

**Ю.П. Желтов**

**Разработка нефтяных  
месторождений**

**Москва  
«Книга по Требованию»**

УДК 55  
ББК 26.3  
Ю11

Ю11      **Ю.П. Желтов**  
Разработка нефтяных месторождений / Ю.П. Желтов – М.: Книга по Требованию, 2013. – 332 с.

**ISBN 978-5-458-34874-4**

Рассмотрены фундаментальные представления разработки нефтяных месторождений, методы построения моделей нефтяных пластов и происходящих в них процессов. Изложены методики расчетов разработки нефтяных месторождений при естественных режимах и искусственном воздействии на них закачкой воды, различных веществ, а также созданием внутрипластовых процессов, связанных с изменением физико-химического состояния и температурного режима разрабатываемых объектов. Приведены методики выбора оптимальных вариантов разработки, методы и способы проектирования контроля, анализа и регулирования разработки. Для студентов нефтяных вузов и факультетов, обучающихся по специальности «Технология и комплексная механизация разработки нефтяных и газовых месторождений».

**ISBN 978-5-458-34874-4**

© Издание на русском языке, оформление

«YOYO Media», 2013

© Издание на русском языке, оцифровка,

«Книга по Требованию», 2013

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, кляксы, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



## ВВЕДЕНИЕ

---

Разработкой нефтяных месторождений называют осуществление научно обоснованного процесса извлечения из недр содержащихся в них углеводородов и сопутствующих им полезным ископаемым. Этот процесс включает разбуривание месторождений и выработку запасов нефти и газа.

Наука о разработке нефтяных месторождений относится к горным наукам. Горное дело — древнейший род занятий человека. Находить полезные ископаемые и пользоваться ими человек начал в каменном и бронзовом веках. Сами названия этих эпох в развитии человечества связаны с добычей и изготовлением орудий из камня и бронзы, т. е. с горным делом.

В более позднее время (в конце XIX в.) для добычи нефти стали сооружать скважины.

Первая скважина на территории нашей страны была пробурена ударным способом в 1864 г. в долине р. Кудако на Кубани русским предпринимателем А. Н. Новосильцевым. В 1871 г. пробурили механическим способом скважину в Бакинском районе. С 70—80-х гг. XIX и особенно с начала XX в. быстро развивается механическое бурение скважин и происходит интенсивное увеличение добычи нефти в России.

Однако, несмотря на бурный рост числа разведочных и добывающих нефть скважин и объема добычи нефти, выработка недр в начале XX в. осуществлялась путем нерегулируемой разработки месторождений на естественных режимах. В те годы еще не существовало научных основ добычи нефти, хотя над различными проблемами нефти, начиная с ее происхождения, геологии и разведки до транспорта, переработки и использования, работали многие крупнейшие ученые и инженеры России, в том числе Д. И. Менделеев, А. М. Бутлеров, И. М. Губкин, В. Г. Шухов.

Даже в начале 20-х гг. XX в. не были известны или не использовались подавляющее большинство фундаментальных представлений о физике и механике нефтяных пластов и процессах извлечения из них нефти и газа. При этом основной закон фильтрации был открыт французским инженером Анри Дарси еще в 1856 г. при изучении движения воды в фильтрах водоочистных сооружений. Как оказалось впоследствии, уравнения установившейся и неустановившейся фильтрации нефти аналогичны уравнениям математической физики Лапласа и Фурье, открытым в начале XIX в. Однако при разработке нефтяных месторождений эти уравнения стали использовать только в 30-х гг. XX в.

Одним из главных достижений в теории разработки нефтяных и газовых месторождений было установление основных сил,

движущих нефть и газ к забоям скважин, т. е. основание учения о режимах нефтяных и газовых месторождений. В создание этого учения большой вклад внесен И. М. Губкиным, Л. С. Лейбензоном, И. Н. Стрижовым, А. П. Крыловым, С. А. Христиановичем, Ф. А. Требиным, Б. Б. Лапуком, И. А. Чарным, В. Н. Щелкачевым, Маскетом, Виковым, Ботсетом, Левереттом. В середине 30-х гг. теория режимов нефтяных пластов и режима растворенного газа. Следует отметить, что еще в начале 20-х гг. этого века Л. С. Лейбензоном получено дифференциальное уравнение фильтрации газа и положено начало теории разработки газовых месторождений.

В 20-х и в начале 30-х гг. этого века прогнозирование разработки нефтяных месторождений производилось в основном путем построения фактических зависимостей показателей разработки от времени, полученных в начальный период разработки, статистической обработки этих показателей и их экстраполяции на будущее.

Математические методы теории фильтрации, уже значительно развитые к этому времени Тергаци, Н. Е. Жуковским, Н. Н. Павловским, еще не нашли применения в нефтяном деле. Развитию и использованию в разработке нефтяных месторождений методов этой теории существенным образом способствовали известные работы американского ученого Маскета.

Несмотря на значительный прогресс в области теории фильтрации нефти и газа и в ее применении для расчетов добычи нефти, достигнутый в конце 30-х и в начале 40-х гг., разработка нефтяных месторождений как самостоятельная инженерная дисциплина еще не оформилась.

Основные положения теории разработки нефтяных месторождений, касающиеся научно обоснованного выбора систем и технологий разработки, еще не были созданы в начале 40-х гг. В США, например, долгое время такой важнейший параметр, как расстояния между скважинами (плотность сетки скважин), устанавливали не на основе данных исследований, анализа и общего принципа разработки месторождений, а административным путем по нормам дебитов скважин, право определять которые было дано Техасской железнодорожной комиссии.

Решающую роль в создании разработки нефтяных месторождений как самостоятельной области науки и учебной дисциплины сыграла основополагающая работа А. П. Крылова, М. М. Глотовского, М. Ф. Мирчинка, Н. М. Николаевского и И. А. Чарного «Научные основы разработки нефтяных месторождений», вышедшая в свет в 1948 г. в Гостоптехиздате. В этой работе была дана первая формулировка основного принципа разработки, заложен фундамент проектирования разработки нефтяных месторождений, решен ряд важных задач подземной гидромеханики, а наука о разработке нефтяных место-

рождений представлена как комплексная область знаний, использующая достижения нефтяной геологии и геофизики, подземной гидродинамики, эксплуатации скважин и прикладной экономики.

Выход в свет указанной работы существенным образом способствовал развитию методов разработки нефтяных месторождений с воздействием на пластины путем заводнения. Конец 40-х и 50-е гг. ознаменовались резким ростом числа исследований в области разработки нефтяных месторождений, развитием новых направлений в этой области. Было значительно продвинуто вперед решение проблемы разработки нефтяных месторождений при смешанных режимах — водонапорном и растворенного газа. Начали интенсивно развиваться методы определения параметров пластов с использованием гидродинамических исследований скважин. Были созданы методические основы расчета разработки нефтяных месторождений с применением вероятностно-статистических моделей. Развивались также методы непосредственного учета неоднородности при фильтрации в нефтяных пластах.

В 50-е гг. возникли и стали развиваться новые модели нефтяных пластов (трещиноватых и трещиновато-пористых), а также методы анализа и регулирования разработки нефтяных месторождений. Существенное развитие получили и сами системы их разработки. Наряду с известными из американской практики площадными системами появились сначала системы с внутренним контурным разрезанием месторождений рядами нагнетательных скважин и расположением добывающих скважин вдоль линий разрезания, а затем современные блоково-рядные системы.

В конце 50-х и в начале 60-х гг. начали исследовать глубокозалегающие нефтяные месторождения, разрабатываемые в условиях сильной, в ряде случаев неупругой деформации горных пород.

Развитие проектирования, анализа и регулирования разработки нефтяных месторождений требовало использования сложных математических методов и вычислительных средств. В 30-е и 50-е гг. при расчетах использовали в основном точные и приближенные методы решения задач подземной гидродинамики, а в конце 50-х и в 60-х гг. стали применять численные методы решения задач фильтрации.

В конце 50-х и начале 60-х гг. заводнение стало в СССР основным методом воздействия на нефтяные пластины. Однако в эти же годы стало ясным, что таким способом нельзя полностью решить проблему максимального извлечения нефти из недр, особенно при разработке высоковязких и высокопарафинистых нефтей. Были проведены фундаментальные исследования и даны инженерные решения, послужившие основой развития тепловых методов разработки нефтяных месторождений, связанных с закачкой в пласт теплоносителей и внутрипластовым горением. В эти же годы во всем мире огромное внимание было уделено развитию физико-химических методов извлечения нефти из недр,

таких, как вытеснение нефти углеводородными растворителями, двуокисью углерода, полимерными и мицеллярно-полимерными растворами.

Расчет сложных процессов разработки нефтяных месторождений потребовал учета не только многофазности потоков в пластах, но и их многокомпонентности, фазовых переходов, изменчивости свойств фильтрующихся в пластах веществ, т. е. использования теории многофазной многокомпонентной фильтрации.

Разработка нефтяных месторождений — интенсивно развивающаяся область науки. Дальнейшее ее развитие будет связано с применением новых технологий извлечения нефти из недр, новых методов распознавания характера протекания внутрипластовых процессов, управлением разработкой месторождений, использованием совершенных методов планирования разведки и разработки месторождений с учетом данных смежных отраслей народного хозяйства, применением автоматизированных систем управления процессами извлечения полезных ископаемых из недр, развитием методов детального учета строения пластов и характера протекающих в них процессов на основе детерминированных моделей, реализуемых на мощных ЭВМ.

Разработка нефтяных месторождений связана с существенным вмешательством человека в природу и поэтому требует безусловного соблюдения установленных норм по охране недр и окружающей среды.

Советское государство с момента его образования рассматривает охрану и рациональное использование недр как одну из важнейших задач. После Великой Октябрьской социалистической революции недра бывшей Российской империи были национализированы и стали народным достоянием.

В связи с быстрым развитием горнодобывающей индустрии в СССР, особенно бурным ростом добычи нефти и газа, возникла настоятельная необходимость принятия комплекса обязательных мер по рациональной эксплуатации недр и резкому снижению потерь полезных ископаемых.

В 1972 г. вышло постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР «Об усилении охраны природы и улучшении использования природных ресурсов», в 1975 г. Верховным Советом СССР приняты Основы законодательства СССР и союзных республик о недрах.

Все проектные документы по разработке нефтяных месторождений обязательно следует включать разделы, связанные с охраной земли, воды и воздуха путем использования замкнутых производственных циклов, предусматривающих герметичный сбор нефти, газа и воды, очистку добываемой воды и дальнейшее ее использование для закачки в пласт, утилизацию нефтяного газа, регенерацию химических веществ, применяемых для повышения нефтеотдачи пластов, и их дальнейшее использование.

Наиболее полное извлечение нефти, газа и конденсата из месторождений — главное направление рационального использования недр.

Важное значение имеет осуществление во всех звеньях народного хозяйства, в том числе во всех технологических процессах разработки нефтяных и газовых месторождений, энергосберегающих мероприятий. Необходимо стремиться к использованию таких технологий извлечения и таких вариантов подъема на дневную поверхность, подготовки и транспорта нефти и газа, которые характеризуются по возможности меньшими затратами энергии на тонну добываемых нефти и газа, ликвидировать потери и бессмысленное сжигание углеводородов.

Разработка нефтяных месторождений как учебная дисциплина принадлежит к категории инженерных дисциплин. Ей свойственно не только качественное, но и, главным образом, количественное изучение нефтяных месторождений и протекающих в них процессов, а также подготовка инженерных решений — проектов, представляемых не в описательном, а в количественном виде. Поэтому во всех разделах данного курса используются математические методы. Можно даже подчеркнуть, что разработка нефтяных месторождений — одна из наиболее насыщенных математическими методами инженерных дисциплин. Объясняется это обстоятельство отчасти тем, что инженеры-разработчики не имеют непосредственного доступа к объектам своей деятельности (нефтяным пластам) и даже начинают их познавать не путем непосредственных измерений, а на основе математической обработки данных геофизических и гидродинамических исследований скважин. Процессы, протекающие в нефтяных пластах во время их разработки, инженеры-разработчики могут распознавать количественно только по проявлениям этих процессов в скважинах путем решения так называемых обратных математических задач.

В курсе разработки нефтяных месторождений комплексно используют многие важные положения геологии, геофизики, физики пласта, подземной гидрогазомеханики, механики горных пород, технологий эксплуатации скважин и систем добычи нефти, экономики и планирования.

Вместе с тем разработка нефтяных месторождений — это не конгломерат геологии, подземной гидромеханики, технологий добычи нефти и экономики, а самостоятельная комплексная область науки и инженерная дисциплина, имеющая свои специальные разделы, связанные с учением о системах и технологиях разработки месторождений, планированием и реализацией основного принципа разработки, проектированием и регулированием разработки месторождений.

## Глава I

# СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ НЕФТИНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

---

### § 1. ОБЪЕКТ И СИСТЕМА РАЗРАБОТКИ

Нефтяные и нефтегазовые месторождения — это скопления углеводородов в земной коре, приуроченные к одной или нескольким локализованным геологическим структурам, т. е. структурам, находящимся вблизи одного и того же географического пункта. Залежи углеводородов, входящие в месторождения, обычно находятся в пластах или массивах горных пород, имеющих различное распространение под землей, часто — различные геолого-физические свойства. Во многих случаях отдельные нефтегазоносные пласти разделены значительными толщами непроницаемых пород или находятся только на отдельных участках месторождения.

Такие обособленные или отличающиеся по свойствам пласти разрабатывают различными группами скважин, иногда при этом используют различную технологию.

Введем понятие об объекте разработки месторождения. Объект разработки — это искусственно выделенное в пределах разрабатываемого месторождения геологическое образование (пласт, массив, структура, совокупность пластов), содержащее промышленные запасы углеводородов, извлечение которых из недр осуществляется при помощи определенной группы скважин или других горнотехнических сооружений. Разработчики, пользуясь распространенной у нефтяников терминологией, обычно считают, что каждый объект разрабатывается «своей сеткой скважин». Необходимо подчеркнуть, что сама природа не создает объекты разработки — их выделяют люди, разрабатывающие месторождение. В объект разработки может быть включен один, несколько или все пласти месторождения.

Основные особенности объекта разработки — наличие в нем промышленных запасов нефти и определенная, присущая данному объекту группа скважин, при помощи которых он разрабатывается. При этом нельзя утверждать обратное, поскольку одними и теми же скважинами можно разрабатывать различные объекты путем использования технических средств для одновременно-раздельной эксплуатации.

Чтобы лучше усвоить понятие объекта разработки, рассмотрим пример. Пусть имеем месторождение, разрез которого показан на рис. 1. Это месторождение содержит три пласта, отличающиеся толщиной, областями распространения насыщаю-

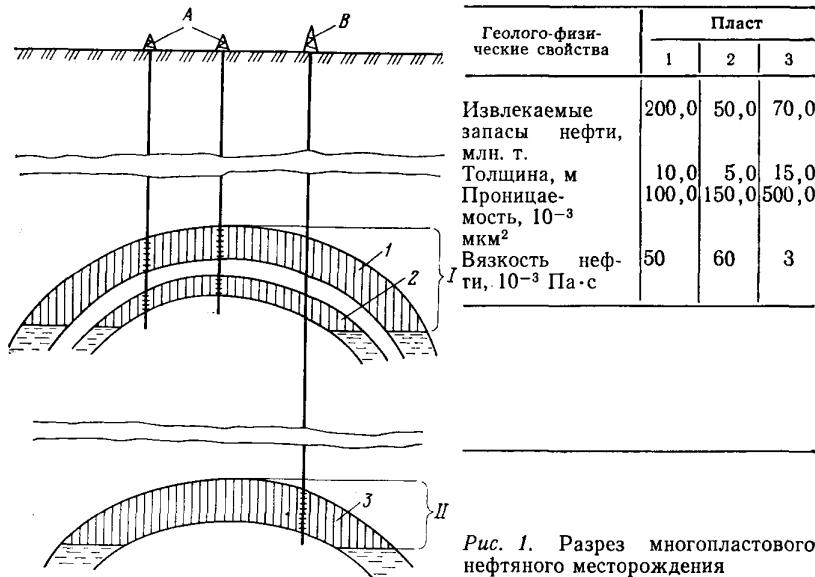


Рис. 1. Разрез многопластового нефтяного месторождения

ших их углеводородов и физическими свойствами. В таблице приведены основные свойства пластов 1, 2 и 3, залегающих в пределах месторождения. Можно утверждать, что на рассматриваемом месторождении целесообразно выделить два объекта разработки, объединив пласты 1 и 2 в один объект разработки (объект I), а пласт 3 разрабатывать как отдельный объект (объект II).

Включение пластов 1 и 2 в один объект обусловлено тем, что они имеют близкие значения проницаемости и вязкости нефти и находятся на небольшом расстоянии друг от друга по вертикали. К тому же извлекаемые запасы нефти в пласте 2 сравнительно невелики. Пласт 3 хотя и имеет меньшие по сравнению с пластом 1 извлекаемые запасы нефти, но содержит маловязкую нефть и высокопроницаемый. Следовательно, скважины, вскрывшие этот пласт, будут высокопродуктивными. Кроме того, если пласт 3, содержащий маловязкую нефть, можно разрабатывать с применением обычного заводнения, то при разработке пластов 1 и 2, характеризующихся высоковязкой нефтью, придется с начала разработки применять иную технологию, например вытеснение нефти паром, растворами поликариламида (загустителя воды) или при помощи внутримастового горения.

Вместе с тем следует учитывать, что, несмотря на существенное различие параметров пластов 1, 2 и 3, окончательное решение о выделении объектов разработки принимают на основе анализа технологических и технико-экономических показателей

различных вариантов объединения пластов в объекты разработки.

Объекты разработки иногда подразделяют на следующие виды: самостоятельный, т. е. разрабатываемый в данное время, и возвратный, т. е. тот, который будет разрабатываться скважинами, эксплуатирующими в этот период другой объект.

Системой разработки нефтяного месторождения следует называть совокупность взаимосвязанных инженерных решений, определяющих объекты разработки; последовательность и темп их разбуривания и обустройства; наличие воздействия на пласты с целью извлечения из них нефти и газа; число, соотношение и расположение нагнетательных и добывающих скважин; число резервных скважин, управление разработкой месторождения, охрану недр и окружающей среды. Построить систему разработки месторождения означает найти и осуществить указанную выше совокупность инженерных решений.

Важная составная часть создания такой системы — выделение объектов разработки. Поэтому рассмотрим этот вопрос более подробно. Заранее можно сказать, что объединение в один объект как можно большего числа пластов на первый взгляд всегда представляется выгодным, поскольку при таком объединении потребуется меньше скважин для разработки месторождения в целом. Однако чрезмерное объединение пластов в один объект может привести к существенным потерям в нефтеотдаче и в конечном счете к ухудшению технико-экономических показателей. На выделение объектов разработки влияют следующие факторы.

1. Геолого-физические свойства пород-коллекторов нефти и газа. Резко отличающиеся по проницаемости, общей и эффективной толщине, а также неоднородности пласты во многих случаях нецелесообразно разрабатывать как один объект, поскольку они могут существенно отличаться по продуктивности, пластовому давлению в процессе их разработки и, следовательно, по способам эксплуатации скважин, скорости выработки запасов нефти и изменению обводненности продукции.

Для различных по площадной неоднородности пластов могут быть эффективными различные сетки скважин, так что объединять такие пласты в один объект разработки оказывается нецелесообразным. В сильно неоднородных по вертикали пластах, имеющих отдельные низкопроницаемые пропластки, не сообщающиеся с высокопроницаемыми, бывает трудно обеспечить приемлемый охват горизонта воздействием по вертикали вследствие того, что в активную разработку включаются только высокопроницаемые пропластки, а низкопроницаемые прослои не подвергаются воздействию закачиваемого в пласт агента (воды, газа). С целью повышения охвата таких пластов разработкой их стремятся разделить на несколько объектов.

2. Физико-химические свойства нефти и газа. Важное значение при выделении объектов разработки имеют свойства неф-

тей. Пласти с существенно различной вязкостью нефти бывает нецелесообразно объединять в один объект, так как их можно разрабатывать с применением различной технологий извлечения нефти из недр с различными схемами расположения и плотностью сетки скважин. Резко различное содержание парафина, сероводорода, ценных углеводородных компонентов, промышленное содержание других полезных ископаемых также может стать причиной невозможности совместной разработки пластов как одного объекта вследствие необходимости использования существенно различной технологии извлечения нефти и других полезных ископаемых из пластов.

3. Фазовое состояние углеводородов и режим пластов. Различные пласти, залегающие сравнительно недалеко друг от друга по вертикали и имеющие сходные геолого-физические свойства, в ряде случаев бывает нецелесообразно объединять в один объект в результате различного фазового состояния пластовых углеводородов и режима пластов. Так, если в одном пласте имеется значительная газовая шапка, а другой разрабатывается при естественном упруговодонапорном режиме, то объединение их в один объект может оказаться нецелесообразным, так как для их разработки потребуются различные схемы расположения и числа скважин, а также различная технология извлечения нефти и газа.

4. Условия управления процессом разработки нефтяных месторождений. Чем больше пластов и пропластков включено в один объект, тем технически и технологически труднее осуществлять контроль за перемещением разделов нефти и вытесняющего ее агента (водонефтяных и газонефтяных разделов) в отдельных пластах и пропластках, труднее осуществлять раздельное воздействие на пропластки и извлечение из них нефти и газа, труднее изменять скорости выработки пластов и пропластков. Ухудшение условий управления разработкой месторождения ведет к уменьшению нефтеотдачи.

5. Техника и технология эксплуатации скважин. Могут быть многочисленные технические и технологические причины, приводящие к целесообразности или нецелесообразности применения отдельных вариантов выделения объектов. Например, если из скважин, эксплуатирующих какой-то пласт или группы пластов, выделенных в объекты разработки, предполагается отбирать настолько значительные дебиты жидкости, что они будут предельными для современных средств эксплуатации скважин. Поэтому дальнейшее укрупнение объектов окажется невозможным по технической причине.

В заключение следует еще раз подчеркнуть, что влияние каждого из перечисленных факторов на выбор объектов разработки должно быть сначала подвергнуто технологическому и технико-экономическому анализу и только после него можно принимать решение о выделении объектов разработки.

## § 2. КЛАССИФИКАЦИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМ РАЗРАБОТКИ

Данное в предыдущем параграфе определение системы разработки нефтяного месторождения — общее, охватывающее весь комплекс инженерных решений, обеспечивающих ее построение для эффективного извлечения полезных ископаемых из недр. Для характеристики различных систем разработки месторождений в соответствии с этим определением системы необходимо использовать большое число параметров. Однако на практике системы разработки нефтяных месторождений различают по двум наиболее характерным признакам:

- 1) наличию или отсутствию воздействия на пласт с целью извлечения нефти из недр;
- 2) расположению скважин на месторождении.

По этим признакам классифицируют системы разработки нефтяных месторождений. Можно указать четыре основных параметра, которыми характеризуют ту или иную систему разработки.

1. Параметр плотности сетки скважин  $S_c$ , равный площади нефтеносности, приходящейся на одну скважину, независимо от того, является скважина добывающей или нагнетательной. Если площадь нефтеносности месторождения равна  $S$ , а число скважин на месторождении  $n$ , то

$$S_c = S/n. \quad (I.1)$$

Размерность  $[S_c] = \text{м}^2/\text{скв}$ . В ряде случаев используют параметр  $S_{cd}$ , равный площади нефтеносности, приходящейся на одну добывающую скважину.

2. Параметр А. П. Крылова  $N_{kp}$ , равный отношению извлекаемых запасов нефти  $\bar{N}$  к общему числу скважин на месторождении:

$$N_{kp} = \bar{N}/n. \quad (I.2)$$

Размерность параметра  $[N_{kp}] = \text{т}/\text{скв}$ .

3. Параметр  $\omega$ , равный отношению числа нагнетательных скважин  $n_n$  к числу добывающих скважин  $n_d$ :

$$\omega = n_n/n_d. \quad (I.3)$$

Параметр  $\omega$  безразмерный.

4. Параметр  $\omega_p$ , равный отношению числа резервных скважин, бурящихся дополнительно к основному фонду скважин на месторождении к общему числу скважин. Резервные скважины бурят с целью вовлечения в разработку частей пласта, не охваченных разработкой в результате выявившихся в процессе эксплуатационного его разбуривания не известных ранее особенностей геологического строения этого пласта, а также физических свойств нефти и содержащих ее пород (литологической неоднородности, тектонических нарушений, неньютоновских свойств