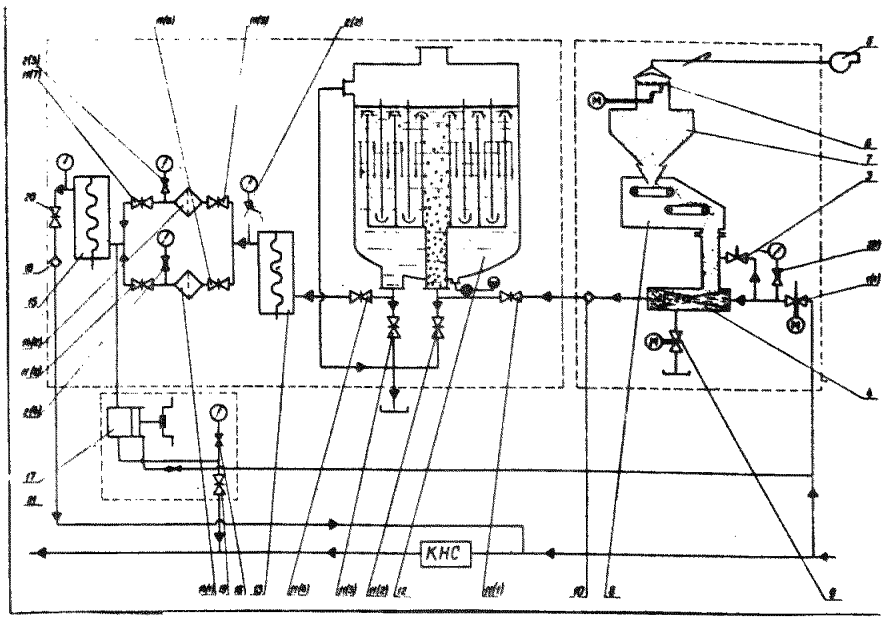
13.6.3. Установка работает следующим образом. Порошок ПАА из мешков подается в приемный ящик вибросита (6), откуда он шнековым транспортером направляется в накопительный бункер (7). Заполнение бункера производится в дневную смену в расчете на круглосуточную работу установки.

Из бункера порошок непрерывно поступает в весовой дозатор (8), а из него в смеситель.

По первому варианту в смесителе эжекторного типа (4) порошок засасывается струей воды. По второму варианту он подается в открытый поток воды с последующим перемешиванием смеси фекальным насосом. Предполагается, что в смесителе будет получена достаточно однородная суспензия частиц полимера в воде.

Заданная концентрация обеспечивается регулированием расхода воды и весом порошка ПАА, выдаваемого дозатором (8) в единицу времени.

Смесь ПАА с водой подается в вертикальную многосекционную емкость (12), где происходит растворение порошка. Полное растворение обеспечивается заданным



Р и с. 19. Принципиальная схема установки УДПП - 1, 5

1(1), 1(2) - клапан регулирующий с электрическим исполнительным механизмом 25ч931НЖ(НО) Ду 40, Ру 16;

2(1)... 2(4) - кран трехходовой фланцевый для контрольного манометра 14М1 Ду 15, Ру 16;

3 - вентиль регулирующий цапковый 15с09 бк-1 Ду 10, Ру 25;

4 - смеситель

5 - вентиль Ц-4-60 № 2,5 А2, 5 095 - 26 Ту - 22-3410 - 75;

6 - вибросито;

7 - бункер;

8 - дозатор непрерывного автоматического действия для сыпучих материалов ДН - 21УТУ25-06-573-70;

9 - задвижка клиновая с выдвижным шпинделем фланцевая 30ч947бр Ду80, Ру10;

10 - клапан обратный поворотный однодисковый чугунный тип 1, исполнение Б, Ду 80, Ру 16;

11(1)... 11(8) - задвижка клиновая с выдвижным шпинделем, тип 1, ГОСТ 10194-79, исполнение В Ду 80, Ру 16;

12 - растворитель;

13 - агрегат электронасосный 1812/5-10/5Рп-ТУ26-06-958-75;

14(1), 14(2) Фильтр;

15 - агрегат электронасосный 3В12/5-10/5-Рп, ТУ26-06-958-75;

16 - клапан обратный поворотный однодисковый ГОСТ 13252-73 Ду 50, Ру 160;

17 - насос плунжерный приводной ХТр-4/200, ТУ 26-06-375-65;

18 - вентиль запорный с удлиненным шпинделем, цапковый с никелями 15НЖ 46бк из стали 1Х17Н2 Ду6, Ру 200;

19 - задвижка из углеродистой стали клиновая с невыдвижным шпинделем, ковано-сварная фланцевая ЭВД-200/4 Ду 100, Ру 200;

20 - задвижка клиновая с выдвижным шпинделем, тип 1, ГОСТ 10194-69, исполнение Г Ду 50, Ру 160;

21 - вентиль запорный муфтовый латунный 15Б1бк, бр Ду 15, Ру 16.

необходимым временем пребывания раствора в емкости и соответствующими скоростями перемещения смеси в секциях.

Готовый раствор подается одновинтовым насосом (13) через фильтры (14) на вход трехвинтового насоса (15), который нагнетает концентрированные растворы ПАА во всасывающую линию КНС. Для подачи раствора в нагнетательную линию КНС служит высоконапорный трехплунжерный насос (17).

13.7 Институт "ТатНИИнефтемаш" сконструировал установку УДПП-5, опытный образец которой будет выпущен в 1978 году. Краткая техническая характеристика установки приведена в табл. 13.2.

Таблица 13.2.

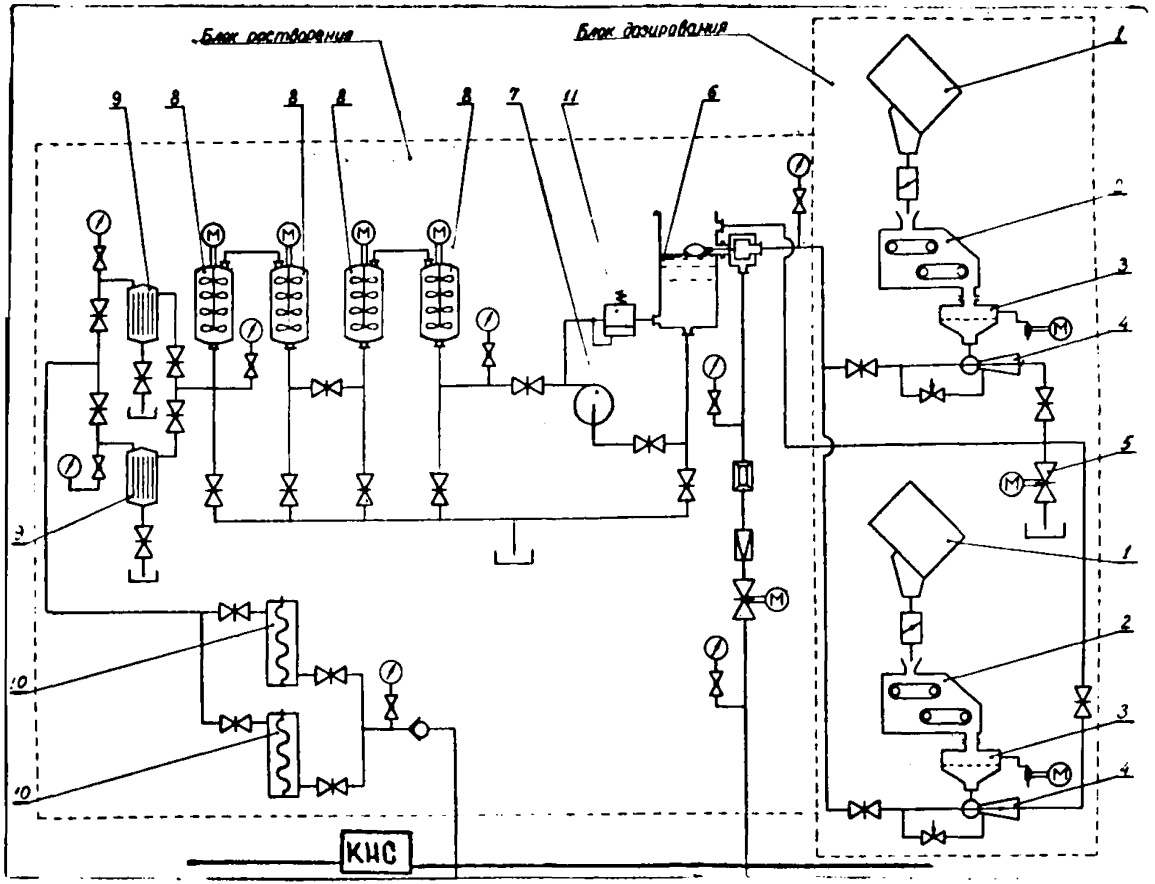
Техническая характеристика установки УДПП - 5

Исходный реагент	Мелкозернистый порошок полимера
Максимальная производительность (по реагенту 100%-ной концентрации), т. сут	5
Давление дозирования, кгс/см^2	40
Максимальная концентрация рабочего раствора, %	2
Температура воды для приготовления рабочего раствора, °С, не ниже	8
Количество обслуживающего персонала (только в первую смену), чел.	1
Габаритные размеры (ориентировочно), мм	10000x3200x4800
Стоимость (ориентировочно), тыс. руб	100

13.7.1. Установка УДПП-5 (рис. 20) состоит из блока дозирования и блока растворения. В первом блоке происходит смешение порошка полимера с водой в заданном соотношении. Блок растворения предназначен для приготовления концентрированного водного раствора ПАА и подачи его во всасывающий водовод КНС.

13.7.2. Работа установки заключается в следующем. Из контейнеров КГС-5 (1) порошок ПАА подается в необходимом количестве с помощью дозаторе для сыпучих материалов ДН-21У (2) через вибросито (3) в эжектор (4), где происходит смешение порошка с водой. Нормальная работа струйного смесителя обеспечивается поддержанием постоянного давления воды перед эжектором. В случае скачка давления автоматически открывается задвижка (5), отключаются дозатор и вибросито, а вся смесь уходит в канализацию, что предотвращает попадание воды в вибросито.

При нормальной работе смесь порошка с водой подается в открытую емкость (6). Для предотвращения слипания частиц ПАА на дне открытой емкости в установке предусмотрен редукционный клапан (11), обеспечивающий перемешивание смеси путем частичной рецеркуляции. Из емкости смесь фекальным насосом (7) проходит через четыре аппарата растворения (8). Полученный в них раствор поступает в один из фильтров (9), где очищается от нерастворенных частиц и поступает на прием трехвинтовых насосов (10), обеспечивающих необходимое давление для поступления концентрированного раствора ПАА во всасыва-



Р и с. 20. Принципиальная гидравлическая схема установки УДПП-5:

1 – контейнер; 2 – дозатор; 3 – вибросито; 4 – эжектор; 5 – задвижка; 6 – емкость; 7 – насос фекальный; 8 – аппарат растворения; 9 – фильтр; 10 – насос трехвинтовой; 11–клапан редукционный

ющую линию КНС.

14. ТРАНСПОРТ И ХРАНЕНИЕ РЕАГЕНТОВ-ЗАГУСТИТЕЛЕЙ

14.1. В соответствии с техническими требованиями, предъявляемыми к акриловым полимерам-загустителям, они должны представлять собой белый мелкодисперсный порошок с размером частиц 1,0 - 0,25мм.

14.2. Реагенты должны упаковываться в бумажные или тканевые мешки с полиэтиленовым вкладышем весом не более 35 кг. В настоящее время прорабатывается вариант транспортировки ПАА в контейнерах.

14.3. Перевозка может осуществляться любым видом транспорта.

14.4. Гарантийный срок хранения реагентов при $\pm$ 30°С - не менее 6 мес. При этом необходимо предохранять полимер от влаги, вызывающей комкование порошка, которое в дальнейшем затруднит растворение полимера.

14.5. Для хранения порошкообразного полиакриламида достаточно иметь площадку под навесом. При использовании геля ПАА необходимо построить отапливаемое складское помещение.

14.6. Для обеспечения бесперебойного процесса приготовления раствора ПАА объем складского помещения должен проектироваться из расчета хранения месячного запаса реагента.

14.7. На складе УПТО и КО, куда реагенты дос-

тавляются, как правило, железнодорожным транспортом, необходимо предусмотреть строительство прирельсовой площадки в расчете на разгрузку одного вагона.

14.8. Перевозка реагентов со склада УПТО и КО на установки для приготовления растворов полимеров осуществляется автомобильным транспортом. Поэтому прирельсовая площадка и площадка для приема реагента на складе установки должны быть сделаны удобными для погрузки и выгрузки реагентов.

15. ПРОМСАНИТАРИЯ И ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

15.1. Полиакриламид не является ни токсичным, ни канцерогенным веществом, и работа с ним не требует особых мер предосторожности. Однако порошкообразные полиакриламиды, подвергающиеся на стадии производства дроблению, будут относиться к "пылящим" продуктам. Поэтому при загрузке порошкообразного реагента в бункеры следует пользоваться противопылевыми респираторами во избежание раздражения верхних дыхательных путей. Бункеры установок оборудуются специальными пылеуловителями, а в помещении в обязательном порядке должна работать общая прямоточная - вытяжная вентиляция.

15.2. При приготовлении растворов аммиачного полиакриламида может происходить выделение аммиака. Это необходимо учесть при проектировании вентиляции, которая должна обеспечивать поддержание концентрации аммиака в

воздухе ниже ЦДК и предела взрывоопасности.

15.3. Полимер в виде геля, попадая на пол, делает его поверхность скользкой, поэтому пол установки должен быть рифленым. Периодически необходимо очищать пол от геля, что можно сделать струей воды или паром.

15.4. При использовании для растворения полиакриламида гидромониторной установки необходимо предусмотреть, чтобы брызги воды не попадали в электродвигатели, пульты управления и т.п.

16. Мероприятия по защите окружающей среды.

Закачка раствора ПАА в нефтяные пласты разрешена письмом Минздрава СССР № 121-5/772-14 от 9.01. 74., подписанным заместителем главного государственного врача СССР тов. Заиченко А.И. Содержание остаточных количеств полиакриламида в попутных водах из эксплуатационных скважин при отведении их в водоем не должно превышать установленной ПДК 2,0 мг/л.

По технологии в пласт предусматривается закачивать 10-30%-ную оторочку 0,01-0,1%-ного раствора полиакриламида. Вследствие адсорбции породой и смешения с пластовыми жидкостями концентрация полимера по мере продвижения раствора по пласту значительно уменьшается. Исследования, проведенные на Орлянском и Сосновском месторождениях, показывают, что концентрация полимера в попутных водах скважин не превышает тысячных долей процента. Поскольку на сборном пункте попутная вода, содержащая остаточное количество полимера, смешивается с водами других скважин или объектов, не содержащих полиме-

ра, отведение этих вод не требует строительства специальных очистных сооружений. В случае использования попутных вод для заводнения проблема защиты окружающей среды снимается вообще.

Приложение № 1

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПОЛИАКРИЛАМИДА СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

1. Данный метод включает в себя две стадии: стадию подготовки пробы и непосредственное определение ПАА на спектрофотометре СФ-4А.

Стадия подготовки предусматривает:

а) очистку растворов от органических примесей экстракцией хлороформом;

б) освобождение от неорганических примесей диализом.

2. ТЕРМИНОЛОГИЯ

2.1. Диализ – удаление из коллоидных систем и растворов высокомолекулярных соединений примесей низкомолекулярных веществ с помощью полупроницаемых мембран, т.е. перегородок, которые пропускают малые молекулы и ионы, но задерживают коллоидные частицы и макромолекулы.

2.2. Экстракция – способ разделения твердых

или жидких смесей, основанный на обработке их различными растворителями, в которых компоненты смеси растворяются неодинаково. Растворитель подбирают так, чтобы в нем хорошо растворялся извлекаемый компонент и слабо - другие составные части.

2.3. Оптическая плотность - величина, характеризующая поглощение света в слоях, пленках красителей и других поглощающих веществах. Д равна десятичному логарифму величины, обратной коэффициенту пропускания, т.е. логарифму отношения потоков излучения в пучке, вошедшем в измеряемый объект, и в пучке, вышедшем из измеряемого объекта.

2.4. Коэффициент пропускания - отношение потока излучения, пропущенного данным телом, к потоку излучения, упавшему на него .

2.5. Молекулярный коэффициент экстинкции - численно равен оптической плотности раствора с концентрацией 1 моль/л при длине кюветы 1 см.

3. АППАРАТУРА, РЕАГЕНТЫ, МАТЕРИАЛЫ

3.1. Спектрофотометр СФ-4А.

3.2. Склянки Дрекселя - 2 шт.

3.3. Колба для отдувки, емкость 250 мл.

3.4. Капилляр.

3.5. Водоструйный насос.

3.6. Соединительные вакуумные шланги.

3.7. Стаканы химические, емкость 250 мл.

3.8. Делительная воронка, емкость 100-200 мл.

3.9. Целлофан.

3.10. Хлороформ, ХЧ.

3.11. Кислота соляная, ч, ГОСТ 3118-67.

3.12. Кислота серная, ч, ГОСТ 4204-66.

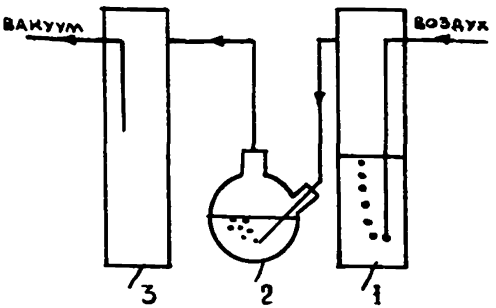
4. ЭКСТРАКЦИЯ

Перед экстракцией основная часть нефти отфильтровывается через складчатый бумажный фильтр. Растворенные в воде нефтепродукты удаляются экстракцией, которая проводится в делительной воронке емкостью 100-200мл. В воронку заливается 30 мл пробы, которая экстрагируется хлороформом из расчета на 100 мл пробы 10 мл хлороформа. После интенсивного встряхивания смеси в течение 3-4 минут ей дают отстояться до четкого разделения слоев; нижний слой отработанного хлороформа сливают, заменяя его на свежую порцию. Экстракцию повторяют 5раз.

5. ОТДУВКА ХЛОРОФОРМА

Остатки хлороформа из раствора удаляются под вакуумом водоструйного насоса до полного отсутствия запаса хлороформа /15-20 мин/. Барботируемый через раствор воздух необходимо очищать, пропуская через склянку Дрекселя с концентрированной H_2SO_4 . Установка для отдувки проб представлена на рис. 21.

Подготовленная таким образом проба подвергается диализу.



Р и с. 21. Схема установки для отдувки проб:

1 – склянка Дрекселя с концентрированной серной кислотой; 2 – колба с пробой раствора ПАА; 3 – предохранительная склянка Дрекселя

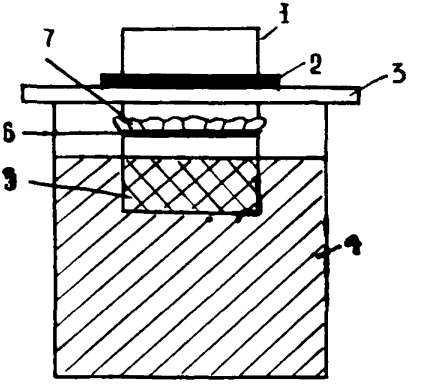
6. ДИАЛИЗ

6.1. Перед диализом необходимо подготовить целлофан, замачивая его в дистиллированной воде в течение 2 часов.

6.2. Диализатор представляет собой толстостенный полый цилиндр высотой 50–60 мм и внутренним диаметром 45 мм. На пришлифованное дно диализатора натягивается с помощью резинового кольца целлофановая пленка. В ванну диализатора (химический стакан емкостью 250 мл) заливают сантинормальный раствор соляной кислоты.

Схема диализатора представлена на рис. 22.

6.3. В диализатор заливают 10 мл раствора полимера. При погружении диализатора в ванну уровень жидкостей в диализаторе и ванне должен совпадать. Продолжительность диализа - 20-22 часа. Жидкость в ванне меняют 1 раз за период диализа на половине его, заменяя подкисленную воду на дистиллированную. По истечении указанного времени раствор из диализатора выливают в пробирку и доводят до первоначального объема /10 мл/ водой из ванны. Далее производится измерение оптической плотности /Д/ на приборе Сф-4А.



Р и с. 22. Схема диализатора:

1 - стеклянная трубка; 2 - крепежное кольцо; 3 - фиксатор диализатора; 4 - ванна диализатора; 5 - диализуемая жидкость; 6 - - резиновое кольцо; 7 - целлофановая пленка

7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ

7.1. Рабочей длиной волны является λ =225нм. Измерение Д осуществляется по отношению к воде из ванны диализатора, являющейся эталоном просвечивания.

7.2. Расчет концентрации ПАА производится по формуле:

$$C = \frac{Д71}{E \ell 10} \text{ г/дл;}$$

где Д – оптическая плотность; С – концентрация, моль/л; Е – молярный коэффициент экстинкции, $\frac{л}{моль.см}$

для λ = 225 нм; Е = 58,7 л/моль.см; ℓ – длина кюветы, см.

7.3. Для каждой пробы необходимо делать три параллельных измерения.

7.4. Коэффициент вариации опытов ν =4%. Среднеквадратичная ошибка S = 0,0012 г/дл.

Приложение № 2

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ ГИДРОЛИЗА ПАА СОВМЕСТНЫМ ВЧ И ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКИМ ТИТРОВАНИЕМ

1. СОКРАЩЕНИЯ

1.1. ПАА – полиакриламид.

1.2. ПААР – полиакриламид, полученный методом радиационной полимеризации.

1.3. ВЧ - гитрование - высокочастотное гитрование,

1.4. % моль - проценты мольные.

2. ТЕРМИНОЛОГИЯ

2.1. Степень гидролиза ПАА - отношение числа акрилатных звеньев в макромолекуле ПАА к общему числу мономерных звеньев или, что то же самое, содержание акрилатных звеньев в цепи полимера в мольных процентах.

2.2. ВЧ - гитрование - физико-химический метод анализа, основанный на измерении высокочастотной электропроводности, изменение которой используется для индикации конечной точки гитрования.

3. ОБОЗНАЧЕНИЯ:

3.1. хч - квалификация частоты реагента - химически чистый

3.2. н - нормальность раствора реагента в грамм-эквивалентах на литр.

3.3. $У_1$ - объем гитранта, пошедший на гитрование минеральной кислоты, мл,

3.4. $У_2$ - объем гитранта, пошедший на гитрование смеси минеральной кислоты и акрилатных звеньев цепи полимера, мл.

3.5. К - поправочный коэффициент к нормальности раствора гитранта.

3.6. Р - навеска раствора полимера, г.

3.7. С - концентрация раствора полимера, % вес.

3.8. А - содержание акрилатных звеньев, приходя-

щееся на 1 г полимера в мг - экв на грамм.

3.9. Э - эквивалентный вес акрилатного эвена полимера;

для известкого ПАА Э = 91,08;

" аммиачного Э = 89,09;

" ПААР Э = 94,04.

3.10. Г - степень гидролиза, % моль.

4. СУЩНОСТЬ МЕТОДА

В основу метода положено кислотно основное титрование раствора ПАА с совместным высокочастотным /ВЧ/ и потенциометрическим контролем. По кривым титрования смеси раствора ПАА и избытка минеральной кислоты раствором щелочи определяются точки начала и конца титрования акрилатных звеньев, входящих в состав цепи полимера.

5. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

5.1. Комбинированный титратор в составе:

а) ВЧ - титратора марки ТВ-6Л-1;

б) pH метр марки pH.- 673;

в) заградительный фильтр на частоту 30 мегагерц в цепи электродов pH метра.

5.2. Шприцевая микробюретка на 5 мл.

5.3. Весы технические с точностью взвешивания 0,05 г.

5.4. Стакан стеклянный лабораторный емкостью 100 мл.

5.5. Стакан стеклянный лабораторный емкостью 50 мл.

5.6. Бюретки вместимостью 10 мл.

5.7. Колонка диаметром 9 мм, длиной 300 мм с пористой стеклянной пластинкой и краном.

5.8. Натрий едкий "хч" 0,1н раствор.

5.9. Кислота серная "хч" 0,2н раствор.

5,10. Барий едкий "хч" 0,3н раствор.

5.11. Катионит КУ-2-8 в Н-форме, фракция 0,5-1,0 мм.

5.12. Азот - газ.

6. ПРОВЕДЕНИЕ АНАЛИЗА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ СТЕПЕНИ ГИДРОЛИЗА ИЗВЕСТКОВОГО ПАА И ПААР

6.1. В стакан на 100 мл берут на технических весах навеску /90г/ 0,05%-ного раствора ПАА /см. примечание/ . Стакан помещают в ячейку титратора ВЧ-титратора. В раствор погружают электроды pH метра и, включив перемешивание, добавляют из бюретки 0,2 н раствор серной кислоты до pH=3,20+0,05.

6.2. В раствор через капилляр пропускают ток азота в течение 10 минут. Переключатель чувствительности ВЧ титратора ставят в положение "1", ручками "установка шкалы" показания титратора выводят на "0". Проводят титрование раствора полимера 0,1 н раствором NaOH из шприцевой бюретки, добавляя титрант порциями по 0,02 мл и снимая показания ВЧ - титратора и pH мет-

ра. Титрование заканчивают после того как pH раствора достигнет значения 10,5 - 11.

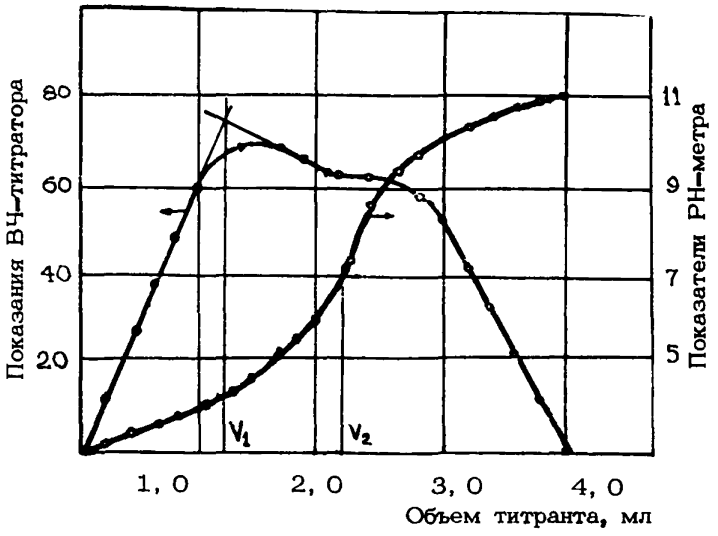
7. ПРОВЕДЕНИЕ АНАЛИЗА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ СТЕПЕНИ ГИДРОЛИЗА АММИАЧНОГО ПАА

Колонку диаметром 9 мм, длиной 300 мм заполняют на высоту 200 мм катионитом и промывают дистиллированной водой до нейтральной реакции. В стакан на 50 мл на технических весах берут навеску /30г/ 1% раствора ПАА. /Примечание /. Раствор пропускают через колонку с ионитом, собирая фильтрат в стакан на 100 мл, в котором будет проводиться титрование. Стакан промывают дистиллированной водой и промывные воды пропускают через катионит вслед за полимером, доводя объем фильтрата до 80 мл. Проверяют полноту отмывки колонки по нейтральной реакции фильтрата, выходящего из колонки. Стакан помещают в ячейку титратора. В раствор погружают электроды pH метра, включают перемешивание и добавляют из бюретки 0,3 н раствор $Ba(OH)_2$ до pH=3,20± 0,05. Далее анализ ведут аналогично анализу известкого ПАА / по тексту раздела 6.2./.

Примечание. Концентрацию раствора полимера подбирают так, чтобы на все титрование было затрачено 3–5 мл титранта.

8. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

8.1. Строят графики зависимости показаний приборов /ВЧ-титратора и pH метра/ от количества добавлен-



Р и с 23. Титрирование известкового ПАА

ного титранта, получают две кривые титрования.

8.2. Типичные кривые, полученные при анализе известкового ПАА, показаны на рис. 23. По ВЧ-кривой титрования определяют V_1 - объем титранта, пошедший на титрование избытка минеральной кислоты; он соответствует точке пересечения двух прямых, одна из которых проведена через начальные точки /когда показания титратора линейно возрастают/, другая - через последующие точки /показания титратора линейно уменьшаются/. По скачку потенциометрической кривой определяют V_2 - объем титранта, пошедший на титрование смеси минеральной кислоты и акрилатов.

8.3. Рассчитывают содержание акрилатов в 1 г ПАА по формуле:

$$A = \frac{0{,}1 \cdot (V_2 - V_1) \cdot K \cdot 100}{P \cdot C} \text{ мг-экв/г.}$$

8.4. Рассчитывают степень гидролиза ПАА по формуле:

$$\Gamma = \frac{A \cdot 100}{A + \frac{1000 - A \cdot Э}{71{,}08}}, \text{ \% моль;}$$

Приложение № 3

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНОГО ВЕСА ПАА ВИСКОЗИМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

1. ОБОЗНАЧЕНИЯ:

τ – время истечения раствора полимера, с;

τ_0 – время истечения растворителя, с;

η – вязкость раствора полимера;

η_0 – вязкость растворителя;

$\eta_{от}$ – относительная вязкость;

$\eta_{уд}$ – удельная вязкость;

$[\eta]$ – характеристическая вязкость; 100 мл/г;

C – концентрация полимера, г/200 мм;

M – молекулярный вес.

2. ТЕРМИНОЛОГИЯ

Характеристическая вязкость /предельное число вязкости/ – условный показатель, определяющий относи-

тельный прирост вязкости низкомолекулярного растворителя при введении в него полимера. Эта величина относится к случаю, когда отсутствуют взаимодействия макромолекул друг с другом, т.е. при бесконечном разбавлении.

По своему физическому смыслу характеристическая вязкость является мерой дополнительных потерь энергии при течении раствора, связанных с вращением и вязкоупругими деформациями макромолекул в потоке.

Относительная вязкость /соотношение вязкостей/ - отношение вязкостей раствора полимера и растворителя, измеренных в одинаковых условиях.

Удельная вязкость - отношение разности вязкостей раствора и растворителя к вязкости растворителя.

Приведенная вязкость /число вязкости/ - отношение удельной вязкости раствора полимера к его концентрации. Специального обозначения не имеет.

3. СУЩНОСТЬ МЕТОДА

3.1. Вискозиметрия - наиболее простой и доступный метод определения молекулярного веса полимеров. Однако этот метод является косвенным, т.е. необходимо предварительно определить константы в уравнении, выражающем зависимость вязкости от молекулярного веса.

Так как при небольших концентрациях полимера (менее 1 г на 100 см^3) $\eta/\eta_0 \approx \tau/\tau_0$, то определение вязкости сводится к измерению времени истечения равных объемов раствора и растворителя через капилляр вискозиметра при заданной постоянной температуре.

3.2. Влияние концентрации на результаты измерений исключается путем измерения вязкостей растворов нескольких концентраций и экстраполяции результатов на нулевую концентрацию:

$$[\eta]=\lim_{c\to 0}\frac{\eta-\eta_0}{\eta_0 c}=\lim\frac{\eta_{уд}}{c}.$$

Для этого строят график в координатах $\frac{\eta_{уд}}{c}-c$ Через полученные точки проводят прямую до пересечения с осью ординат. Отсекаемый отрезок на оси ординат соответствует искомой величине характеристической вязкости.

3.3. Экстраполяция осуществляется с помощью метода наименьших квадратов, позволяющего оценить разброс экспериментальных точек и найти доверительный интервал для характеристической вязкости.

3.4. В качестве растворителя используется 10%-ный водный раствор хлористого натрия.

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

4.1. Вискозиметр Убеллоде с диаметром капилляра 0,5-0,6 мм и временем истечения растворителя примерно 100 с.

4.2. Термостат.

4.3. Приспособление для установки вискозиметра.

4.4. Стеклянный фильтр с диаметром пор 100 мк.

4.5. Бюретки на 50 мл для дозирования раствора и растворителя.

4.6. Аналитические весы.

4.7. Посуда для приготовления растворов.

4.8. Секундомер с ценой деления 0,2 с.

4.9. Хлористый натрий классификации "ХЧ", 10%-ный раствор.

5. ПОДГОТОВКА К ИЗМЕРЕНИЯМ

5.1. Подготовка вискозиметра.

Вискозиметр промывают хромовой смесью, большим количеством воды, ополаскивают дистиллированной водой, спиртом, обеспыленным эфиром и сушат без доступа пыли.

5.2. Приготовление раствора полимера.

Раствор полимера для определения вязкости готовят растворением полимера в мерной колбе. Для этого навеску сухого полимера переносят в мерную колбу и заливают небольшим количеством растворителя. Для предотвращения слипания набухших гелеобразных частиц полимера колбу с раствором периодически слегка встряхивают. Полнота растворения определяется визуально. После растворения полимера раствор доливается до метки растворителем и перемешивается.

Концентрация исходного раствора / С / подбирается таким образом, чтобы его относительная вязкость $\eta_{от} = \frac{\tau}{\tau_0}$ была приблизительно равна 1.5.

6. ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

6.1. В высушенный вискозиметр дозируют из бюретки 10 мл отфильтрованного через стеклянный фильтр раствора полимера, устанавливают вискозиметр в термо-

стате в вертикальном положении и термостатируют 10-15 мин при 25± 0,01°С, затем трижды промывают вискозиметр раствором ПАА и измеряют не менее 5 раз время истечения раствора.

6.2. Для получения еще четырех концентраций в вискозиметр добавляют последовательно 2,5; 4,2; 8,3 и 25 мл отфильтрованного растворителя. После каждого разбавления раствор тщательно перемешивают, термостатируют и проводят измерения вышеописанным способом.

6.3. По окончании измерений раствор сливают и вискозиметр тщательно /3-4 раза/ промывают отфильтрованным растворителем.

6.4. После термостатирования определяют время истечения растворителя.

6.5. Результаты измерений заносят в таблицу:

τ	$\frac{\tau}{\tau_0}$	$\frac{\tau}{\tau_0}-1$	$\left(\frac{\tau}{\tau_0}-1\right)/K$	K	$y=a+Kb$	Δ	Δ^2
1	2	3	4	5	6	7	8
				1,0			
				0,8			
				0,6			
				0,4			
				0,2			
		$\sum=Q_1$	$\sum=Q_2$				$\sum=Q_3$

где K'' – стандартный ряд разбавлений/ отношение концентрации полимера после разбавления к исходной концентрации/; a и b – постоянные в уравнении прямой, про-

ходящей через экспериментальные точки, которые вычисляются при принятом значении "К" по методу наименьших квадратов из следующих уравнений:

$$b = \frac{5Q_1 - 3Q_2}{}\ ;$$

$$a = \frac{Q_2 - 3b}{5}\ ,$$

Δ – разность значений приведенной вязкости в графах 6 и 4 .

6.6. Окончательный расчет характеристической вязкости проводят по формуле:

$$[\eta] = \frac{a \pm 3{,}18\sqrt{0{,}367 \cdot Q_3}}{c_1} = \frac{a \pm 1{,}926\sqrt{Q_3}}{c_1}$$

Доверительный интервал вычисляется для 95%-ной надежности и числа степеней свободы $f = 5-2-3$.

7. ВЫЧИСЛЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНОГО ВЕСА ПОЛИАКРИЛАМИДА

Молекулярный вес полимера, вычисляют, подставляя полученное из опыта значение в уравнение:

$$[\eta] = 4{,}03 \cdot 10^{-5} \cdot M^{0{,}8}$$

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
1. Общие положения	3
2. Терминология	6
3. Физические основы и степень изученности метода заводнения с полимерами	11
4. Требования, предъявляемые к водорастворимым полимерам	13
5. Водорастворимые полимеры, пригодные для загущения закачиваемой в пласт воды	16
6. Исходные данные для проектирования	21
6.1. Проверка совместимости полимера с закачиваемой в пласт водой	22
6.2. Растворимость полимера в воде	24
6.3. Вязкостная характеристика растворов полимеров	32
6.4. Определение фильтрационных, реологических, нефтевытесняющих и адсорбционных характеристик растворов полимеров	37
6.5. Типичные реологические характеристики	50
7. Область эффективного применения растворов полимеров и критерии выбора объектов, пригодных для полимерного заводнения	58
8. Методики расчета показателей процесса вытеснения нефти оторочкой раствора полимера	67
9. Расчет основных показателей разработки месторождений при полимерном заводнении	86
9. 1. Выбор рациональной системы разработки	86

9.2. Оценка запасов, охваченных процессом 88

9.3. Исходные данные для расчета основных показателей процесса 89

9.4. Выбор оптимального размера оторочки раствора полимера и его концентрации 90

9.5. Расчет показателей разработки залежи по вариантам и выбор оптимального варианта 95

10. Исследование скважин и пласта, контроль за разработкой при осуществлении полимерного заводнения 96

11. Методы оценки технологической эффективности применения полимеров для увеличения нефтеотдачи пластов, построение характеристик вытеснения 98

12. Методика определения экономической эффективности применения полимерного заводнения при разработке нефтяных месторождений 102

13. Техника и оборудование, применяемые при разработке нефтяных месторождений с использованием полимеров 107

14. Транспорт и хранение реагентов-загустителей 119

15. Промсанитария и техника безопасности 120

16. Мероприятия по защите окружающей среды 122

Приложения 122

Институт "Типровостокнефть"

Заказ № 388 Тираж 500 экз.

gost.e-ecolog.ru