

Сабаев Вячеслав Владимирович

**МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ
ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТКИ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
(с использованием технологии гидравлического разрыва пласта)**

Специальность – 08.00.13

«Математические и инструментальные методы экономики»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата экономических наук

Самара

2006

Диссертация выполнена на кафедре «Экономика промышленности» при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный технический университет»

Научный руководитель: - доктор экономических наук, профессор
Ладошкин Альберт Иванович

Официальные оппоненты: - доктор экономических наук, профессор
Агафонова Валентина Васильевна
- кандидат экономических наук
Макаров Андрей Николаевич

Ведущая организация: - Научно-Исследовательский Проектный
Институт ООО «Самара НИПИ нефть»

Защита состоится 26 декабря 2006 г. на заседании диссертационного совета ДМ212.215.01 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета

Автореферат разослан 24 ноября 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор экономических наук, доцент
М.Г. Сорокина



ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Эффективность эксплуатации нефтяных месторождений во многом зависит от того насколько правильно происходит планирование комплекса мероприятий по разработке месторождения на первоначальном этапе. Это связано с характерными чертами отрасли такими как высокая капиталоемкость нефтедобывающего производства и низкая мобильность активов предприятия на этапе эксплуатации месторождения.

Необходимость использования новых технологий интенсификации добычи и методов оптимизации разработки связана с истощением запасов и постоянным ростом спроса на нефтепродукты. В условиях конкурентной среды предприятиям необходимо действовать максимально агрессивно в вопросах снижения себестоимости добычи, увеличения уровня рентабельности и минимизации сроков окупаемости капиталовложений.

Вопросами повышения эффективности нефтедобычи и оптимизацией параметров сетки разработки и параметров гидравлического разрыва пласта (ГРП) занимались и занимаются многие научные работники и организаторы производства, как в России, так и за рубежом. Заметную роль здесь сыграли результаты исследований, опубликованные в трудах Р.Д. Каневской, С.В. Контантинова, S.A. Holditch, M. Economides, P. Valko, J. Mach, D. Wolcott и др.

Переход к рыночным отношениям в России и закономерное истощение запасов углеводородного сырья требует от хозяйствующих субъектов повышения эффективности работы, необходимым условием которого является продолжение исследований в данном направлении.

Анализ динамики капитальных затрат шести крупнейших нефтедобывающих компаний России за период с 2001 по 2005 год выявил неуклонный их рост. Наряду с этим наблюдался рост себестоимости подъема нефти. Это связано с тем, что в предыдущие годы интенсификация добычи проводилась на лучших участках, а эксплуатационное бурение оказывает незначительное влияние на снижение себестоимости. Для сохранения темпов добычи и контроля над ее себестоимостью необходимо внедрение новых методов оптимизации эксплуатации нефтяных месторождений.

В настоящее время все больше внимания уделяется эффективности используемых систем разработки и эффективности ГРП как одного из элементов этой системы. Однако комплексный экономический подход с техническими особенностями процесса нефтедобычи для решения данных проблем не применялся. Именно решение данных вопросов и определяет актуальность темы исследования.

Цель исследований состоит в разработке моделей и методов повышения экономической эффективности разработки нефтяных месторождений с использованием технологии гидравлического разрыва пласта и на этой основе повышения эффективности функционирования нефтедобывающего предприятия.

Для достижения цели в работе определены следующие задачи:

- изучение фактического состояния планирования разработки месторождений;
- анализ применяемых методов оптимизации нефтедобычи;
- оценка потенциальных возможностей для увеличения экономической эффективности нефтедобычи;
- создание комплексной экономико-математической модели разработки месторождения;
- разработка комплексного подхода к решению задач повышения экономической эффективности нефтедобычи;
- адаптация аппарата генетического алгоритма для решения задач оптимизации нефтедобычи;
- апробация результатов исследования.

Объектом исследования являются нефтедобывающие предприятия, планирующие разрабатывать или разрабатывающие нефтяные месторождения с технической возможностью проведения гидравлического разрыва пласта.

Предметом исследования являются модели и методы решения задач повышения экономической эффективности нефтедобывающего производства за счет оптимизации системы разработки и параметров ГРП.

Теоретической и методической основами исследований послужили работы ученых и практиков в области экономического анализа и организации производства. При решении поставленных задач использовался комплексный подход, методы экономико-математического моделирования и математического программирования, математические методы поиска решений и генетический алгоритм.

Информационная база исследования представлена содержанием научных работ зарубежных и российских специалистов в области нефтедобычи и оптимизации производственных процессов. Значительный информационный материал получен из документов и отчетных материалов ведущих российских нефтедобывающих компаний.

Научная новизна. Диссертация является результатом исследований аспиранта по поставленной проблеме. Новизну ее научного содержания составляют следующие результаты:

- сформулирована задача повышения экономической эффективности нефтедобывающего производства для всех этапов разработки нефтяных месторождений;

- предложена экономико-математическая модель оптимизации разработки месторождения, учитывающая влияние технологических параметров гидроразрыва пласта на экономические показатели нефтедобычи;

- разработаны модели и методы снижения затрат на разработку месторождений с использованием технологии гидроразрыва пласта основанные на принципах оптимизации сетки скважин и стоимости расходных материалов;

- предложены конструктивные средства, позволяющие использовать возможности генетического алгоритма для решения многокритериальных задач оптимизации плана разработки месторождений с применением технологии гидравлического разрыва пласта.

Практическая значимость. Основные результаты, выводы, предложения и рекомендации, изложенные в работе, могут быть использованы в нефтедобывающих организациях для повышения эффективности процесса нефтедобычи. Результаты исследований используются в ООО «НК» Аврора Ойл» и в учебном процессе на инженерно-экономическом факультете Самарского государственного технического университета.

Апробация работы. Основные результаты работы были доложены на:

- Всероссийской научно-практической конференции «Наука, Бизнес, Образование'2005» (Самара, 2005);

- 5-й международной научно-практической конференции «Проблемы развития предприятий: теория и практика» (Самара 2005);

- Russian Oil & Gas Technical Conference & Exhibition (Москва 2006).

Публикации. Основные положения диссертации отражены в 11 печатных работах общим объемом 4,68 п.л.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех разделов и заключения. Содержит 36 рис., 13 табл. Библиографический список включает 104 наименования.

Основное содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность разрабатываемой темы, определяются цели и задачи, предмет исследования, научная новизна и практическая значимость работы.

В **первой главе** «Особенности нефтедобывающего производства» рассматривается состояние нефтяного комплекса страны, принципы планирования и реализации систем разработки месторождений, дается обзор теоретических разработок оптимизации эксплуатации месторождений с применением гидравлического разрыва пласта.

Особенностью разработки нефтяных месторождений является высокая капиталоемкость на начальном этапе и низкая мобильность основных акти-

вов предприятия на этапе эксплуатации. Эффективность эксплуатации нефтяных месторождений во многом зависит от того насколько правильно происходит планирование комплекса мероприятий по разработке на первоначальном этапе. На рис. 1 представлены статистические данные по капитальным вложениям в добычу нефти шести крупнейших нефтяных компаний России за период с 2001 по 2005 год, а также прогнозный уровень вложений на 2006 год. Рост капитальных вложений связан с необходимостью поддерживать и наращивать объемы добычи. Растущий спрос на нефтепродукты заставляет крупные компании увеличивать объем капиталовложений не только в добычу, но и в прирост запасов. Однако прирост запасов является косвенным показателем эффективности компании и не гарантирует получение прибыли. В связи с этим очевидным условием роста конкурентоспособности предприятия является повышение эффективности использования имеющихся ресурсов.

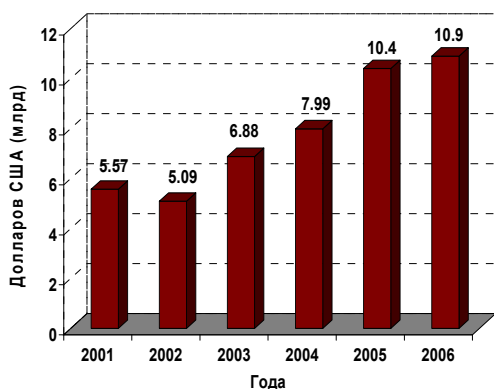


Рис. 1 Капитальные вложения шести крупнейших нефтяных компаний России.

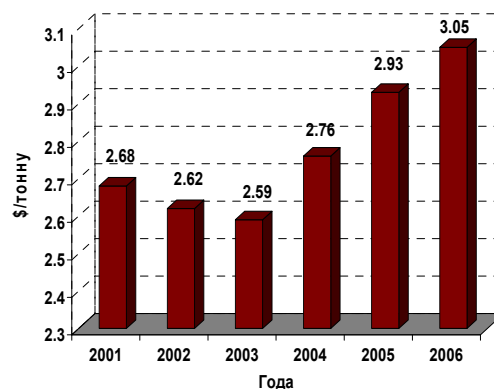


Рис. 2 Средняя себестоимость подъема нефти в России.

На рис. 2 представлена динамика изменения себестоимости подъема нефти в России. Из графика видно, что себестоимость добычи неуклонно растет в течение последних лет. В этой связи особенно важными становятся исследования в области увеличения эффективности нефтедобычи. В настоящее время применяется множество методов интенсификации добычи нефти, таких как кислотная обработка пласта, использование полимеров и электромагнитное воздействие. Однако одним из важнейших методов интенсификации разработки месторождений углеводородов является гидравлический разрыв пласта.

Гидравлический разрыв пласта (ГРП) – это нагнетание жидкости в скважину при давлении достаточном для разрушения породы пласта и создания в нем искусственных трещин. Целью ГРП является увеличение добычи за счет увеличения притока в скважину углеводородов.

Основными достоинствами использования ГРП с экономической точки зрения являются:

- снижение себестоимости добычи нефти;
- увеличение чистого дисконтированного дохода (NPV);
- увеличение конечного коэффициента извлечения нефти (накопленной добычи) при разработке пласта на истощение.

Снижение себестоимости добычи происходит за счет увеличения дебита скважины после стимуляции притока и снижения удельных постоянных и условно-постоянных затрат на тонну добываемой нефти. К затратам такого рода относятся затраты на обслуживание скважины, на поддержание инфраструктуры, на погружное и поверхностное оборудование и т.д.

Увеличение NPV происходит за счет увеличения скорости отборов нефти (акселерация проекта), в следствии увеличения индекса продуктивности после ГРП. Большое количество положительных денежных потоков в начале проекта позволяет уменьшить потери доходов за счет дисконтирования.

Увеличение продуктивности скважин после ГРП позволяет увеличить конечный коэффициент извлечения нефти при разработке месторождений на истощение. Это связано с тем, что экономически минимальный дебит будет достигнут при меньшем пластовом давлении, а соответственно накопленная добыча к этому моменту будет выше.

Анализ формирования стоимости проведения ГРП показал, что основную часть затрат при проведении ГРП составляют затраты на проппант (табл. 1). *Проппант- материал (песок, синтетические материалы) используемый для закрепления трещины в раскрытом состоянии.* Эффективное использование проппанта для достижения максимальной отдачи от мероприятия является приоритетной задачей оптимизации планируемых параметров ГРП.

Таблица 1

Состав и структура затрат на проведение ГРП

| Затраты сервисных компаний | Удельный вес, % |
|------------------------------------|------------------------|
| 1 Стоимость проппанта | 50% |
| 2 Затраты на жидкость разрыва | 5% |
| 3 Затраты на оборудование | 7% |
| 4 Мобилизационные затраты | 10% |
| Затраты добывающей компании | |
| 1 Подготовка скважины | 3% |
| 2 СПО (спуско-подъемные операции) | 5% |
| 3 Затраты на доп. материалы | 10% |
| 4 Дополнительные исследования | 10% |
| Всего | 100% |

Созданная модель оптимизации использования проппанта была основана на методике разработанной М. Economides, R. Oligney и P. Valko представленной в работе «Unified Fracture Design». В работе М. Economides и др. было предложено использовать новую безразмерную величину: число проппанта ($N_{prop} = f(V_f)$),

где

V_f - объем израсходованного проппанта.

N_{prop} позволяет однозначно определить затраты на ГРП и эффект от данного мероприятия. Анализ показал, что данная методика позволяет учесть в процессе оптимизации как тип проппанта (через проницаемость), так и количество закачиваемого проппанта (через объем).

В работе было предложено использовать типовую кривую при планировании параметров ГРП. Использование этой типовой кривой позволяет однозначно определить при каких параметрах создаваемых с помощью ГРП трещин будет достигнута максимальная продуктивность скважин. Эта методика получила широкое применение, как в мировой, так и в российской нефтяной промышленности.

Существенными недостатками данной методики является:

- методика не предусматривает комплексного подхода к дизайну ГРП с учетом системы разработки;
- методика основана на оптимизации только технических параметров ГРП без учета экономических составляющих;
- предложенная типовая кривая применима только для ячеек квадратной формы.

Анализ показал, что сложившаяся практика планирования ГРП не позволяет достичь максимального экономического эффекта по следующим причинам:

- применение ГРП носит ситуативный характер и не учитывает используемой системы разработки;
- большинство решений о параметрах ГРП принимается на основе экспертных оценок без использования детальных экономических расчетов, по причине отсутствия единого комплексного подхода;
- в ходе планирования системы разработки месторождений не учитываются параметры ГРП, которые будут проведены на скважинах после ввода месторождения в эксплуатацию;
- используемые в настоящее время методики дизайна ГРП применимы только для ячеек квадратной формы. Исследования показали, что существует потенциал увеличения нефтедобычи при использовании ГРП на ячейках разработки прямоугольной формы при тех же затратах на мероприятия.

Автором обоснована необходимость решения следующих задач:

- разработать экономико-математическую модель разработки месторождения;
- разработать методику оптимизации параметров ГРП с учетом существующей сетки разработки месторождения;
- разработать методику решения взаимосвязанной задачи выбора системы разработки месторождения и оптимизации параметров ГРП с использованием ячеек прямоугольной формы.

В работе показано, что в целом решение поставленных задач оптимизации нефтедобычи разбивается на 3 этапа:

- экономическое обоснование используемых расходных материалов (проппант);
- оптимизация параметров ГРП по отдельно взятым скважинам;
- оптимизация сетки разработки всего месторождения с учетом параметров ГРП.

Во **второй главе** «Модели и методы повышения экономической эффективности нефтедобычи» рассматриваются механизмы снижения затрат на разработку месторождений за счет оптимизации сетки скважин, минимизации стоимости расходных материалов и оптимизации параметров гидравлического разрыва пласта.

Самым очевидным способом увеличения объемов добычи нефти является разбуривание дополнительных площадей или уплотнение сетки скважин. Однако этот способ является наиболее капиталоемким по сравнению с методами стимуляции притока такими как кислотная обработка и гидроразрыв пласта. Применение ГРП позволяет использовать менее плотную сетку разработки, что уменьшает затраты на бурение на новых месторождениях. Основная часть этой работы посвящена принципам увеличения экономической эффективности разработки месторождений с использованием ГРП.

Автором построена **экономико-математическая модель разработки месторождений (1)**, целевая функция которой (NPV) может служить показателем экономической эффективности их эксплуатации. Процесс добычи и продажи нефти можно охарактеризовать как непрерывный, поэтому выражение для определения чистого дисконтированного дохода было представлено в интегральной форме:

$$NPV = -Capex + \int_0^{T_{lim}} \frac{CF_t}{(1+d)^t} dt$$

Выражение денежных потоков выглядит следующим образом:

$$CF = q * N_w * (Pr - VC) - FC * N_w$$

Выделим параметры, которые не меняются со временем:

$$NPV = -Capex + N_w (Pr - VC) q_i * \int_0^{T_{lim}} \frac{e^{-\frac{TJ_d N_w t}{Ah \phi C_i}}}{(1+d)^t} dt - FC * N_w * \int_0^{T_{lim}} \frac{1}{(1+d)^t} dt$$

После интегрирования уравнение чистого дисконтированного дохода выглядит следующим образом:

$$NPV = -Capex + \frac{N_w (Pr - VC) q_i}{\ln \frac{e^{kN_w}}{1+d}} * \left(\left(\frac{e^{kN_w}}{(1+d)} \right)^{T_{lim}} - 1 \right) - \frac{FC * N_w}{\ln \left(\frac{1}{1+d} \right)} * \left(\frac{1}{(1+d)^{T_{lim}}} - 1 \right) \quad (1)$$

где

$C_{арех}$ - капитальные затраты;
 N_w - количество скважин;
 q_i - начальный дебит скважины;
 Pr - цена нефти;
 VC - издержки зависящие от объемов добычи;
 d - ставка дисконтирования;
 FC - издержки независящие от объемов добычи;
 T_{lim} - длительность проекта.

Длительность проекта один из ключевых параметров, влияющих на принятие решение. Конечно, можно использовать какое-нибудь фиксированное время разработки, например 5, 10 или 20 лет. Однако логичнее и правильнее определить время проекта исходя из экономических предпосылок.

В работе показано, что время проекта определяется исходя из экономически минимального дебита скважины, который напрямую зависит от возможности покрывать постоянные затраты на эксплуатацию скважины за счет добычи нефти из этой скважины. Это означает, что в какой-то момент времени дебит скважины будет настолько мал, что прибыль от реализации добытой нефти не позволит покрыть постоянные издержки, не зависящие от объемов добычи. Таким образом, длительность проекта определяется как:

$$T_{lim} = \frac{1}{kN_w} * \ln\left(\frac{FC}{q_i(Pr - VC)}\right) \quad (2)$$

Формула (1) и (2) позволяют аналитически определять значение чистого дисконтированного дохода при разработке месторождения.

Анализ особенностей процесса гидравлического разрыва пласта показал, что решение о типе и параметрах используемого проппанта не зависит от объема планируемого ГРП. В ходе исследования была определена основная экономическая характеристика проппанта влияющая на **выбор типа проппанта**:

$$E_{pp} = \frac{(1 - \phi)\rho * PC}{k_f} \quad (3)$$

E_{pp} - стоимость проницаемости проппанта, руб/м³/mD ;
 $(1 - \phi)\rho * PC$ - стоимость единицы объема проппанта, руб/м³ или \$/м³;
 k_f - проницаемость проппанта, mD или D.

Чем меньше эта величина тем ниже затраты на объем проппанта для достижения необходимого эффекта от ГРП.

Обычно стоимость проппанта определяется за тонну, поэтому такие свойства как плотность и пористость проппанта, используемые для перевода массы в объем, оказывают влияние на принятие решения о типе планируемого проппанта. Проницаемость и пористость проппанта меняются значительно

в зависимости от давления закрытия трещины. Автором была разработана методика, позволяющая менеджерам нефтедобывающих компаний определить оптимальный тип проппанта для различных значений давления закрытия трещины.

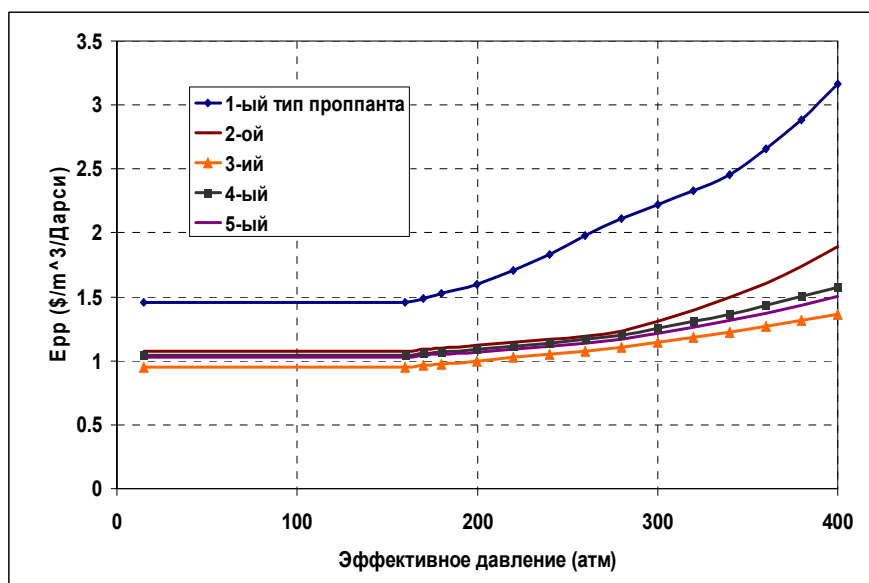


Рис. 3 Зависимость E_{pp} от давления закрытия трещины

На рис. 3 видно как меняется стоимость проницаемости проппанта в зависимости от эффективного давления. Сложившаяся практика формирования цены проппанта внутри одной группы (по устойчивости к стрессу) показывает, что разница в ценах различных производителей отличается не значительно, однако определение наиболее экономически целесообразного типа проппанта в зависимости от пластовых условий в различных регионах может оказать существенное влияние на экономические показатели разработки месторождений. Выбор проппанта на основе коэффициент E_{pp} позволяет минимизировать затраты на расходные материалы при проведении ГРП.

Главное достоинство этого коэффициента состоит в том, что выбранный оптимальный тип проппанта позволяет минимизировать затраты на расходные материалы вне зависимости от объема планируемых работ или от длительности проекта. Использование E_{pp} позволяет минимизировать удельные затраты на технические характеристики проппанта. После того как определен необходимый тип проппанта, однозначно определяются его технические характеристики для заданных условий.

Следующей задачей исследования является создание модели повышения экономической эффективности нефтедобычи с учетом технологии гидравлического разрыва пласта. Решение поставленной задачи зависит от того, на какой стадии разработки находится месторождение. Автором рассмотрены принципы оптимизации для всех трех стадий: 1) новое (не разбуренное) месторождение; 2) полностью разбуренное месторождение; 3) частично разбу-

ренное месторождение. Данные принципы представлены в виде схемы (рис. 4).

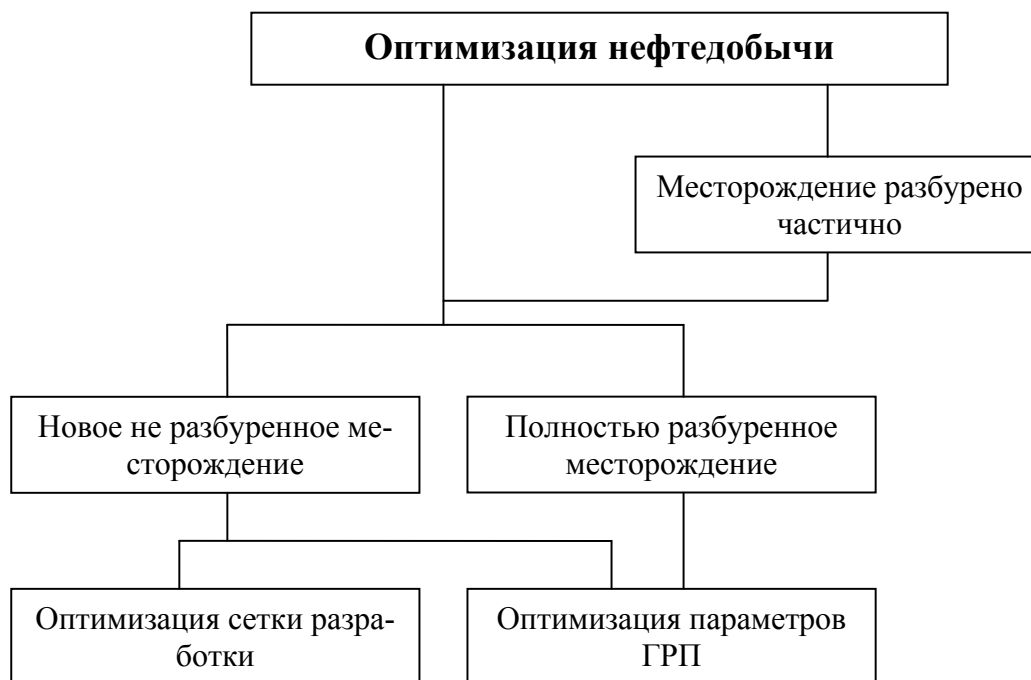


Рис. 4 Условная схема оптимизации нефтедобычи

Рассмотрим каждый вариант:

1. На полностью разбуренном месторождении оказать влияние на площадь и форму зон дренирования уже невозможно, поэтому дизайн ГРП должен осуществляться исходя из существующих параметров сетки разработки. Для этого необходимо использовать представленный в этой работе метод дизайна ГРП, который применим как для квадратных так и для прямоугольных ячеек сетки разработки.

2. При планировании разработки нового месторождения необходимо решить задачу оптимизации сетки разработки с учетом параметров ГРП на каждой скважине.

В настоящее время задача оптимизации сетки скважин включает в себя только нахождение оптимальной площади дренирования, а дизайн ГРП проводится уже исходя из полученной сетки. Исследования автора показали, что существует значительный потенциал для увеличения экономического эффекта от разработки месторождений. Для этого необходимо учитывать параметры планируемого ГРП и возможность использования ячеек разработки прямоугольной формы на этапе планирования, что позволит значительно увеличить производительность скважин и снизить себестоимость добываемой нефти.

Предлагаемый метод оптимизации позволяет учитывать будущее влияние ГРП на экономические показатели проекта на этапе планирования сетки разработки месторождения.

3. Частично разбуренное месторождение условно можно разделить на два участка: разбуренный и не разбуренный. Соответственно для решения задачи оптимизации разработки всего месторождения необходимо решить две задачи оптимизации для каждого из этих участков.

Таким образом, для решения поставленных задач необходимо решить три задачи оптимизации:

- 1) оптимизация параметров ГРП;
- 2) оптимизация количества скважин;
- 3) оптимизация формы дренируемой площади.

Совместную оптимизацию количества скважин и формы дренируемой площади можно условно объединить в оптимизацию сетки разработки.

Таблица 2

**Сравнительный анализ задач оптимизации
в зависимости от стадии разработки**

| | Задача оптимизации | | |
|-----------------------------|------------------------|----------------|-------------------------|
| | Параметры ГРП | Кол-во скважин | Форма зоны дренирования |
| В настоящее время | | | |
| Полностью разбуренное м-ие* | N_{prop} | - | - |
| Новое м-ие | - | N_w | - |
| Частично разбуренное м-ие | N_{prop} | N_w | - |
| Предложенный подход | | | |
| Полностью разбуренное м-ие | N_{prop} | - | - |
| Новое м-ие | N_{prop1}, N_{prop2} | N_w1, N_w2 | A_{r1}, A_{r2} |
| Частично разбуренное м-ие | N_{prop1}, N_{prop2} | N_w1, N_w2 | A_{r1}, A_{r2} |
| * м-ие - месторождение | | | |

- 1- основной блок месторождения;
- 2- корректирующий блок месторождения.

В сводной таблице 2 представлены данные по задачам оптимизации, которые необходимо решить в зависимости от стадии разработки месторождения. Из таблицы видно, что в настоящее время имеется потенциал для увеличения экономической эффективности разработки месторождений за счет решения дополнительного комплекса задач оптимизации.

В настоящее время большим недостатком планирования разработки новых месторождений является то, что не учитывается влияние параметров ГРП при выборе необходимого количества скважин. Учет ГРП на данном этапе позволяет сократить количество скважин, уменьшая капитальные затраты и как следствие увеличивая значение чистого дисконтированного дохода. Поэтому в таблице 2 по данному пункту стоит прочерк, хотя в послед-

ствии, когда месторождение переходит на стадию разбуренного задача оптимизации ГРП решается, но уже в зависимости от сложившейся ситуации.

Разработанная автором **методика оптимизации параметров ГРП (дизайн ГРП)** позволяет учитывать влияние формы ячеек разработки.

Рассмотрим сначала разработанную методику на единичной скважине. Созданная модель затем используется при планировании разработки всего месторождения.

В общем виде дизайн ГРП состоит из 3-х частей:

1) Определение профиля добычи для всех вариаций числа проппанта (объемов работ).

2) Определение стоимости проведения ГРП для всех вариаций числа проппанта.

3) Определение таких параметров проведения ГРП, при которых экономический эффект (значение чистого дисконтированного дохода) будет максимальным, исходя из первых 2-ух пунктов.

Этот подход является стандартным при планировании ГРП на разбуренном месторождении, где невозможно изменить площадь и форму дреннирования.

Первый пункт дизайна основан на определении технических параметров планируемого ГРП:

- определяется продуктивность скважины после ГРП для всех вариаций числа проппанта;

- определяется профиль добычи исходя из полученных показателей продуктивности.

Второй пункт включает в себя определение необходимого объема проппанта в зависимости от числа проппанта и соответственно его стоимости. Стоимость проведения ГРП определяется как:

$$FrC = m * PrC + MC \quad (4)$$

где

PrC - стоимость проппанта (руб/тонн);

MC - фиксированные затраты не зависящие от объема проппанта (руб);

m - масса проппанта (тонн);

Третий пункт включает в себя определение дисконтированных потоков в зависимости от профиля добычи и построение функции чистого дисконтированного дохода в зависимости от числа проппанта. Для этого необходимо использовать разработанные аналитические решения (1) и (2). После необходимых преобразований для одной скважины выражение чистого дисконтированного дохода выглядит следующим образом:

$$NPV = -FrC - Cap + \frac{(Pr-VC)q_i}{\ln \frac{e^k}{1+d}} * \left(\left(\frac{e^k}{(1+d)} \right)^{T_{lim}} - 1 \right) - \frac{FC}{\ln \left(\frac{1}{1+d} \right)} * \left(\frac{1}{(1+d)^{T_{lim}}} - 1 \right),$$

где

Cap - затраты на ввод в эксплуатацию одной скважины;

$FrC = f(N_{prop})$;

$q_i = f(N_{prop})$;

$k = f(N_{prop})$;

$T_{lim} = f(N_{prop})$.

Из примера представленного на рис. 5 видно как меняются значения чистого дисконтированного дохода в зависимости от ставки дисконтирования, и как меняется оптимальное значение числа проппанта, которое непосредственно влияет на технические параметры ГРП.

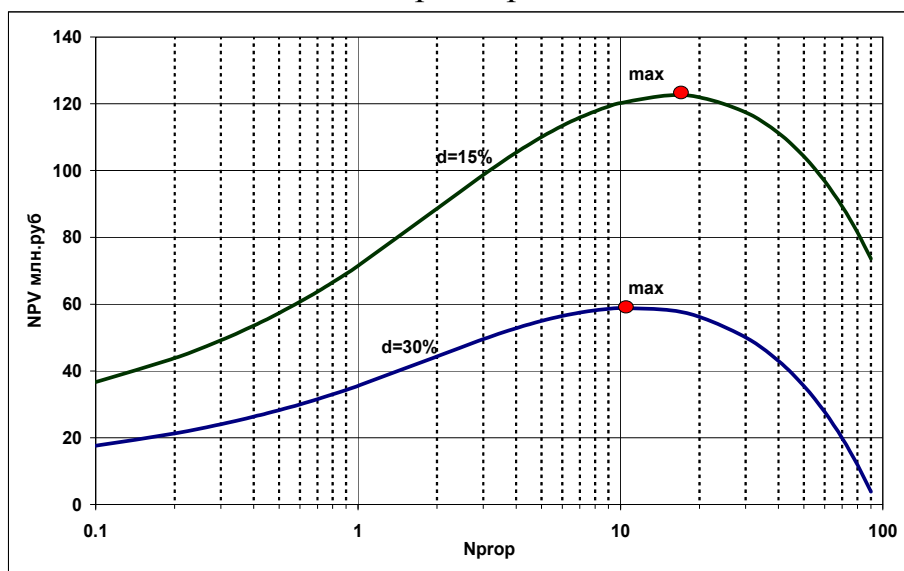


Рис. 5 Определение оптимального числа проппанта (N_{prop}) в зависимости от ставки дисконтирования

Метод разработанный М. Economides и др. применим только для резервуаров квадратной формы. Использование **прямоугольных ячеек разработки** позволяет получить больший дебит нефти после ГРП при тех же затратах на расходные материалы (проппанта) по сравнению с квадратными ячейками.

Для эффективного использования ГРП автором был разработан метод оптимизации параметров ГРП на скважинах с прямоугольной сеткой разработки. В число проппанта был введен новый параметр: коэффициент пропорциональности

$Ar = \frac{Xe}{Ye}$, где

Xe - длина резервуара (ячейки);

Ye - ширина резервуара (ячейки).

Этот коэффициент позволяет учесть влияние прямоугольности резервуара на стоимость проведения ГРП и производительность скважины после ГРП.

Разработанный метод позволяет оптимизировать параметры ГРП для достижения максимального экономического эффекта для различных сеток прямоугольной формы. Общий дизайн ГРП на ячейках прямоугольной формы будет выглядеть аналогично вышеописанному.

Для полностью разбуренного месторождения решение задачи оптимизации параметров ГРП сводится к задаче оптимизации для каждой отдельной скважины. Следующая задача, которую необходимо решить это задача **оптимизации нефтедобычи на новом месторождении**. В ходе исследования было установлено, что применение ячеек разработки прямоугольной формы с последующим проведением ГРП значительно улучшает экономические показатели разработки месторождений. Автором была разработана комплексная методика оптимизации количества скважин, параметров ячеек разработки и параметров ГРП на всем месторождении для максимизации чистого дисконтированного дохода.

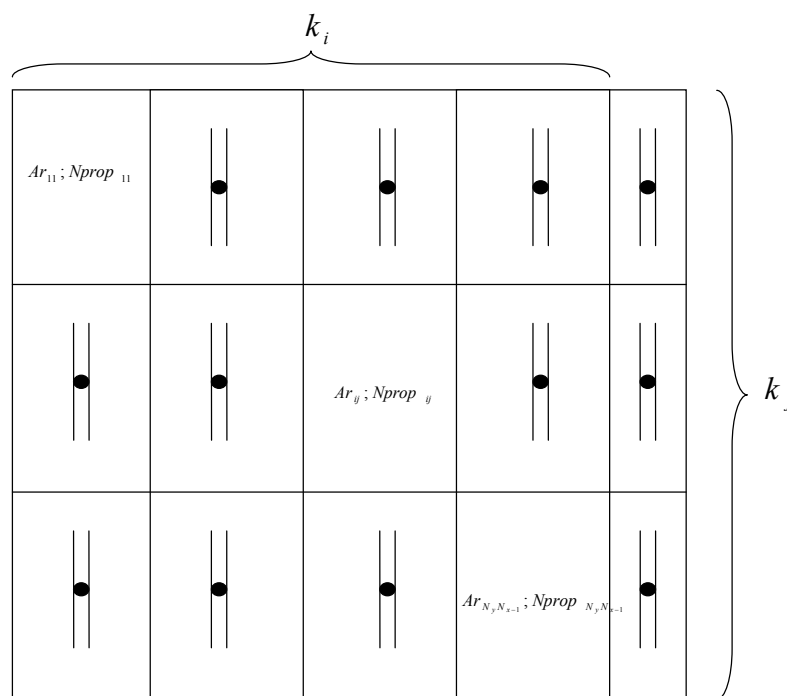


Рис. 6 Условная схема использования ячеек прямоугольной формы

На рис. 6 схематично представлено использование ячеек прямоугольной формы при разработке месторождения и показаны основные используемые обозначения. Последний ряд скважин является корректирующим, так как его параметры заметно отличаются и являются зависимыми от параметров разработки основного блока месторождения.

В общем виде выражение для определения чистого дисконтированного дохода с применением ячеек прямоугольной формы выглядит следующим образом:

$$NPV = NPV_i k_i k_j + NPV_j k_j \quad (5)$$

где i - индекс обозначающий основной блок;

j - индекс обозначающий корректирующий блок;

$k_{i,j}$ - количество рядов скважин в соответствующем блоке.

Суммарное значение NPV по всему месторождению складывается из значений каждого блока разработки.

$$NPV_{i,j} = -(Cap + FrC) * N_w + \frac{N_w (Pr - VC) q_i}{\ln \frac{e^{kN_w}}{1+d}} * \left(\left(\frac{e^{kN_w}}{(1+d)} \right)^{T_{lim}} - 1 \right) - \frac{FC * N_w}{\ln \left(\frac{1}{1+d} \right)} * \left(\frac{1}{(1+d)^{T_{lim}}} - 1 \right)$$

Основным критерием эффективности разработки месторождения является максимальное значение чистого дисконтированного дохода:

$$NPV(k_i; k_j; Ar_{i,j}; Nprop_i; Nprop_j) \rightarrow \max \quad (6)$$

где

$Ar_{i,j}$ - коэффициент пропорциональности в ячейках соответствующего блока;

$Nprop_{i,j}$ - число проппанта на скважинах соответствующего блока.

Таким образом, решение поставленной задачи сводится к поиску таких значений количества скважин, коэффициента пропорциональности и числа проппанта в основном и корректирующем ряду соответственно, при которых чистый дисконтированный доход будет максимальным.

Для решения поставленных задач необходимы эффективные математические методы поиска решений. В ходе исследования были использованы следующие методы:

- 1) Градиентный метод;
- 2) Модифицированный метод половинного деления (дихотомии);
- 3) Генетический алгоритм.

Решение поставленной задачи оптимизации (формула (6)) осложняется тем, что область решения представляет собой дискретный набор плоскостей, которые определяются значением $k_{i,j}$. Поэтому возникает необходимость последовательного нахождения максимума в каждой плоскости $NPV_{k_i, k_j}(Ar_{i,j}; Nprop_i; Nprop_j) \rightarrow \max$. В связи с этим при использовании первых 2-ух методов поиска решений понадобилось большое количество итераций: 282 216 и 1 191 800 итераций соответственно. Поэтому дополнительно был рассмотрен генетический алгоритм.

Генетический алгоритм это алгоритм итерационного поиска решений основанный на эволюционной теории Дарвина. Генетический алгоритм является стохастическим методом поиска решений. Этот метод позволяет проводить поиск решения сразу по всем переменным, то есть во всех дискретных плоскостях. Основным недостатком данного метода является более низкая точность по сравнению с остальными представленными методами.

Применение генетического алгоритма для решения практических задач осложнено трудностями его реализации. Однако если алгоритм разработан и

адаптирован для конкретного типа задач его реализация становится очень простой. Поэтому для решения поставленных в работе задач оптимизации автором была разработана методика применения генетического алгоритма. Разработанная методика применения генетического алгоритма может быть использована для решения комплекса типовых задач оптимизации нефтедобычи так как она уже адаптирована к особенностям поставленных задач.

Определим теперь основные понятия, которые использовались при решении задач оптимизации. Хромосома – последовательность из нулей и единиц. Хромосома описывает какое-либо свойство индивидуума, т.е. она содержит всю информацию об одном из свойств индивидуума.

Индивидуум – набор хромосом. Полный набор хромосом содержит всю информацию об объекте и однозначно определяет значение целевой функции (NPV). Поэтому индивидуум фактически является вариантом решения задачи. Для решения поставленной задачи оптимизации индивидуум описывался пятью хромосомами (переменными):

- 1) k_i - количество рядов скважин в основном блоке
- 2) k_j - количество рядов скважин в корректирующем блоке
- 3) Ar_i - коэффициент пропорциональности ячеек основного блока
- 4) $Nprop_i$ - число проппанта на скважинах основного блока
- 5) $Nprop_j$ - число проппанта на скважинах корректирующего блока

Разработанная методика применения генетического алгоритма представлена на рис. 8. Опишем шаги, разработанной для поставленных задач, методики поиска решений с помощью этого алгоритма:

1) Случайная инициализация выборки. Задаются совершенно случайные значения количества скважин, параметры сетки разработки и объемы проводимых гидравлических разрывов пласта для каждого индивидуума в популяции.

2) Расчет NPV_i. На основе заданных параметров определяются необходимые капитальные затраты исходя из заданного количества скважин и объемов ГРП. Строится профиль добычи и определяется длительность проекта. Рассчитываются потоки денежных средств. Рассчитывается значение чистого дисконтированного дохода для каждого индивидуума. На этой стадии происходит оценка индивидуумов. На этой стадии выделяются индивидуумы способные к выживанию и репродукции.

3) Удаление 2-ух худших индивидуумов. На основе полученных значений чистого дисконтированного дохода выбираются два индивидуума с наименьшими показателями. Они считаются не жизнеспособными, поэтому отбрасываются и в дальнейшем развитии популяции не участвуют.

4) Выбор элитного индивидуума. На основе полученных значений чистого дисконтированного дохода выбирается индивидуум с наибольшим зна-

чением. Этот индивидум проходит в следующую популяцию без изменений. Его параметры считаются лучшими (элитными) и сохраняются без изменений, до тех пор, пока его не заменит другой индивидум с лучшими показателями.

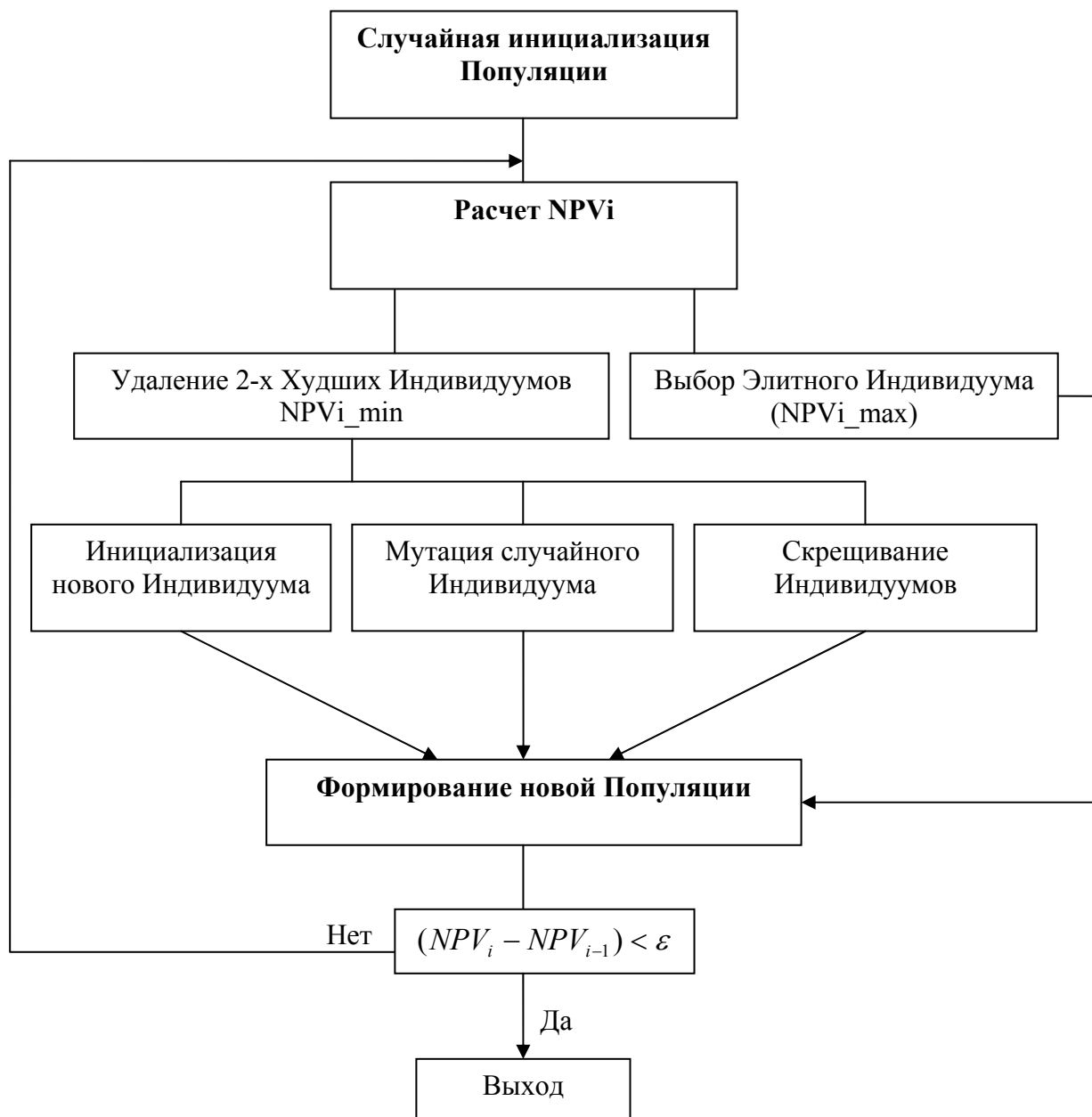


Рис. 8 Адаптированный метод поиска решений с помощью генетического алгоритма

5) Инициализация нового индивидуума. Задаются совершенно случайные значения количества скважин, параметры сетки разработки и объемы проводимых гидравлических разрывов пласта для нового индивидуума в популяции. Это означает, что появляется новый индивидум, в результате мутации, который генетически не унаследовал свойства ни одного из членов популяции.

6) Мутация случайного индивидуума. Случайно выбирается один член популяции и один из его генов мутирует (параметр принимает случайное значение).

7) Скрещивание индивидуумов. Выбираются индивидуумы, способные к репродукции и происходит обмен хромосомами между ними.

8) Формирование новой популяции. Новая популяция формируется из индивидуумов образовавшихся после скрещивания, индивидуума после мутации и инициализированного индивидуума. Таким образом количество членов популяции полностью восстанавливается.

В ходе исследования было установлено, что оптимальное количество индивидуумов в популяции необходимое для решения поставленных задач равно шести, что позволяет достичь максимальной точности с минимальным количеством итераций.

В **третьей главе** «Апробация результатов исследований и рекомендации по их практическому использованию» приводятся результаты планирования разработки группы месторождений ООО «НК» Аврора Ойл», сравнительный анализ полученных результатов с традиционными методами планирования и предлагаемых алгоритмов решения задач оптимизации разработки месторождений.

Оценка эффективности внедрения предложенных методов повышения экономической эффективности нефтедобычи была осуществлена по следующим трем показателям:

- оценка экономической эффективности оптимизация чистого дисконтированного дохода по двум параметрам: количество скважин, параметры ГРП (Nprop);

- оценка экономической эффективности оптимизации типа проппанта;

- оценка экономической эффективности внедрения метода оптимизации системы разработки и параметров ГРП с использованием ячеек прямоугольной формы.

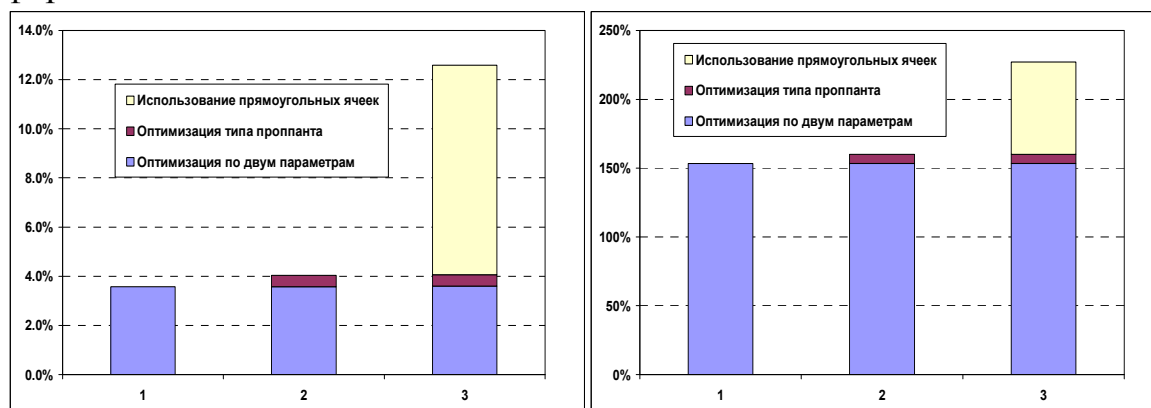


Рис. 8 Структура вклада каждого мероприятия по повышению эффективности нефтедобычи в общем росте NPV (слева) и индекса рентабельности (справа)

На основании проведенных расчетов были получены следующие экономические результаты:

- значение чистого дисконтированного дохода увеличилось на 105 млн.долл.США (12.5 %);
- индекс рентабельности увеличился в 3.2 раза;
- капитальные затраты снизились на 128 млн.долл.США.

В таблице 3 представлены сводные результаты по количеству итераций решения данной задачи с использованием различных алгоритмов. Применение адаптированного генетического алгоритма позволило значительно снизить количество итераций необходимых для решения поставленных задач.

Таблица 3

Результаты использования методов поиска решений

| Метод поиска решений | NPV (млн.долл.США) | Количество итераций |
|------------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| Градиентный | 977.7 | 282 216 |
| Дихотомии | 977.7 | 1 191 800 |
| Генетический алгоритм | 977 | 11 088 |

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

На основе выполненных диссертационных исследований автором разработаны теоретические положения, позволяющие сформировать модели принятия решений при планировании разработки месторождений с использованием технологии гидравлического разрыва пласта, а также оптимизировать стратегию нефтедобычи для достижения максимального экономического эффекта.

Основные научные и практические результаты, полученные в работе, состоят в следующем:

- 1) сформулирована задача повышения экономической эффективности нефтедобывающего производства для всех этапов разработки нефтяных месторождений;
- 2) предложена экономико-математическая модель оптимизации разработки месторождения, учитывающая влияние технологических параметров гидроразрыва пласта на экономические показатели нефтедобычи;
- 3) разработаны модели и методы снижения затрат на разработку месторождений с использованием технологии гидроразрыва пласта основанные на принципах оптимизации сетки скважин и стоимости расходных материалов;

4) предложены конструктивные средства, позволяющие использовать возможности генетического алгоритма для решения многокритериальных задач оптимизации плана разработки месторождений с применением технологии гидравлического разрыва пласта.

5) разработаны рекомендации по практическому использованию результатов исследований.

Предложенные модели и алгоритмы могут быть использованы для повышения эффективности управленческих решений, принимаемых при планировании разработки нефтяных месторождений.

Полученные научные и практические результаты имеют большое значение в качестве теоретической и методической основы создания средств экономико-математического обеспечения систем поддержки принятия решений по формированию оптимальных стратегий нефтедобычи.

Список опубликованных работ по теме диссертации

1. Сабаев В.В. Использование аналитических решений для повышения экономической эффективности нефтедобычи при разработке месторождений на истощение, Часть 1: Оптимизация числа скважин// Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом.-Москва.-2006.-№6.-0.53 п.л.

2. Сабаев В.В. Использование аналитических решений для повышения экономической эффективности нефтедобычи при разработке месторождений на истощение, Часть 2: Оптимизация параметров ГРП// Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом.-Москва.-2006.-№7.-0.42 п.л.

3. Сабаев В.В. Использование аналитических решений для повышения экономической эффективности нефтедобычи при разработке месторождений на истощение, Часть 3: Оптимизация числа скважин с учетом ГРП// Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом.-Москва.-2006.-№8.-0.43 п.л.

4. Сабаев В.В., Свиязова О.О. Принципы экономического планирования параметров ГРП. // Нефтепромысловое дело.-Москва.-2006.-№6.-0.66 п.л.

5. Sabaev V.V., D.S. Wolcott, J.M. Mach, D.V. Antipina, A.M. Haidar, O.O. Sviyazova. Vertically fractured well performance in rectangular drainage area.-SPE 101048.-2006.-0.48 п.л.

6. Сабаев В.В. Экономические аспекты планирования гидроразрыва пласта. – Межвуз. Сб. «Проблемы совершенствования организации производства и управления промышленными предприятиями».- Самара.- 2005. - 0.4 п.л.

7. Сабаев В.В. Использование генетического алгоритма при оптимизации системы разработки месторождений. – Материалы Всеросс. науч.-практ. конференции «Наука, Бизнес, Образование '2005».- Самара.-2005.- 0.18 п.л.

8. Сабаев В.В. Применение генетического алгоритма для решения задач нефтедобывающих компаний. – Материалы Всеросс. науч.-практ. конференции «Наука, Бизнес, Образование '2005».- Самара.-2005.- 0.14 п.л.

9. Сабаев В.В. Использование генетического алгоритма на этапе планирования разработки месторождений. – Межвуз. Сб. «Высшее образование, Бизнес, Предпринимательство '2005».- Самара.-2005.- 0.65 п.л.

10. Сабаев В.В. Применение генетического алгоритма при планировании геолого-технических мероприятий. – Межвуз. Сб. «Высшее образование, Бизнес, Предпринимательство '2005».- Самара.-2005.- 0.44 п.л.

11. Ладоскина А.И., Сабаев В.В. Экономико-математические методы оптимизации разработки месторождения.-Материалы 5й Международной научно-практической конф-ции «Проблемы развития предприятий: теория и практика».-Самара.-2005.-0.35 п.л.

Подписано в печать 17.11.2006 г. Тираж 100 экз.

Отпечатано в Самарском государственном
аэрокосмическом университете
443086, г.Самара, Московское шоссе, 34