

# Математические методы, алгоритмы и программные средства для планирования и проектирования нефтегазодобывающих регионов и месторождений

**В.Р. Хачатуров (Москва, Россия)**

д.ф.-м.н., зав. отделом Вычислительного центра им. А.А. Дородницына РАН, профессор, академик Российской академии космонавтики, академик РАН, лауреат Премии им. А.Н. Косыгина, лауреат Премии им. Н.К. Байбакова

**А.В. Злотов**

к.ф.-м.н., зав. сектором Вычислительного центра им. А.А. Дородницына РАН

**А.Н. Соломатин**

mprs@ccas.ru

к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник Вычислительного центра им. А.А. Дородницына РАН, доцент, лауреат Премии им. А.Н. Косыгина

**Рассматриваются математические модели, методы, алгоритмы и программное обеспечение, предназначенные для решения задач перспективного планирования развития газо- и нефтедобывающих регионов, проектирования генеральных схем обустройства месторождений. Математический аппарат включает имитационное моделирование, комбинаторные методы дискретной оптимизации, методы многокритериальной оптимизации и т.д. Приводятся примеры использования автоматизированных систем планирования и проектирования.**

**Материалы и методы**

Методы решения задач дискретной оптимизации, комбинаторные методы, методы решения многоэкстремальных и многокритериальных задач, имитационные модели групп месторождений. Реализация автоматизированных систем планирования и проектирования.

**Ключевые слова**

перспективное планирование, проектирование генеральных схем обустройства, нефтегазодобывающий регион, нефтяные и газовые месторождения, комбинаторные методы дискретной оптимизации, автоматизированные системы планирования и проектирования

Рассматриваются основные результаты работ, проводимых в Вычислительном центре им. А.А. Дородницына РАН по решению задач комплексного освоения нефтегазодобывающих регионов.

В рамках нового научного направления — регионального программирования были получены новые результаты в области решения задач дискретной оптимизации большой размерности и комбинаторных методов решения многоэкстремальных задач, которые использовались при оптимизации размещения объектов нефтегазодобычи с учетом связывающих их коммуникаций, структур коммуникационных сетей, параметров сетей и т.д. Были разработаны имитационные модели для групп нефтяных и газовых месторождений, методы решения многокритериальных задач, задач оптимизации стратегий разработки групп месторождений и т.д.

Рассматриваются отдельные программные системы, которые были реализованы на основе разработанного математического аппарата и внедрены на практике с большим экономическим эффектом. Системы перспективного планирования добычи газа и нефти применялись для долгосрочного планирования развития добывающих регионов Западной и Восточной Сибири, Р.Коми, Поволжья, а также отдельных месторождений. Система проектирования генеральных схем обустройства месторождений широко использовалась для проектирования обустройства большого числа нефтяных и газовых месторождений страны и за рубежом, включая Самотлорское, Усинское, Уренгойское.

Таким образом, были получены новые результаты в области регионального программирования, которые широко использовались при решении задач освоения различных нефтегазодобывающих регионов и весьма актуальны в настоящее время в связи с масштабными планами освоения новых месторождений Крайнего Севера и Восточной Сибири.

**Введение**

В течение более сорока лет в отделе Методов проектирования развивающихся систем Вычислительного центра им. А.А. Дородницына РАН (ВЦ РАН) под руководством д.ф.-м.н. В.Р. Хачатурова ведется работа по решению задач комплексного освоения территорий, и, в первую очередь, нефтегазодобывающих регионов. В результате проводимых исследований сформировалось новое научное направление - региональное программирование [1], были разработаны оригинальные математические методы, модели и алгоритмы, накоплен большой опыт создания и применения конкретных программных систем. Было осуществлено широкое внедрение этих систем

для проектирования обустройства большого числа нефтяных и газовых месторождений, долгосрочного планирования развития газо- и нефтедобывающих регионов.

В данной статье кратко излагаются основные результаты работ ВЦ РАН, которые относятся к различным уровням региона (собственно регион, группа месторождений, месторождение), различным отраслям (нефтедобыча, газодобыча) и различным задачам (планирование, проектирование). Часть из рассмотренного математического обеспечения реализована в виде программных систем и успешно применялась в течение многих десятилетий, часть реализована, но еще не внедрена в практику, часть только планируется к реализации.

**Перспективное планирование добычи газа и нефти по группе месторождений**

Проблемы развития топливно-энергетического комплекса РФ связаны с особой ролью ТЭК в экономике страны, необходимостью освоения новых труднодоступных добывающих регионов в условиях нехватки средств, устаревания основных фондов, технологического отставания и т.д. Решение задач освоения таких регионов требует соответствующего уровня планирования и проектирования, что позволяет частично нейтрализовать негативное влияние перечисленных проблем. А это невозможно без широкого использования математических методов — методов системного анализа, имитационного моделирования, оптимизации, а также современных информационных технологий.

Для решения задач долгосрочного планирования разработки группы газовых месторождений региона была разработана аппроксимирующая имитационная модель группы месторождений и многошаговый алгоритм, который по минимальной входной (запасы газа, «полки», дебиты скважин, данные на начало планового периода) и управляющей информации (план добычи по группе месторождений, порядок ввода месторождений в эксплуатацию) позволяет автоматически распределить планируемую добычу газа в динамике между месторождениями [2, 3]. При этом вид кривой добычи определяется исходя из таких параметров, как максимальный процент прироста добычи за год, процент отбора запасов, при котором начинается падение добычи, максимально допустимые уровни добычи, вид функции, определяющей закон падения дебитов и т.д. Могут учитываться наличие запасов различных категорий, наличие имеющихся проектов разработки, различные режимы дебитов, а также топология и пропускные способности сети региональных трубопроводов.

Для полученной динамики добычи газа и

заданных нормативов в динамике по месторождениям формируются многочисленные производные показатели развития газодобывающего региона. Это технологические и экономические показатели добычи и транспорта газа, показатели социального развития, динамические экономические показатели, динамические и агрегированные финансовые показатели развития газодобывающего предприятия [3]. В частности, из технологических показателей рассчитываются дебиты и фонды скважин, пластовые давления, ввод новых скважин, объемы буровых работ, потоки и пропускные способности трубопроводов, количество и сроки ввода ниток трубопроводов и т.д. Имеется возможность производить анализ текущего положения и тенденций изменения финансово-хозяйственного положения предприятия с использованием матриц финансовой стратегии, а также расчет цены газа, обеспечивающей заданную внутреннюю норму доходности. Для выполнимости сформированных стратегий разработки группы месторождений для каждого года планового периода динамика необходимых капитальных вложений и затрат должна соответствовать динамике суммарного объема средств, поступающих из различных источников финансирования. В противном случае обеспечивается формирование оптимальных программ кредитования, определяющих объем и параметры кредитов как в случае одной области убыточности, так и в случае нескольких областей.

Задачи планирования решались также для месторождений жидких углеводородов. Агрегированная модель функционирования группы нефтяных месторождений задается системой обыкновенных дифференциальных уравнений с параметрами, учитывающими гидродинамику нефтяного пласта в обобщенной форме. Управлением служит объем эксплуатационного бурения, задаваемый экспертно или вычисляемый на основе данной модели. Модель позволяет рассчитывать извлекаемые запасы нефти, добычу нефти, обводненность продукции, фонды добывающих и нагнетательных скважин, дебиты скважин и многие другие показатели [4]; при этом обеспечивается оценка точности определения запасов нефти различных категорий. Расчетные методики позволяют формировать многочисленные технико-экономические показатели добычи нефти, которые рассчитываются в динамике по месторождениям на основании полученной динамики добычи и соответствующих нормативов. Для газоконденсатного месторождения с учетом его специфики была предложена непрерывная имитационная динамическая модель, учитывающая возможность закачки сухого газа в пласт для реализации сайклинг-процесса. Особое внимание уделяется потенциальному содержанию конденсата в жирном газе и предполагаемым пропорциям между добытыми сухими и жирными газами. В качестве управлений выбираются прирост добывающих и нагнетательных скважин, а также доля нагнетательных скважин, задействованных для добычи. Результатом являются основные расчетные динамические параметры модели газоконденсатного месторождения, представленные формулами или дифференциальными уравнениями.

При рыночной экономике план добычи для группы месторождений нельзя считать заданным, т.е. возникает проблема оптимизации стратегий разработки группы газовых месторождений [5]. Была поставлена и решена задача формирования плана добычи, обеспечивающего максимизацию накопленной добычи для группы месторождений. Имитационный характер модели группы месторождений не позволяет задать целевую функцию и ограничения оптимизационной задачи в аналитическом виде. Поэтому непрерывная оптимизационная задача сводится к дискретной за счет введения равномерной сетки (дискретизация производится по объемам добычи и по времени) и решается при помощи комбинаторного метода дискретной оптимизации. Помимо приближенного оптимального, находятся все близкие к нему по значению функционала решения, что позволяет далее при помощи методов многокритериальной оптимизации находить наилучшее решение, учитывающее другие заданные критерии оценки решений (уровень «полки» по группе месторождений и ее продолжительность, чистая прибыль, NPV и т.д.).

Имитационные и оптимизационные модели, рассмотренные выше, являются детерминированными, что не совсем адекватно отражает объективную реальность. Поэтому в настоящее время решается задача моделирования и оптимизации стратегий развития группы газовых месторождений с учетом неопределенности исходных данных, таких как запасы газа, дебиты скважин, удельные капиталовложения, на основе использования математического аппарата нечетких множеств. Особое внимание уделяется такому виду неопределенных данных, как запасы и ресурсы газа различных категорий, рассматривается имитационная и оптимизационная модели движения запасов (ресурсов) газа по категориям. В силу невозможности напрямую использовать методы неопределенного программирования из-за имитационного характера модели, при решении задач моделирования, оптимизации и многокритериальной оптимизации вместо детерминированных значений используются функции принадлежности соответствующих нечетких чисел, а операции с детерминированными значениями заменены на операции с нечеткими числами.

Все более актуальной в последние годы становится проблема ликвидации газовых месторождений, что связано с выходом значительной группы месторождений Западной Сибири на режим падающей добычи. Были исследованы методологические вопросы ликвидации газовых месторождений, рассмотрены различные источники финансирования ликвидационных работ, построена и проанализирована модель функционирования газового месторождения с учетом формирования ликвидационного фонда [6]. Были разработаны методики расчета объема ликвидационного фонда, динамики его формирования и динамики ликвидационных затрат по укрупненным показателям; необходимая для расчетов количественная информация может быть получена на основании результатов работы имитационной модели группы газовых месторождений. Тем самым моделируется полный жизненный цикл газовых месторождений. Данный подход может быть

Mathematical methods, algorithms and software for planning and design of oil-gas extracting regions and fields

#### Authors

Vladimir R. Khachaturov (Moscow, Russia)

ph.D., professor, head of department, Dorodnicyn Computing Centre of RAS, academician of Russian academy of astronautics, academician of Russian academy of natural sciences

Alexander V. Zlotov

ph.D, head of sector, Dorodnicyn Computing Centre of RAS

Alexander N. Solomatin

ph.D., leading researcher, Dorodnicyn Computing Centre of RAS

#### Abstract

Mathematical models, methods, algorithms and software are considered, intended for the decision of problems of long-term planning of development of oil-gas extracting regions, design of general schemes of development of oil and gas fields. Simulation models, combinatory methods of discrete optimization, methods of multicriteria optimization are using as mathematical apparatus. Examples of use of the computer-aided systems of planning and design are given.

#### Materials and methods

Methods of the solution of problems of discrete optimization, combinatory methods, methods of the solution of multiextremal and multicriteria problems, simulation models of groups of fields. Implementation of the computer-aided systems of planning and design.

#### Results

In article the main results of the works of Dorodnicyn Computing Centre of RAS are considered, devoted to the solution of various problems of complex development of oil and gas extraction regions, including problems of automation of processes of planning of development of groups of fields and design of general schemes of development of fields.

#### Conclusions

1. New results in regional programming, discrete optimization and combinatory methods of the solution of the multiextremal tasks are received, providing possibility of solution of tasks of the big dimension arising on design of general schemes of development of oil and gas fields.
2. The mathematical apparatus is created providing possibility of formalization, modelling and optimization of long-term planning of development of groups of oil and gas fields.
3. The various computer-aided systems of planning and the design implementing

listed above mathematical models, methods and algorithms are created.

4. Some of these systems were widely applied on design of general schemes of development of oil fields and on planning of development of gas output regions with the big confirmed economic effect.
5. The approach to creation of the integrated systems of regional planning and design, formed in a semi-automatic mode for a specific objective, is offered.

#### Keywords

long-term planning, design of general schemes of development, oil-gas extraction region, oil and gas fields, combinatory methods of discrete optimization, computer-aided systems of planning and design

#### References

1. Khachaturov V.R. *Matematicheskie metody regional'nogo programmirovaniya [Mathematical methods of regional programming]*. M.: Nauka, 1989. 304 p.
2. Metodika pol'zovaniya sistemoy dolgosrochnogo planirovaniya dobychi gaza dlya gazodobyvayushchego regiona s primeneniem matematicheskikh metodov i EVM [Technique of using system of long-term planning of gas production for the gas region with application of mathematical methods and computers]. M.: VNIIEgazprom, 1987. 148 p.
3. Margulov R.D., Khachaturov V.R., Fedoseev A.V. *Sistemnyy analiz v perspektivnom planirovanii dobychi gaza [The system analysis in advance planning of gas production]*. M.: Nedra, 1992. 287 p.
4. Khachaturov V.R., Bobylev V.N., Grigor'eva M.I. etc. *Komp'yuternaya sistema dlya prognozirovaniya pokazateley finansovo-ekonomicheskoy deyatel'nosti nefte dobyvayushchego predpriyatiya v novykh usloviyakh [Computer system for forecasting of indicators of financial and economic activity of the oil-extracting enterprise in new conditions]*// *Neftyanoe khozyaystvo*, 1995, No. 11. pp. 29-31.
5. Solomatin A.N. *Nekotorye optimizatsionnye zadachi dlya gruppy gazovykh mestorozhdeniy [Some optimization tasks for group of gas fields]*. M.: VTs RAN, 2009. 44 p.
6. Skiba A.K., Solomatin A.N., Khachaturov V.R. *Likvidatsiya gazovykh mestorozhdeniy: metodologiya i modelirovanie [Elimination of gas fields: methodology and modeling]*. M.: VTs RAN, 2004. 38 p.
7. Ashimov N.S., Veselovskiy V.E., Zlotov A.V. etc. *Investitsionnoe planirovanie v regione [Investment planning in the region]*. M.: VTs RAN, 2011. 55 p.
8. Solomatin A.N., Khachaturov V.R.

использован также для месторождений жидких углеводородов.

Также исследовались вопросы инвестиционного планирования на региональном уровне, впервые был предложен принцип множественности всех компонентов процесса инвестиционного планирования. Был разработан ряд моделей и алгоритмов, обеспечивающих процесс инвестиционного планирования на уровне добывающего региона: формирования интегрированных оценок инвестиционных проектов (коэффициентов полезности), автоматизированной генерации проектов, оптимизации состава проектов с учетом ограничений на финансирование и ресурсы, многокритериальной оценки и выбора проектов и т.д. [7].

Заключительным этапом процесса перспективного планирования обычно является выбор стратегий развития объектов нефтегазодобычи по многим критериям оценки на основе применения многокритериальной оптимизации. При решении задач многокритериальной оптимизации использовался аппроксимационно-комбинаторный метод декомпозиции и композиции систем и понятие реального проекта (плана, стратегии) — наилучшего в некотором смысле по многим критериям оценки [1]. Была предложена технология организации процесса многокритериальной оптимизации и выбора направлений этого процесса в зависимости от его характеристик, в том числе, с применением планарной визуализации многокритериальных альтернатив в виде так называемых профилей.

Дальнейшим развитием долгосрочного планирования в современных условиях является стратегическое планирование. При этом конкретные результаты моделирования и оптимизации позволяют обеспечить процесс стратегического планирования надежной количественной базой; с другой стороны, непосредственное использование этих результатов не столь эффективно без того инструментария, который был разработан в современном стратегическом планировании. Сложность задач, решаемых в процессе стратегического планирования в добывающем регионе, требует использования современных информационных технологий. Однако их применение во многом сдерживается качественным характером и слабой степенью формализации этих задач. В настоящее время для различных этапов процесса стратегического планирования разрабатываются формализованные модели, использующие результаты линейной алгебры, интервальной и нечеткой математики, продукционных систем и т.д. [8].

#### Проектирование генеральных схем обустройства нефтяных и газовых месторождений

Обустройство нефтяного или газового месторождения предназначено для обеспечения добычи, сбора, первичной переработки и транспорта нефти (газа) до магистральной сети трубопроводов. Оно представляет собой процесс создания на территории месторождения сложного комплекса сооружений и коммуникаций, который обычно осложняется географическими и климатическими особенностями территории: застройкой, наличием водных преград и заболоченностью

отдельных участков, ценностью земель для сельского и лесного хозяйства и т.д.

В процессе проектирования генеральной схемы обустройства месторождения в качестве основных рассматриваются следующие технологические системы, которые описываются идентичными математическими моделями [9]: кустования скважин (при наклонно-направленном бурении), сбора и транспорта нефти (газа), поддержания пластового давления (для нефтяных месторождений), электроснабжения и автомобильных дорог.

В качестве методологической основы для решения задачи проектирования используется аппроксимационно-комбинаторный метод, рассмотренный в [1, 10, 11]; он применяется для нахождения минимума функционала, заданного на подмножествах конечного множества элементов. Для решения таких задач дискретной оптимизации обычно используются различные методы, исключающих полный перебор - методы линейного и динамического программирования, последовательных расчетов, ветвей и границ и т.д. Аппроксимационно-комбинаторный метод указывает способы модификации перечисленных методов в направлении уменьшения их «чувствительности» к изменению условий задачи, что позволяет расширить класс задач, решаемых при помощи этих методов. Метод основан на использовании аппроксимирующей снизу функции, для которой имеются эффективные методы и алгоритмы определения не только оптимального решения, но и всех решений в некотором заданном диапазоне. Построив множество всех решений, близких к оптимальному по значению функционала, и пересчитав на этом множестве функционал исходной задачи, можно найти решение исходной задачи как наилучшее из просчитанных на множестве близких решений.

При решении задач проектирования используются следующие основные методологические подходы [1, 11].

Декомпозиция и композиция задач проектирования. В общем виде решение задачи проектирования обычно невозможно как из-за очень большой размерности данной задачи, так и из-за наличия специфических условий и ограничений при проектировании каждой из систем обустройства. Поэтому исходная задача проектирования разбивается на задачи проектирования для каждой из перечисленных технологических систем (декомпозиция задачи проектирования). При этом в соответствии с аппроксимационно-комбинаторным методом формируется не только оптимальный проект обустройства для каждой технологической системы, но и множество близких к оптимальному по значению функционала проектов, анализ объединения которых с близкими проектами для других систем обустройства (композиция задачи проектирования) и позволяет найти наиболее приемлемый — реальный проект для реализации.

Аппроксимирующие задачи. Для каждой из технологических систем задача проектирования также может оказаться неразрешимой как из-за сложного вида стоимостных функций строительства объектов и коммуникаций, так и из-за наличия специфических ограничений. Поэтому строится набор аппроксимирующих функций, для которых

разработаны методы формирования не только оптимального, но близких решений. А последующий пересчет исходного функционала задачи на таких близких решениях позволяет выбрать подмножество наиболее приемлемых вариантов.

Многокритериальные задачи. Используемые методы оптимизации позволяют получать оптимальные или приближенные решения только по одному критерию (обычно по стоимости проекта). Однако при выборе реального проекта для внедрения обычно необходим анализ и по ряду других, часто не формализуемых, критериев, таких как металлоемкость проекта, его соответствие нормам промышленной безопасности и т.д. Эту задачу позволяет решить наличие множества близких решений, анализ которых по совокупности дополнительных критериев оценки позволяет выбрать реальный проект.

Многозэкстремальные задачи. Особенно трудны задачи дискретной оптимизации, таких как задача размещения предприятий, определения структуры сетей и т.д., является их многоэкстремальность. Использование специализированных методов оптимизации, таких как метод последовательных расчетов, позволяет избежать при поиске оптимального решения полного перебора всех вариантов за счет отбраковки заведомо неоптимальных решений.

Имитационное проектирование. Существенным элементом процесса проектирования является возможность моделирования проектировщиком собственных проектных решений: он может непосредственно задавать некоторые элементы проекта (например, размещение пунктов сбора и переработки) и использовать средства автоматизации для остальных элементов (например, для оптимизации структуры сети и расчета ее параметров). Это дает возможность сравнивать автоматически формируемые варианты проектов с вариантами, получаемыми традиционными методами проектирования, а также производить анализ близких решений по дополнительным критериям оценки.

Динамическое проектирование. В процессе освоения месторождения неизбежно происходят отклонения от проекта, уточняются данные проекта разработки, возникают дополнительные ограничения и требования, изменяется информация о стоимости строительства объектов и коммуникаций и т.д. В этом случае проект необходимо пересчитать с учетом как уже построенных на данный момент объектов и коммуникаций, так и новой информации. Такой процесс отслеживания состояния проекта и его периодических корректировок (при необходимости), реализующий обратную связь, называется динамическим проектированием.

При проектировании генеральных схем обустройства нефтяных месторождений последовательно решаются следующие основные задачи [1, 9, 11].

1. Решается задача определения оптимального размещения различных нефтепромысловых объектов: кустов нагнетательных и эксплуатационных скважин, замерных установок, комплексных сборных пунктов, компрессорных станций и т.д. Решение задачи состоит в выборе из множества всех возможных точек строительства объектов данного типа такого

подмножества, на котором достигается минимум функции, определяющей суммарную стоимость строительства объектов данного типа и сети коммуникаций, соединяющей эти объекты с источниками сырья. Для решения задачи применяется модифицированный алгоритм последовательных расчетов, позволяющий определять не только оптимальное решение задачи, но множество всех решений, близких к оптимальному.

2. На следующем этапе решаются задачи определения оптимальной структуры сетей различного назначения [12]. Это сети сбора и транспорта нефти и попутного газа, сети водоводов высокого и низкого давления, сети дорог и электроснабжения. Данная задача ставится как задача построения сети с равными функциями стоимости проведения коммуникации в зависимости от потока по данной коммуникации. Для ее решения разработан специальный алгоритм, основанный на направленном переборе всех деревьев полного графа, в процессе которого при помощи ряда правил, основанных на свойствах оптимального решения данной задачи, отбрасываются большие группы деревьев и промежуточных поддеревьев.

3. Далее решаются задачи трассирования коммуникаций, причем используемые методы решения зависят от способа представления территории. Например, если задана сетка категоричности территории и соответствующая ей сетка стоимости проведения коммуникаций для различных элементов этой сетки, то для определения оптимальной трассы применяется алгоритм, основанный на алгоритме Дейкстры. При наличии на территории месторождения запретных зон для проведения коммуникаций (реки, болота, сельхозугодья), аппроксимированных фигурами второго порядка (круги, эллипсы), для решения задачи трассирования применяется метод локальных вариаций. При задании запретных зон в виде замкнутых многоугольников применяется алгоритм, основанный на методе динамического программирования.

4. При более детальных расчетах решается задача определения параметров трубопроводных сетей, таких как диаметры отдельных участков трубопроводов и давления в узлах сети при наличии ограничений на перепады давления и заданных значениях потребления/расхода в узлах-источниках и узлах-стоках. С этой целью применяются модели и методы решения задач оптимизации многошаговых процессов, заданных на ориентированном дереве [13].

5. При необходимости решаются задачи построения и использования «деревя исходных» для анализа аварийности нефтепромысловых объектов, построения и использования «полей риска», выбора параметров надежности, промышленной и экологической безопасности на этапе проектирования. С этой целью были разработаны модели и методы оценки и управления параметрами надежности и безопасности нефтегазовых комплексов, а также систем нефте- и газоснабжения [14].

В настоящее время важнейшую роль приобретают проблемы формирования и оценки стратегий освоения морских месторождений углеводородов. Была разработана модель с распределенным ресурсом функционирования шельфового месторождения [15], которая

*Matematicheskoe modelirovanie v strategicheskoy upravlenii regionom [Mathematical modeling in strategic management of the region].*

М.: VTs RAN, 2007. 60 p.

9. Khachaturov V.R., Arzhanov F.G., Astakhov N.D. etc. *Sistema proektirovaniya general'nykh skhem obustroystva neftyanykh mestorozhdeniy na EVM i opyt ee ispol'zovaniya [System of design of general schemes of arrangement of oil fields on the computers and experience of its use]. Obzornaya informatsiya, ser. «Neftepromyslovoe stroitel'stvo».* М., VNIIOENG, 1980. 69 p.
10. Khachaturov V.R. *Approximatsionno-kombinatornyy metod dekompozitsii i kompozitsii sistem i konechnye topologicheskie prostranstva, reshetki, optimizatsiya [Approximation-combinatorial method of decomposition and composition of systems and final topological spaces, lattices, optimization] // ZhVM i MF, 1985, Vol. 25, No. 2. pp. 1777-1794.*
11. Khachaturov V.R., Veselovskiy V.E., Zlotov A.V. etc. *Kombinatornye metody i algoritmy resheniya zadach diskretnoy optimizatsii bol'shoy razmernosti [Combinatorial methods and algorithms for the solution of problems of discrete optimization of big dimension].* М.: Nauka, 2000. 354 p.
12. Zlotov A.V., Khachaturov V.R. *Primenenie approximatsionno-kombinatornogo metoda dlya resheniya zadach postroeniya optimal'nykh setey s nelineynymi funktsiyami stoimosti reber [Application of an approximation-combinatorial method for the solution of problems of creation of optimal networks with nonlinear functions of edges cost].* М.: VTs AN SSSR, 1984. 24 p.
13. Kovalenko A. G. Khachaturov V. R. *Algoritmy resheniya nekotorykh zadach optimizatsii mnogoshagovykh protsessov approximatsionno-kombinatornym metodom I, II [Algorithms of optimization of multistep processes using an approximation-combinatorial method] // Izvestiya AN SSSR. Tekhnicheskaya kibernetika. 1982, No. 1. pp. 3-17; No. 2. pp. 46-55.*
14. Zlotov A.V., Livanov Yu.V., Khachaturov V.R. *Metodika i komp'yuternye modeli proektirovaniya s uchetom nadezhnosti i bezopasnosti ob'ektov i kommunikatsiy infrastruktury regiona [Technique and computer models of design taking into account reliability and safety of objects and communications]*

of the region infrastructure] // Mater. III Mezhd.nauch. konf. «Fundamental'nye problemy sistemnoy bezopasnosti i ustoychivosti», 20-22 aprelya 2011 g., Moskva-Zvezdnyy gorodok. M., 2012. pp. 77-80.

15. Khachaturov V.R., Tuev S.V. *Matematicheskie modeli i sistemy dlya formirovaniya i otsenki strategiy osvoeniya morskikh mestorozhdeniy uglevodorodov* [Mathematical models and systems for formation and assessment of strategies of development of sea fields of hydrocarbons]. M.: VTs RAN, 2002. 72 p.
16. Khachaturov V.R., Zlotov A.V., Bobylev V.N. etc. *Kompleks programm na EVM dlya osvoeniya neftegazovykh rayonov* [Complex of computer programs for development of oil and gas areas]. M.: VTs RAN, 2000. 36 p.
17. Skiba A.K., Solomatin A.N. *Modelirovanie i optimizatsiya strategiy razrabotki gazovykh mestorozhdeniy* [Modeling and optimization of strategies of gas fields development]. M.: VTs RAN, 2012. 40 p.
18. Solomatin A.N. *Avtomatizirovanny sintez i adaptatsiya sistem regional'nogo programmirovaniya* [The automated synthesis and adaptation of systems of regional programming]. M.: VTs RAN, 1994. 32 p.

характеризуется тремя основными постулатами: о возможности полного извлечения ресурса месторождения, о линейном однопараметрическом падении дебита и о пропорциональности начального дебита вновь вводимых скважин объему неизвлеченного ресурса. В описании модели с непрерывным временем в дифференциальной форме основное уравнение модели является квадратичным, причем, несмотря на нелинейность модели, удалось найти достаточно простые и адекватные решения, которые были аналитически исследованы для различных режимов эксплуатации месторождения — режимов разработки, постоянной и падающей добычи. При решении задач кустования для шельфовых месторождений каждая такая задача дезагрегируется на две — определения очередности ввода скважин внутри куста и определения очередности ввода кустов, которые решаются с применением методов многокритериальной оптимизации.

### Автоматизированные системы планирования и проектирования

Ниже приводятся краткие описания автоматизированных систем планирования и проектирования, разработанных в ВЦ РАН и реализующих рассмотренные выше математические модели, методы и алгоритмы [16].

Система перспективного планирования добычи газа по укрупненным показателям (СПДГ) предназначена для формирования стратегий развития группы газовых месторождений, обеспечивая расчет объемов добычи газа и основных технико-экономических показателей добычи [2, 3]. Система позволяет решать следующие основные задачи:

- распределение в имитационном режиме объемов добычи газа в динамике между месторождениями при заданных планах добычи газа, в том числе с учетом топологии и характеристик сети региональных газопроводов;
- формирование и визуализация сети региональных газопроводов;
- расчет технологических показателей добычи и транспорта газа, включая объемы бурения, фонды скважин, дебиты и пластовые давления, потоки и пропускные способности трубопроводов, количество и сроки ввода трубопроводов и т.д.;
- расчет экономических показателей добычи и транспорта газа, включая капиталовложения и издержки в добычу и транспорт газа;

- расчет экономических показателей функционирования газодобывающего объединения, включая доходы и прибыли, налоги, характеристики кредитов;
- расчет показателей развития социальной сферы, включая количество и заработную плату занятых различных категорий, затраты жилищное строительство;
- расчет динамических и агрегированных показателей финансового положения, анализ и прогноз финансового положения газодобывающего предприятия;
- обеспечение многовариантных расчетов и выбор реального плана для внедрения с использованием методов многокритериальной оптимизации.

Система многократно использовалась при расчетах долгосрочных планов добычи газа для различных газодобывающих регионов: Северо-Тюменской газоносной провинции, Оренбургскому газоконденсатному месторождению, группам месторождений Восточной Украины, шельфа Черного моря и т.д. Кроме того, система использовалась:

- для определения очередности и сроков ввода Ямбургского месторождения и группы более мелких месторождений — Тазовского, Юбилейного, Песцового и т.д.;
- при проектировании обустройства Уренгойского месторождения совместно с Системой проектирования генеральных схем обустройства месторождений;
- при анализе перспектив развития нефте- и газодобычи в Восточной Сибири совместно с Системой формирования перспективных планов добычи нефти и Системой проектирования генеральных схем обустройства.

Система моделирования и оптимизации добычи газа является дальнейшим развитием системы СПДГ в современных условиях [17]. В отличие от СПДГ, в системе предусмотрено нахождение стратегии развития группы газовых месторождений, оптимальной по критерию максимума накопленной добычи газа по группе, существенно улучшен блок многокритериальной оптимизации. Система реализована на языке С# для среды Windows 7 как составная часть более крупной системы ОАО «Газпром»; примеры работы системы приведены на рис. 1–2.

Система формирования планов добычи нефти (СФПДН) предназначена для планирования деятельности нефтедобывающих предприятий региона на ближнюю и дальнюю перспективу, обеспечивая расчет

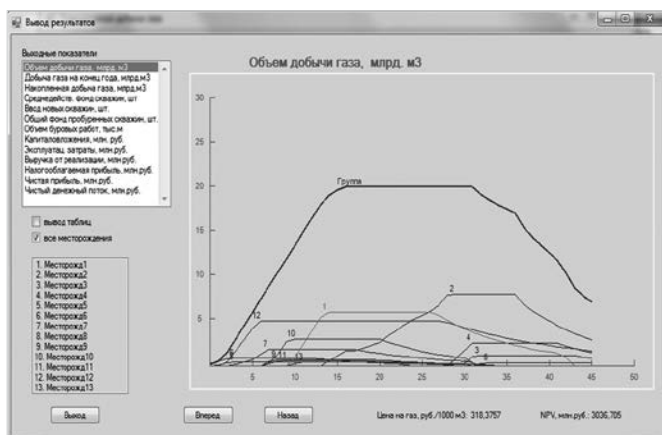


Рис. 1 — Динамика добычи газа по группе месторождений

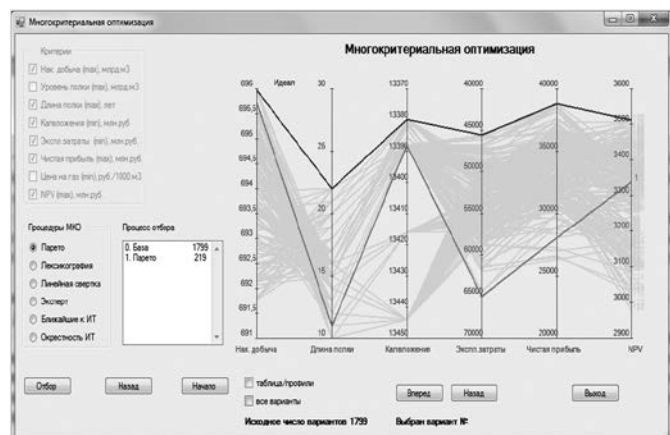


Рис. 2 — Вывод результатов многокритериальной оптимизации в виде профилей

технико-экономических показателей добычи нефти в динамике по месторождениям [4].

По своей идеологии система близка к системе СПДГ, отличаясь от нее более сложной моделью группы месторождений, составом входных и выходных показателей, диалоговым интерфейсом. Дополнительно рассчитываются добыча жидкости из новых и перешедших скважин, объем закачки воды, объемы бурения нагнетательных и вспомогательных скважин, ввод, фонды и выбытие нагнетательных и вспомогательных скважин, дебиты скважин по нефти и жидкости, коэффициент обводненности и т.д. Кроме того, решаются разнообразные оптимизационные задачи в условиях ограничений на фонды добывающих, нагнетательных, резервных скважин и на другие имеющиеся ресурсы.

Система неоднократно использовалась при составлении планов добычи нефти для различных групп нефтяных месторождений Среднего Приобья, Коми АССР, а также для решения задач прогнозирования добычи нефти на Самотлорском месторождении.

Система проектирования генеральных схем обустройства нефтяных месторождений (СПГСО) предназначена для проектирования генеральных схем как отдельных технологических систем обустройства месторождений, так и любой их совокупности [1, 9]. Система позволяет:

- определять оптимальные варианты проектов генеральных схем технологических систем обустройства, а также варианты, близкие к оптимальному по различным критериям;
- определять места оптимального размещения различных нефтепромысловых объектов: кустов нагнетательных и эксплуатационных скважин, замерных установок, комплексных сборных пунктов, компрессорных станций и т.д.;
- формировать оптимальную структуру нефтепромысловых сетей различного назначения: сбора и транспорта нефти и попутного газа, водоводов высокого и низкого давления, дорог, электроснабжения;
- определять трассы коммуникаций различного назначения с учетом неоднородности территории и наличия запретных зон для их проведения;
- рассчитывать оптимальные параметры трубопроводных сетей, включая диаметры отдельных участков сети и давления в узлах сети;
- рассчитывать генеральные схемы в динамике на любой период разработки месторождения, определяя очередность ввода объектов, коммуникаций и изменений их производственных характеристик во времени (динамика капиталовложений, добыча нефти и попутного газа, закачка воды, строительство дорог, трубопроводов и т.д.);
- проектировать размещение нефтепромысловых объектов с учетом эффекта от агломерации разнородных объектов на одном участке территории;
- учитывать при проектировании текущее состояние обустройства;
- осуществлять моделирование возможных решений проектировщика для поиска реального проекта в режиме «проектировщик-компьютер».

На основе СПГСО были разработаны следующие системы.

- СПГСО газовых месторождений использует тот же математический аппарат и решает те же задачи, что и СПГСО, отличаясь в основном набором входных и выходных показателей, а также отсутствием технологической системы ППД.
- СПГСО газодобывающих регионов обеспечивает решение задач размещения и развития межпромысловых объектов и коммуникаций в регионе в зависимости от планов добычи газа, формируемых системой СПДГ. Основными объектами являются газоперерабатывающие заводы, компрессорные станции, установки подготовки газа, основными коммуникациями – межпромысловые и магистральные газопроводы.

Система СПГСО широко использовалась при проектировании генеральных схем обустройства нефтяных месторождений Западной Сибири (Самотлорское, Федоровское, Тепловское, Савуйское, Южно-Балыкское, Повховское, Холмогорское), Коми АССР (Усинское, Возейское), Поволжья (Медведевское), Казахстана (Каламкас, Каражанбас), газовых месторождений (Уренгойское) и т.д., а также при проектировании сети газопроводов Западной Сибири.

На рис. 3–4 представлены некоторые результаты работы СПГСО.

Система размещения объектов и коммуникаций (СРОК) предназначена для решения задач размещения пунктов переработки сырья, задач построения и трассирования коммуникаций между источниками сырья, пунктами переработки и потребления, расчета параметров трубопроводных сетей [16]. Диалоговый режим работы системы позволяет оперативно просматривать различные варианты размещения с определением и просмотром параметров сформированного проекта. Система использовалась при решении задач размещения ряда территориально-производственных комплексов.

Система проектирования и анализа сетей (СПАС) предназначена для формирования и анализа транспортных сетей различного назначения и позволяет решать следующие сетевые задачи: сетевая распределительная задача, задача о максимальном потоке минимальной стоимости, задача проектирования структуры сети, гидравлические расчеты сетей [16]. Система использовалась при решении задач анализа транспортных сетей различного назначения: сетей нефтепроводов Прикаспия, системы нефтепродуктообеспечения Вьетнама, развития газотранспортных сетей Восточной Сибири и т.д.

Система оценки вариантов освоения шельфовых месторождений нефти и газа предназначена для формирования и оценки вариантов сеток скважин, размещения буровых платформ и стратегий освоения шельфовых месторождений нефти и газа, включая очередность и динамику ввода платформ и скважин [15]. Система использовалась при проектировании освоения ряда шельфовых месторождений нефти и газа, таких как месторождения Одопу и Чайво на Сахалине, месторождения Белый Тигр и Дракон во Вьетнаме, ряд месторождений шельфа Черного и Каспийского морей.

Система синтеза и анализа гидравлических сетей (ССАГС) предназначена для анализа и синтеза различных гидравлических систем, включая системы промышленного сбора нефти и газа, ППД, транспорта нефти, газа и продуктов из них, системы водо-, теплоснабжения и т.д. [13]. Система позволяет:

- задавать и корректировать как принципиальные схемы трубопроводных сетей, так и исходную информацию о параметрах сетей и параметрах потока;
- детально задавать схемы обвязок отдельных объектов;
- анализировать принципиальные схемы сетей;
- проводить декомпозицию и композицию сетей, включать гидравлические элементы любого типа, сочетая опыт проектировщика и возможности автоматизации;
- рассчитывать как технологическое, так и экономическое взаимодействие участников рынков воды, теплоносителя, тепла, производить расчет цен на всех уровнях купли, транспорта и продажи конечному потребителю.

Система неоднократно использовалась при анализе и разработке рекомендаций по развитию и реконструкции систем тепло-, водо- и газоснабжения многих городов Поволжья, а также внутренних тепловых сетей ряда ТЭЦ и ГРЭС.

Система обеспечения, надежности, промышленной и экологической безопасности нефтегазовых комплексов (СОНПЭБ) позволяет решать следующие задачи [14]:

- анализ аварийных ситуаций, включая оценку вероятности аварий и их последствий на этапах проектирования и эксплуатации объектов комплексов;
- оценка возможного загрязнения при аварийных выбросах, включая расчет полей концентраций загрязняющих веществ за заданный промежуток времени и при заданной ветровой обстановке;
- расчёт индивидуального и коллективного риска персонала, жителей санитарной зоны и третьих лиц при аварийных ситуациях;
- формирование карт экологической оценки территории, распределения экологического ущерба и антропогенных воздействий;

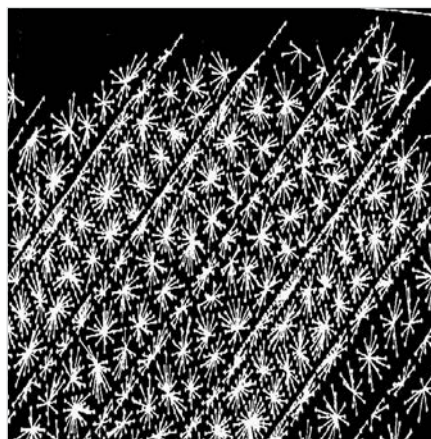


Рис. 3 — Схема кустования скважин Самотлорского месторождения (фрагмент)

- корректировка проектов с учетом показателей надежности, промышленной и экологической безопасности.

Система применялась при проектировании месторождений шельфа Черного и Охотского морей, Ново-Уренгойского газохимического комплекса, для анализа экологической безопасности нефте- и газоперерабатывающих заводов (Оренбург, Чимкент), используется при разработке деклараций промышленной безопасности аварийно-опасных объектов нефтегазовой отрасли.

Интегрированные системы регионального программирования. В зависимости от конкретных задач, возникающих в процессе комплексного освоения нефтегазодобывающего региона, могут использоваться различные совокупности перечисленных выше систем. Например, системы СПДГ, СПФДН и СПГСО применялись одновременно при анализе перспектив развития нефте- и газодобычи в

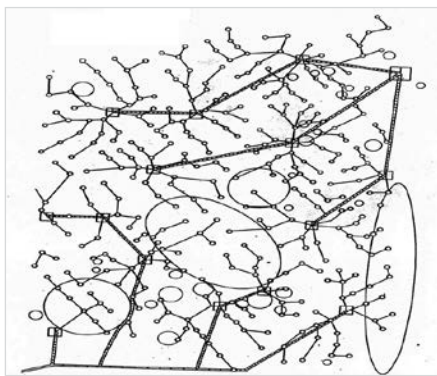


Рис. 4 — Схема сбора и транспорта нефти Самотлорского месторождения (фрагмент)

Западной и Восточной Сибири.

Поэтому возникает необходимость в разработке методов и средств, обеспечивающих интеграцию таких разнородных, автономных и независимо разработанных систем для решения конкретных задач. Интеграция систем может производиться по различным направлениям: отраслевому (нефть, газ), территориальному (группа месторождений, месторождение), функциональному (долгосрочное планирование, стратегическое планирование, проектирование и т.д.).

Такую интеграцию предлагается производить в рамках интегрированных систем регионального программирования (ИСРП). Неотъемлемой частью ИСРП является инструментальной разработки интегрированных систем ИРИС; эта инструментальная система должна обеспечить формирование, функционирование и сопровождение каждой интегрированной системы, выступая в качестве ее адаптирующего элемента.

Были предложены основные принципы построения ИСРП и рассмотрены желаемые свойства этих систем. ИСРП должны формироваться под конкретную задачу как модульные, адаптивные, открытые системы из отдельных составляющих систем-элементов и функционировать для объектов различных уровней добывающего региона в распределенной вычислительной среде [18]. При этом ИСРП существуют как единое целое лишь в виде компьютерной модели, а функционирование ИСРП сводится к вызову отдельных систем в соответствии с этой моделью для работы в распределенной среде.

#### Итого

В статье рассмотрены основные результаты

работ, проводимых в Вычислительном центре им. А.А. Дородницына РАН по решению задач комплексного освоения нефтегазодобывающих регионов, включая задачи автоматизации процессов планирования разработки групп месторождений и проектирования генеральных схем освоения месторождений.

#### Выводы

1. Получены новые результаты в области регионального программирования, дискретной оптимизации и комбинаторных методов решения многоэкстремальных задач, обеспечивающие возможность решения задач большой размерности, возникающих при проектировании генеральных схем освоения нефтяных и газовых месторождений.
2. Разработан математический аппарат, обеспечивающий возможность формализации, моделирования и оптимизации перспективного планирования разработки групп нефтяных и газовых месторождений.
3. Разработаны различные автоматизированные системы планирования и проектирования, реализующие перечисленные математические модели, методы и алгоритмы.
4. Часть из этих систем широко применялись при проектировании генеральных схем освоения нефтяных месторождений и при планировании разработки газодобывающих регионов с большим подтвержденным экономическим эффектом.
5. Предложен подход к построению интегрированных систем регионального планирования и проектирования, формируемых в полуавтоматическом режиме под конкретную задачу.

#### Список использованной литературы

1. Хачатуров В.Р. Математические методы регионального программирования. М.: Наука, 1989. 304 с.
2. Методика пользования системой долгосрочного планирования добычи газа для газодобывающего региона с применением математических методов и ЭВМ. М.: ВНИИ-Газпром, 1987. 148 с.
3. Маргулов Р.Д., Хачатуров В.Р., Федосеев А.В. Системный анализ в перспективном планировании добычи газа. М.: Недра, 1992. 287 с.
4. Хачатуров В.Р., Бобылев В.Н., Григорьева М.И., Крылов И.А., Соломатин А.Н., Федосеев А.В. Компьютерная система для прогнозирования показателей финансово-экономической деятельности нефтедобывающего предприятия в новых условиях // Нефтяное хозяйство, 1995, №11. С.29-31.
5. Соломатин А.Н. Некоторые оптимизационные задачи для группы газовых месторождений. М.: ВЦ РАН, 2009. 44 с.
6. Скиба А.К., Соломатин А.Н., Хачатуров В.Р. Ликвидация газовых месторождений: методология и моделирование. М.: ВЦ РАН, 2004. 38 с.
7. Ашимов Н.С., Веселовский В.Е., Злотов А.В., Крылов И.А., Соломатин А.Н., Хачатуров В.Р. Инвестиционное планирование в регионе. М.: ВЦ РАН, 2011. 55 с.
8. Соломатин А.Н., Хачатуров В.Р. Математическое моделирование в стратегическом управлении регионом. М.: ВЦ РАН, 2007. 60 с.
9. Хачатуров В.Р., Аржанов Ф.Г., Астахов Н.Д., Борисенко В.К., Веселовский В.Е., Донгарян Ш.С., Дунаев Н.П., Злотов А.В., Крылов И.А., Кузоваткин Р.И., Николаев Б.А., Сигал И.Х., Филановский В.Ю. Система проектирования генеральных схем обустройства нефтяных месторождений на ЭВМ и опыт ее использования. Обзорная информация, сер. «Нефтепромысловое строительство». М., ВНИИОЭНГ, 1980. 69 с.
10. Хачатуров В.Р. Аппроксимационно-комбинаторный метод декомпозиции и композиции систем и конечные топологические пространства, решетчатая оптимизация // ЖВМ и МФ. 1985. Т. 25. №2. С. 1777-1794.
11. Хачатуров В.Р., Веселовский В.Е., Злотов А.В., Калдыбаев С.У., Калиев Е.Ж., Коваленко А.Г., Монтлевич В.М., Сигал И.Х., Хачатуров В.Р. Комбинаторные методы и алгоритмы решения задач дискретной оптимизации большой размерности. М.: Наука, 2000. 354 с.
12. Злотов А.В., Хачатуров В.Р. Применение аппроксимационно-комбинаторного метода для решения задач построения оптимальных сетей с нелинейными функциями стоимости ребер. М.: ВЦ АН СССР, 1984. 24 с.
13. Коваленко А. Г. Хачатуров В. Р. Алгоритмы решения некоторых задач оптимизации многошаговых процессов аппроксимационно-комбинаторным методом I, II // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. 1982. № 1. С. 3-17; № 2. С. 46-55.
14. Злотов А.В., Ливанов Ю.В., Хачатуров В.Р. Методика и компьютерные модели проектирования с учетом надежности и безопасности объектов и коммуникаций инфраструктуры региона // Матер. III Межд.науч. конф. «Фундаментальные проблемы системной безопасности и устойчивости», 20-22 апреля 2011 г., Москва-Звездный городок. М., 2012. С. 77-86.
15. Хачатуров В.Р., Туев С.В. Математические модели и системы для формирования и оценки стратегий освоения морских месторождений углеводородов. М.: ВЦ РАН, 2002. 72 с.
16. Хачатуров В.Р., Злотов А.В., Бобылев В.Н., Веселовский В.Е., Крылов И.А., Крылова Т.О., Ливанов Ю.В., Сигал И.Х., Скиба А.К., Соломатин А.Н., Туев С.В. Комплекс программ на ЭВМ для освоения нефтегазовых районов. М.: ВЦ РАН, 2000. 36 с.
17. Скиба А.К., Соломатин А.Н. Моделирование и оптимизация стратегий разработки газовых месторождений. М.: ВЦ РАН, 2012. 40 с.
18. Соломатин А.Н. Автоматизированный синтез и адаптация систем регионального программирования. М.: ВЦ РАН, 1994. 32 с.