



На правах рукописи

**БАУЛИН ЕВГЕНИЙ СЕРГЕЕВИЧ**

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ АКТУАЛИЗАЦИЯ  
ОПТИМИЗАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ПЛАНИРОВАНИЯ  
НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ/НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ**

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление  
технологическими процессами и производствами  
(промышленность) (технические науки)

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2014



005548373

15 МАЯ 2014

Работа выполнена на кафедре «Техническая кибернетика» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)»

- Научный руководитель – Хохлов Александр Сергеевич  
доктор технических наук  
начальник отдела систем планирования и оперативного управления производством закрытого акционерного общества «Хоневелл»
- Официальные оппоненты – Бахтадзе Наталья Николаевна  
доктор технических наук, профессор  
заведующая лабораторией «Идентификация систем управления»  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем управления имени В.А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН)
- Софиев Александр Эльханович  
доктор технических наук, профессор  
заведующий кафедрой «Техническая кибернетика, мониторинг и автоматизированные системы контроля»  
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)»
- Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)»

Защита состоится 19 июня 2014 года в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д212.200.09 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Российский государственный университет нефти и газа имени И. М. Губкина» по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, 65, ауд. 260.

Отзывы на диссертацию и автореферат, заверенные печатью, просим направлять в двух экземплярах по адресу совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Российский государственный университет нефти и газа имени И. М. Губкина».

Автореферат разослан 06 мая 2014 г. Объявление о защите диссертации и автореферат размещены на официальном сайте РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина <http://www.gubkin.ru> и направлены для размещения в сети Интернет Министерства образования и науки Российской Федерации по адресу: <http://vak2.ed.gov.ru>.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д212.200.09  
кандидат технических наук



Д.Н. Великанов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Введение

**Актуальность.** На многих нефтеперерабатывающих предприятиях для решения задачи оптимального производственного планирования используются системы моделирования, с помощью которых можно построить математическую модель производства и рассчитать производственную программу. Математические модели производства позволяют при решении задачи оптимизационного планирования учитывать логические и химико-технологические особенности работы производства, прослеживать показатели качества готовой продукции от показателей качества нефтяного сырья, отразить сложившуюся экономическую ситуацию на рынке. Примером системы такого класса на российских и зарубежных заводах является RPMS (Honeywell) – система моделирования нефтехимии и нефтепереработки.

Математическая формулировка задачи планирования для нефтеперерабатывающего предприятия представляет собой задачу математического программирования большой размерности (тысячи ограничений и переменных). Главным критерием решения такой задачи является максимальная маржинальная прибыль предприятия при условии выполнения технико-экономических ограничений накладываемых на производственную программу. Ограничения на производство формируют матрицу задачи, в которой коэффициенты нелинейно зависят от значения переменных. Основные трудности при формировании матрицы задачи планирования связаны с учетом в модели уникальных свойств нефти, как сырья переработки, и сложностью нефтехимической технологии, поэтому всегда при формировании моделей планирования большое значение придается их актуализации.

Осуществить актуализацию модели означает сформировать коэффициенты матрицы задачи, таким образом, чтобы решение задачи было способно адекватно отразить развитие производственной ситуации на текущий горизонт планирования.

Эффективная эксплуатация оптимизационных моделей достаточной сложности и большой размерности предполагает, что системы планирования такого класса используются специалистами высокой квалификации, сочетающими как знания

возможностей системы и технологических особенностей производства, так и основ математического программирования. Перед тем как рассчитать производственный план с помощью RPMS-модели пользователь должен подготовить актуальные исходные данные о производстве и ввести их в модель, решив для этого целый ряд задач, например, таких как:

- оценка фракционного состава дистиллятов и оценка требуемых показателей качества нефтепродуктов;
- прогноз отборов и показателей качества продуктов на установках;
- прогноз норм энергопотребления;

От того на сколько точно пользователь подготовит необходимые исходные данные и будет зависеть результат решения оптимизационной модели. Таким образом, для пользователей математических систем моделирования крайне важно иметь средства автоматизированной актуализации моделей планирования, которые бы позволяли:

1. Снизить трудоемкость и время настройки модели;
2. Внедрять в эксплуатацию на предприятиях более точные модели планирования;
3. Снизить количество ошибок ввода исходных данных, связанных с человеческим фактором.

Кроме того, актуализация моделей планирования для получения плана на текущий месяц является очень трудоемким процессом, который требует больших усилий и временных затрат (несколько рабочих дней). После разработки производственной программы на предприятии возникает задача её реализации. Для этого внутри текущего месяца необходимо несколько раз решать задачу оперативного планирования, формируя промежуточные плановые задачи на неделю или декаду с учетом фактической информации о производстве. Необходимо учитывать, что для актуализации моделей оперативного планирования на неделю или декаду у модельера есть очень мало времени (несколько часов). Поэтому,

используя только стандартные способы ручной актуализации моделей, пользователь может не успеть подготовить во время оперативный план работы предприятия.

**Целью диссертационной работы** является разработка универсальной методологии актуализации моделей текущего и оперативного планирования для их эффективного применения на реально действующих объектах типа НПЗ/НХК, и применение этой методологии путем создания программных коммерческих продуктов для решения двух задач:

1. Учета переменных норм потребления энергоресурсов в зависимости от загрузки установок в моделях текущего планирования.
2. Детализации текущего плана в моделях оперативного планирования.

**Методы исследования.** Основные результаты получены с использованием методов моделирования производственных процессов, исследования операций, нелинейного частично-целочисленного математического программирования.

**Научная повизна.** Совокупность проведенных в диссертации теоретических и прикладных исследований позволила предложить методологию актуализации оптимизационных моделей для решения задачи текущего планирования на месяц, квартал, год и оперативного планирования на неделю, декаду. При этом:

- Разработана универсальная методология актуализации моделей текущего и оперативного планирования.
- Разработан метод построения математических моделей, позволяющий автоматически выбирать способ актуализации моделей: перед началом поиска оптимального решения или в процессе поиска решения.
- Разработан метод линеаризации нелинейных подмоделей технологических процессов в оптимизационных моделях планирования нефтеперерабатывающих/нефтехимических производств.

**Защищаемые положения.**

- Предложена универсальная методология актуализации моделей текущего и оперативного планирования, которая может быть реализована в различных системах математического моделирования нефтехимии/нефтепереработки.

- Разработанные математические модели объектов типа НПЗ/НХК для решения задач текущего и оперативного планирования.
- Алгоритмы и программное обеспечение для реализации и внедрения разработанных моделей на реальных действующих объектах типа НПЗ/НХК.

**Практическая значимость.** В диссертационной работе:

- Предложен подход к актуализации моделей планирования для решения задачи текущего планирования. Данный подход был реализован на примере решения задачи учета переменных норм расхода энергоресурсов в RPMS-моделях с использованием разработанной дополнительно к базовой комплектации системы RPMS специализированной опции R\_FRESH.
- Разработан метод построения многопериодных моделей для решения задачи детализации текущего плана деятельности НПЗ/НХК с учетом фактической информации о производстве.
- Разработан подход к актуализации моделей планирования для решения задачи оперативного планирования по неделям, декадам. Данный подход был реализован на линейаризованных RPMS-моделях с использованием разработанной дополнительно к базовой комплектации системы RPMS опции R\_LINE.

**Реализация результатов работы.** Результаты исследований, проведенных в диссертации, внедрены в центральном офисе и на ряде дочерних предприятий компании ОАО «ЛУКОЙЛ» для решения задачи производственного планирования с учетом переменных норм потребления энергоресурсов в рамках выполнения договорных работ компании Honeywell. Внедрение опции R\_FRESH дало возможность повысить точность планирования расхода энергоресурсов на установках. Работоспособность предложенного подхода к актуализации моделей планирования для решения задачи детализации плана была проверена на реальных и тестовых моделях нефтеперерабатывающих заводов. Результаты проверки показали эффективность использования предложенного подхода за счет снижения

трудоемкости и сокращения времени на построение и актуализацию многопериодных моделей.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 50-й, 52-й, 53-й, 54-й научных конференциях МФТИ (Москва 2007, 2009, 2010, 2011); научных международных конференциях «Управление развитием крупномасштабных систем – MLSD 2010 и 2012» (Москва 2010, 2012); научно-практической конференции «Передовые информационные технологии, средства и системы автоматизации и их внедрение на российских предприятиях» (Москва 2011); X Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России» (Москва 2014).

**Публикации.** По теме диссертации автором опубликовано 11 печатных работ, в том числе 3 из них в периодических изданиях, включенных в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий ВАК.

**Структура и объем диссертации.** Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, двух приложений, содержит 149 страниц текста вместе с приложениями, содержит 64 рисунка, 39 таблиц, список литературы из 70 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснованы актуальность темы, выбор цели, объекта и направления исследований, дается общая характеристика диссертационной работы. Приводятся структура и общее содержание работы по главам.

**В главе I** рассматриваются особенности и существующие проблемы при решении задач планирования нефтеперерабатывающего производства. Описываются существующие на сегодняшний день методологические подходы к построению, внедрению и сопровождению математических моделей производства, позволяющих решать задачи производственного планирования. Обосновывается необходимость предлагаемых в диссертационной работе подходов, позволяющих автоматизированно осуществлять актуализацию статических моделей двух типов:

текущего планирования на месяц, квартал, год и оперативного планирования на неделю или декаду.

На заводах в части планирования ключевое значение имеют две задачи: текущего и оперативного планирования. Текущее планирование – это составление оптимальной производственной программы на длительный текущий отрезок времени (год, квартал, месяц, несколько недель). Под оперативным планированием понимают задачу детализации производственного плана, полученного путем решения задачи текущего планирования, на ближайший короткий календарный отрезок времени (неделя, декада) с учетом полученной фактической информации о производстве.

Задача оптимизации производственной программы нефтеперерабатывающих предприятий представляет собой нелинейную задачу математического программирования большой размерности (несколько тысяч переменных). Нелинейность задачи планирования производства возникает из-за сложных зависимостей переменных модели от параметров производства, например: материальные балансы установок изменяются в зависимости от качества поступающего сырья; расход потребления энергоресурсов зависит от загрузки установок и др. Математическую постановку задачи оптимального производственного планирования в общем виде можно записать следующим образом:

$$F = \sum_{j=1}^m c_j x_j - \sum_{j=m+1}^n d_j x_j \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$\underline{b}_i \leq \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j + \sum_{j=n+1}^p a_{ij}(x_j) x_j \leq \overline{b}_i, i = 1, \dots, k, \quad (2)$$

$$x_j \geq 0, j = 1, \dots, p. \quad (3)$$

Здесь  $c_j$  – цена продажи единицы  $x_j$ ,  $j = 1, \dots, m$  – переменные продажи потоков модели;  $d_j$  – стоимость покупки единицы  $x_j$ ,  $j = m+1, \dots, n$  – переменные покупки потоков модели;  $x_j$ ,  $j = n+1, \dots, p$  – переменные внутренних потоков модели, нагрузки установок, качество смесей и т. д.;  $a_{ij}$  – постоянные коэффициенты матрицы



ограничений;  $a_{ij}(x_j)$  – переменные коэффициенты матрицы ограничений, зависящие от  $x_j$ ;  $\underline{b}_i$ ,  $\overline{b}_i$  – левые и правые части ограничений,  $i = 1, \dots, k$ . Критерием решения данной задачи является максимизация маржинальной прибыли  $F$ .

Основное снижение точности рассчитываемого плана связано с достоверностью исходных данных, используемых при формировании модели производства. Построение моделей текущего и оперативного планирования требует подготовки разных исходных данных и разных способов актуализации. Для формирования модели текущего планирования необходимо подготовить плановые параметры производства, усредненные на весь горизонт планирования. Когда речь идет о формировании модели оперативного планирования, то нужно подготовить фактические данные о текущей производственной ситуации на предприятии. Подготовка плановых и фактических данных для построения моделей текущего и оперативного планирования требует различного количества времени и различных способов актуализации моделей.

Для поиска решения задачи оптимального производственного планирования в системах класса RPMS используется рекурсивный метод последовательного линейного программирования (ПЛП). Поиск решения методом ПЛП осуществляется следующим образом. Сначала задаются начальные приближенные значения коэффициентов матрицы модели (качество потоков, коэффициенты выходов, нормы потребления энергоресурсов) и решается задача линейного программирования с постоянными коэффициентами. На основе полученного решения происходит корректировка коэффициентов матрицы задачи ЛП и проводится анализ сходимости изменения начальных и рассчитанных значений коэффициентов. Если расхождение коэффициентов больше заданной пользователем погрешности, то задача ЛП будет решена еще раз с новыми исходными данными и потом будет проведен следующий анализ сходимости. Процесс завершится, когда корректировка коэффициентов не потребует, то есть погрешности изменений достигнут допустимого уровня. Таким образом, в терминах получения решения имеет место два варианта актуализации

модели: перед поиском оптимального решения; в ходе поиска оптимального решения.

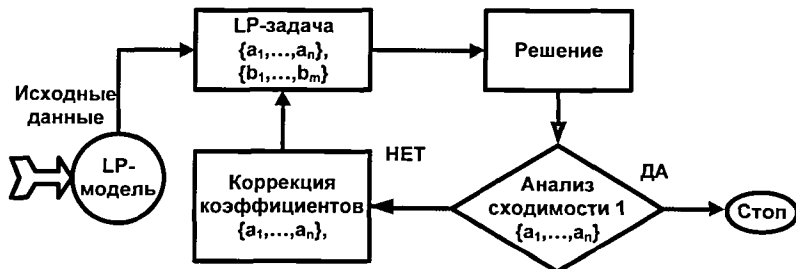


Рисунок 1 – Процедура поиска решения методом ПЛП.

Первый способ заключается в том, что пересчет данных ведется в процессе внутренней рекурсии: после каждого шага ПЛП в найденной оптимальной точке анализируются коэффициенты матрицы ЛП и при необходимости корректируются (рисунок 1). На рисунке 1:  $A = \{a_1, \dots, a_n\}$  – множество коэффициентов матрицы LP, зависящих от значения переменных и корректируемых в процессе рекурсий ПЛП;  $B = \{b_1, \dots, b_m\}$  – множество коэффициентов матрицы LP, зависящих от значения переменных, но некорректируемых в процессе ПЛП.

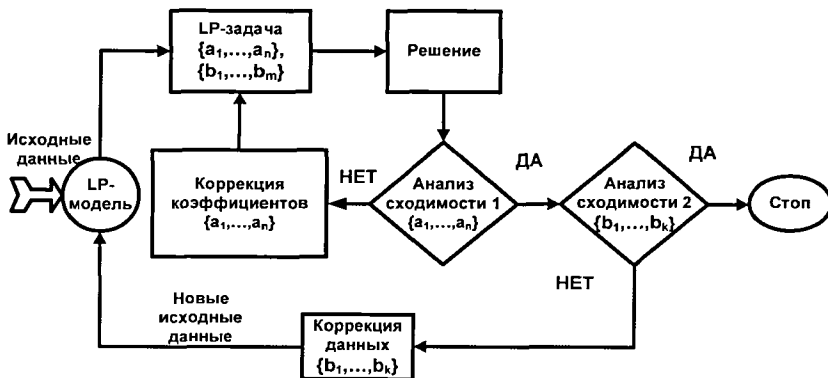


Рисунок 2 – Процедура поиска решения методом ПЛП с анализом исходных данных после полученного решения.

Второй способ заключается в том, что данные, для которых требуется пересчет,

будут анализироваться после получения оптимального решения в процессе внешней рекурсии. Если исходные данные модели не соответствуют решению, то новые данные будут загружены в RPMS-модель и процесс поиска решения повторится. Процесс завершится, когда уточнение не требуется, то есть погрешность по исходным данным достигает допустимого уровня (рисунок 2).

На рисунке 2:  $A = \{a_1, \dots, a_n\}$  – множество коэффициентов матрицы LP, зависящих от значения переменных и корректируемых в процессе внутренних рекурсий ПЛП;  $B = \{b_1, \dots, b_m\}$  – множество коэффициентов матрицы LP, зависящих от значения переменных, но некорректируемых в процессе внутренних рекурсий ПЛП;  $B' = \{b_1, \dots, b_k\}$ ,  $B' \in B$  – подмножество коэффициентов матрицы LP, зависящих от значения переменных и корректируемых в процессе внешних рекурсий ПЛП.

Для актуализации моделей текущего планирования в данной работе предлагается использование автоматического переключателя способов получения решения, изображенных на рисунках 1 и 2. В случае если не удастся получить решение необходимой точности с помощью использования процедуры поиска решения, изображенной на рисунке 1, предлагается разделить пересчитываемые переменные модели на две части и автоматизированно запускать процедуру решения, изображенную на рисунке 2.

**В главе II** приводятся описание и математическая формулировка задачи производственного планирования с учетом переменных норм энергетики. Рассматриваются трудности учета в оптимизационных моделях переменных норм энергетики на различных реальных объектах типа НПЗ/НХК. Предлагается общий подход, позволяющий решить данную задачу с использованием разработанной в ходе диссертации специализированной программной опции. Сформулирован критерий использования учета переменных норм для технологических процессов. В качестве примера работы предлагаемого подхода рассматривается процедура пересчета норм расхода электроэнергии, пара и топлива для установки первичной переработки нефти.

На рисунке 3 черным цветом приведен пример кривой расхода некоторого энергоресурса в зависимости от загрузки установки. На основе проведенного анализа моделей планирования 12 российских и зарубежных НПЗ/НХК предлагается использовать критерий применения подхода планирования с учетом переменных норм. Критерий заключается в том, что если на графиках расхода какого-либо энергоресурса в зависимости от суточной загрузки установки с постоянными и переменными нормами (рисунок 3) существует хотя бы одна такая точка  $X^*$  (загрузка установки), в которой выполняется условие:  $|(U_1 - U_2)/U_1| \cdot 100\% \geq 1\%$  где  $U_1$  – расход энергоресурса с учетом постоянного удельного норматива,  $U_2$  – расход энергоресурса с учетом переменного удельного норматива, то для такой установки необходимо применять подход планирования с учетом переменных норм. Такой критерий целесообразно использовать для установок, минимальная допустимая суточная загрузка которых составляет не меньше 100 тонн в сутки (3000 тонн в месяц). Рассмотрим способ учета изменения норм от загрузки. Предлагается при расчете переменных норм кривые расхода (выработки) энергоресурсов заменять кусочно-линейными функциями (синие прямые на рисунке 3), которые задаются наборами пар точек: загрузка – норма расхода.

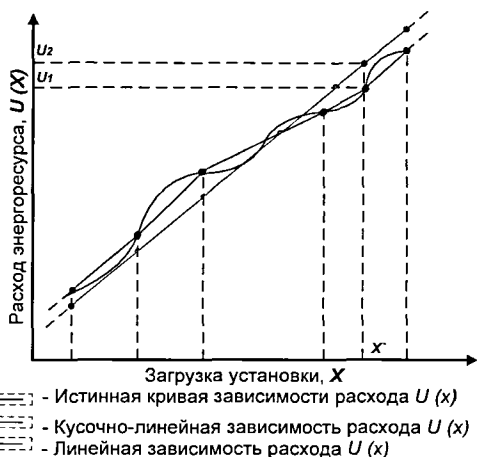


Рисунок 3 – Примеры зависимостей расхода энергоресурса от загрузки

Если нагрузка установки равна  $x \in [x_i, x_{i+1}]$ , величина расхода энергоресурса  $U'$  будет вычисляться по формуле:

$$U' = \frac{\Delta U_i}{\Delta x_i} x' - \Delta u_i \frac{x_i \cdot x_{i+1}}{\Delta x_i} \quad (4)$$

где  $\Delta U_i = x_{i+1}u_{i+1} - x_i u_i$ ,  $\Delta x_i = x_{i+1} - x_i$ ,  $\Delta u_i = u_{i+1} - u_i$ , а удельный расход  $u'$  будет равен:

$$u' = \frac{U'}{x} \quad (5)$$

Таким образом, расчет норм расхода энергоресурсов при заданной нагрузке должен осуществляться следующим образом:

- сначала восстанавливается кусочно-линейная кривая расхода нужного энергоресурса;
- затем методом интерполяции (экстраполяции) находится расход энергоресурса для данной нагрузки по формуле (4);
- после этого вычисляется удельный норматив по формуле (5).

Актуализация модели постоянными нормами расхода энергоресурсов должна осуществляться перед поиском оптимального решения, а пересчет переменных норм должен проводиться в ходе поиска оптимального решения. Для возможности учета переменных норм в RPMS-моделях дополнительно к базовой комплектации системы RPMS была разработана специализированная опция R\_FRESH. Процедура поиска решения RPMS-модели с помощью опции R\_FRESH осуществляется способом, изображенным на рисунке 2:

- Решение RPMS-модели начинается с текущих норм расхода энергоресурсов, заданных в подмоделях установок;
- После решения модели производится автоматический анализ суточных нагрузок установок в решении и, при необходимости, корректируются нормы расхода (выработки) энергоресурсов непосредственно в RPMS-модели в соответствии с таблицами переменных норм;
- Процесс решения повторяется и так продолжается до тех пор, пока величина изменения корректируемых норм не станет допустимой:

$$\varepsilon = \left| \frac{N_0 - N_1}{N_0} * 100 \right| < h\% \quad (6)$$

где  $N_0$  – величина начальной нормы;  $N_1$  – величина новой нормы;  $h\%$  – допустимая величина погрешности, определяемая пользователем.

**В главе III** описывается процедура разработки моделей планирования с переменной энергетикой для объектов типа НПЗ/НХК. Приводятся результаты вычислений на демонстрационной модели НПЗ топливного профиля.

В моделях текущего планирования НПЗ топливного профиля с постоянными и переменными нормами, рассмотренными в диссертации, расход электроэнергии был скорректирован на 3,84%, расход пара был скорректирован на 11,17%, расход заводского топлива был скорректирован на 3,48%. Значение целевой функции было скорректировано на 0,32%, что в денежном выражении составило около десяти миллионов рублей при месячном планировании.

**В главе IV** предлагается подход к решению задачи детализации текущего плана с использованием методики скользящего планирования. Приводятся описание и математическая формулировка задачи детализации плана с учетом фактической информации о производстве. Подробно описывается процедура построения многопериодных моделей оперативного планирования и их актуализации фактическими данными. Обосновывается необходимость использования стандартных линеаризованных моделей планирования для автоматизации процедуры подготовки данных для решения задачи детализации текущего плана.

Задача детализации текущего плана (оперативного планирования) – это задача многопериодного оперативного планирования (первый период – текущий календарный отрезок времени, для которого требуется уточнение; второй период – оставшаяся часть временного интервала планирования), которая решается в условиях глобальных ограничений с учетом текущей фактической информации до конца оставшейся части горизонта планирования.

Основной целью решения задачи детализации текущего плана является получение ответа на очень важный вопрос для персонала предприятия – как

действовать в ближайший период времени в условиях сложившейся производственной ситуации, чтобы выполнить поставленный производственный план. А также для подготовки исходных данных для решения задач более низкого уровня планирования (например, календарного планирования).

Решать задачу детализации текущего плана предлагается с использованием методики скользящего двухпериодного планирования, которая заключается в последовательном построении моделей оперативного планирования.

Построение модели оперативного планирования на основе модели текущего планирования предполагает внесение новых плановых и фактических данных. Для этого необходимо внести целый ряд изменений в модель, например: изменение коэффициентов отбора продуктов установок; изменение показателей качества потоков модели; изменение плана по переработке сырья и отгрузке продукции. Внесение подобных изменений является очень трудоемким процессом и на практике процесс актуализации фактическими данными может занять много времени (один или несколько рабочих дней).

Для сокращения времени на актуализацию моделей фактическими данными предлагается *линеаризовать* исходную модель планирования. *Линеаризация* RPMS-моделей нужна, чтобы стандартизовать подмодели технологических процессов, поскольку в линейные подмодели проще вносить фактические данные и осуществлять анализ корректности исходных данных. Для достижения этих целей в ходе выполнения диссертационной работы была разработана специализированная опция R\_LINE. С её помощью можно линеаризовать RPMS-модель в окрестности решения исходной нелинейной модели таким образом, что решение линейной модели будет близко к решению нелинейной модели. Линеаризовать модель означает заменить зависимость коэффициентов матрицы ограничений модели от значения переменных постоянной величиной.

Необходимо отметить тот факт, что внесение в модель фактических данных (изменение плановых ограничений, материальных балансов установок, качества потоков) может привести к ситуации, в которой при заданных производственных

условиях установленный план не сможет быть выполнен. В терминах решения RPMS-модели это будет означать несовместность данной задачи. Для устранения такой несовместности предлагается вводить в модель штрафные переменные за невыполнение ограничений по переработке сырья и продаже товарных продуктов. Величина штрафа за отклонение от плана должна определяться опытным путем и вводится в модель на усмотрение пользователя. Установив величину штрафа достаточно высокой, система будет искать решение максимально приближенное к установленному плану. А если установить небольшую величину штрафа, то система может начать искать другие варианты решения.

Таким образом, необходимо решать задачу детализации производственного плана с помощью многопериодных линеаризованных RPMS-моделей в следующей постановке:

$$\sum_{t=1}^h \sum_{j=1}^m c_j^t x_j^t - \sum_{t=1}^h \sum_{j=m+1}^n d_j^t x_j^t - \sum_{j=1}^n \alpha_j (u_j^+ + u_j^-) - \sum_{j=1}^n \alpha_j \sum_{t=1}^h (\beta_j^t + \gamma_j^t) - \sum_{t=1}^h \sum_{j \in X_3} \varepsilon_j^t q_j^t \rightarrow \max \quad (7)$$

$$\underline{b}_i^t \leq \sum_{j=1}^n a_{ij}^t x_j^t + \sum_{j=n+1}^p a_{ij}^t (x_j^t) x_j^t \leq \overline{b}_i^t, i = 1, \dots, z; t = 1, \dots, h; \quad (8)$$

$$y_k^{t+1} = y_k^t + \sum_{j \in X_1} x_j^t - \sum_{j \in X_2} x_j^t; 0 \leq y_k^t \leq S_k^t; t = 1, \dots, h-1; k = 1, \dots, f; \quad (9)$$

$$\sum_{t=1}^h x_j^t + u_j^+ \geq \underline{W}_j; j = 1, \dots, n; \quad (10)$$

$$\sum_{t=1}^h x_j^t - u_j^- \leq \overline{W}_j; j = 1, \dots, n; \quad (11)$$

$$x_j^t + \beta_j^t \geq \underline{w}_j^t, j = 1, \dots, n; t = 1, \dots, h; \quad (12)$$

$$x_j^t - \gamma_j^t \leq \overline{w}_j^t, j = 1, \dots, n; t = 1, \dots, h; \quad (13)$$

$$x_j^t - q_j^t = 0, t = 1, \dots, h; j \in X_3(t); \quad (14)$$



$$T = \sum_{t=1}^h \tau_t; \quad (15)$$

$$x_j^t \geq 0, u_j^+ \geq 0, u_j^- \geq 0, q_j^t \geq 0, \beta_j^t \geq 0, \gamma_j^t \geq 0, j = 1, \dots, p; t = 1, \dots, h. \quad (16)$$

Здесь  $T$  – фиксированная длина горизонта планирования;  $\tau_t, t = 1, \dots, h$  – длительность периодов  $t$ ;  $X$  – множество всех переменных модели;  $c_j^t$  – цена продажи в периоде  $t$  единицы  $x_j^t, j = 1, \dots, m$  – переменные продажи потоков модели в периоде  $t$ ;  $d_j^t$  – стоимость покупки в периоде  $t$  единицы  $x_j^t, j = m+1, \dots, n$  – переменные покупки потоков модели в периоде  $t$ ;  $x_j^t, j = n+1, \dots, p$  – переменные внутренних потоков модели в периоде  $t$ , а также нагрузки установок, качество смесей и т. д.;  $y_k^t, k = 1, \dots, f$  – переменные запасов потоков модели к концу периода  $t$ ;  $x_j^t, j \in X_1, X_1 \in X$  – множество переменных модели (покупки, продажи, внутренние потоки), пополняющих запас потока  $y_k^t$ ;  $x_j^t, j \in X_2, X_2 \in X$  – множество переменных модели (покупки, продажи, внутренние потоки), расходующих запас потока  $y_k^t$ ;  $\alpha_j$  – величина штрафа за покупку единицы  $u_j^+, u_j^-, \beta_j^t, \gamma_j^t$  – штрафные переменные модели за невыполнение суммарного плана по переработке сырья или производства продуктов за весь горизонт планирования  $T$ , либо в отдельном периоде  $t$ ;  $\varepsilon_j$  – величина штрафа за покупку единицы  $q_j^t$  – штрафные переменные, которые равны активности переменных модели  $x_j^t$  в периоде  $t, j \in X_3, X_3(t) \in X$  – переменные модели, соответствующие нагрузкам установок в нежелательных режимах работы в периоде  $t$ ;  $\{a_{ij}^t\}$  – постоянные коэффициенты матрицы ограничений в периоде  $t$ ;  $\{a_{ij}^t(x_j^t)\}$  – переменные коэффициенты матрицы ограничений, зависящие от  $x_j^t$  в периоде  $t$ ;  $\underline{b}_i^t, \overline{b}_i^t, S_k^t, \underline{W}_j, \overline{W}_j, \underline{w}_j, \overline{w}_j$  – левые и правые части ограничений. Критерием решения данной задачи является максимизация чистой прибыли с учетом приоритетов выполнения производственных задач в периодах  $t$ .

**В главе V** рассматривается моделирование нелинейных процессов нефтепереработки и приводится описание примера линеаризации демонстрационной RPMS-модели нефтеперерабатывающего завода. Описана процедура построения

двухпериодной модели оперативного планирования с использованием опции R\_LINE и приводятся результаты вычислений.

**В заключении** сформулированы основные выводы и результаты, полученные в диссертационной работе.

**В приложениях** приведены алгоритм построения многопериодных RPMS-моделей для решения задач оперативного планирования (Приложение 1) и основные принципы работы опции R\_LINE системы RPMS (Приложение 2). Материалы, подтверждающие практическое внедрение разработанных моделей, приведены в Приложении 3.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Предложен универсальный подход к решению задачи учета переменных норм потребления энергоресурсов в оптимизационных моделях планирования НПЗ/НХК с использованием автоматического переключения способов поиска решения, который возможно реализовать в различных системах математического моделирования нефтехимии/нефтепереработки.
2. Разработана программная реализация моделей с учетом переменных норм расхода энергоресурсов и создан соответствующий коммерческий продукт в виде специализированной опции R\_FRESH дополнительно к базовой комплектации системы RPMS, вошедший в цепочку программных продуктов компании Honeywell.
3. Разработанная опция R\_FRESH внедрена на ряде предприятий: ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез», АО «Петротел-ЛУКОЙЛ», «ЛУКОЙЛ-Нефтохим Бургас» АД, ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез», ООО «ЛУКОЙЛ-Волгограднефтепереработка», ООО «Ставролен», ООО «ЛУКОЙЛ-Ухтанефтепереработка», ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтегазпереработка», ООО «ЛУКОЙЛ-Коробковский ГПЗ» в рамках выполнения договорных работ компании Honeywell, что позволило повысить качество планирования расхода энергоресурсов.
4. Внедрение опции R\_FRESH позволило:

- повысить точность расчета потребления энергоресурсов на нефтеперерабатывающих/ нефтехимических предприятиях (Приложение 3);
  - корректно оценить фактическое исполнение предприятиями сметы затрат путем формирования сметы производственных расходов на RPMS с учетом фактических параметров работы: объема переработки нефти, загрузки установок и выработки продукции;
  - повысить эффективность применения оптимизационной системы планирования RPMS на дочерних предприятиях и центральном офисе ОАО «ЛУКОЙЛ».
5. Предложен способ решения задачи детализации текущего плана НПЗ/НХК с использованием методики скользящего двухпериодного планирования, которая заключается в последовательном построении многопериодных моделей. Для упрощения процедуры актуализации многопериодных моделей предлагается использовать линеаризованные модели. Для автоматизированной линеаризации моделей разработан коммерческий продукт в виде специализированной опции R\_LINE дополнительно к базовой комплектации системы RPMS, вошедший в цепочку программных продуктов компании Honeywell.
6. Работоспособность предложенного метода построения многопериодных линеаризованных моделей проверена на тестовых и реальных RPMS-моделях нефтеперерабатывающих заводов. Результаты тестирования подтвердили снижение трудоемкости и сокращение времени построения и актуализации многопериодных моделей, а также повышение точности планирования.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ**

1. Любимов Ю.Б. Взаимосвязь задач текущего планирования и составления расписаний работы нефтеперерабатывающего производства [Текст] / Любимов Ю.Б., Баулин Е.С. // Автоматизация в промышленности. – 2010. – №6. – С. 3-7.

2. Баулин Е. С. Актуализация моделей планирования НПЗ/НХК и учет потребления энергии [Текст] / Баулин Е. С., Боронин А. Б., Хохлов А. С. // Труды Российского государственного университета нефти и газа И. М. Губкина. Сборник научных статей по проблемам нефти и газа. – 2012. – №3. – С. 102-109.
3. Баулин Е. С. Скользящая детализация текущего плана НПЗ/НХК и актуализация оптимизационных моделей / Баулин Е. С., Боронин А. Б., Хохлов А. С. // Автоматизация в промышленности. – 2012. – №10. – С. 8-14.

#### **Публикации в международных изданиях**

4. Баулин Е.С. Последовательность решения задач производственного планирования и составления расписаний нефтеперерабатывающего производства [Текст] / Баулин Е.С. / Управление развитием крупномасштабных систем: сб. труд. IV-й Международной конференции (Москва, ИПУ РАН, 4-6 октября 2010). – Москва, 2010, – С. 30-33.
5. Боронин А.Б. Оптимизационные модели непрерывного производства с учетом переменных норм расхода энергоресурсов [Текст] / Боронин А.Б., Баулин Е.С., Гайнетдинова А.Н. / Передовые информационные технологии, средства и системы автоматизации и их внедрение на российских предприятиях: сб. труд. Международной научно-практической конференции (Москва, ИПУ РАН, 4-8 апреля 2011). Москва, 2011. – С. 387-391.
6. Баулин Е.С. Скользящая детализация текущего плана НПЗ/НХК [Текст] / Баулин Е.С. / Управление развитием крупномасштабных систем: сб. труд. VI-й Международной конференции (Москва, ИПУ РАН, 1-3 октября 2012). – Москва, 2012, – С. 353-355.

#### **Публикации в других изданиях РФ**

7. Баулин Е.С. Системы моделирования нефтепереработки и нефтехимии [Текст] / Баулин Е.С. / Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук: сб. труд. 50-й научной конференции МФТИ, Аэрофизика и космические исследования (г. Долгопрудный, МФТИ, 23-27 ноября 2007). – Москва, 2007, – Том 2. – С. 42-43.
8. Баулин Е.С. Решение задач календарного планирования нефтеперерабатывающего производства [Текст] / Баулин Е.С. / Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук: сб. труд. 52-й научной конференции МФТИ, Аэрофизика и космические исследования (г. Долгопрудный, МФТИ, 27-30 ноября 2009). – Москва, 2009, – Том 2. – С. 72-74.
9. Баулин Е.С. Составление календарных планов работы нефтеперерабатывающих предприятий по суткам [Текст] / Баулин Е.С. / Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук: сб. труд. 53-й научной конференции МФТИ, Аэрофизика и космические исследования (г. Долгопрудный, МФТИ, 24-29 ноября 2010). – Москва, 2010, – Том 2. – С. 143-144.
10. Баулин Е.С. Решение задачи учета переменных норм расхода энергоресурсов в оптимизационных моделях производственного планирования [Текст] / Баулин Е.С. / Проблемы фундаментальных и прикладных естественных и технических наук в современном обществе: сб. труд. 54-й научной конференции МФТИ, Аэрофизика и космические исследования (г. Долгопрудный, МФТИ, 25-26 ноября 2011). – Москва, 2011, – С. 152-153.
11. Хохлов А.С. Оптимизационные модели планирования НПЗ/НХК агрегирование, актуализация, адаптация [Текст] / Хохлов А.С., Баулин Е.С. / Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России: тезисы докладов X-й всероссийской научно-технической конференции (Москва, РГУ им. Губкина, 10-12 февраля 2014). – Москва, 2014, – С. 293.

Подписано в печать 30.04.2014 г.

Формат А5

Бумага офсетная. Печать цифровая.

Тираж 100 Экз. Заказ № 3866

Типография ООО “Ай-клуб” (Печатный салон МДМ) 119146, г. Москва,

Комсомольский пр-кт, д.28

Тел. 8-495-782-88-39