

# ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ КЛАСТЕРОВ

## OPTIMIZATION TOOLS FOR MODELING PETROCHEMICAL CLUSTERS

**A. Khokhlov  
D. Mishutin  
P. Borodin**

*Summary.* The optimization tools for the APS (Advanced Planning & Scheduling) class of problems for modeling petrochemical clusters are considered. It is proposed a proven approach for planning a vertically integrated oil company (VIOC) to solving the development problems this clusters. The optimization modeling of the Nizhnekamsk petrochemical cluster (NNHK) is considered as an example of implementation.

*Keywords:* development, optimization tools, modeling, petrochemical clusters, integrated planning complex, linear programming, efficiency.

Стратегической задачей модернизации экономики страны на основе перехода на инновационный путь социально-экономического развития является, в частности, стимулирование и поддержка процессов формирования на ее территории своеобразных «центров развития». Подобными центрами могут стать кластерные промышленные системы (КПС), рассматриваемые как центры развития [1]: привлечения инвестиций, распространения инноваций, формирования человеческого капитала нового качества, формирования культуры деловых отношений и других адекватных институтов и т.д., ориентированных на решение задач модернизации экономики страны в целом.

Территориально-производственные нефтегазохимические комплексы, имеющиеся в ряде регионов, стали по факту ядром КПС, и как указано в утвержденном Минэнерго РФ «Плане развития газо- и нефтехимии России на период до 2030 года», необходимо «будет сделан упор на развитие нефтегазохимических кластеров, которые помогут комплексно решить задачи по переработке сырья, развитию производственной базы и эффективно сбыта готовой продукции».

Выбор перспективного сценария развития нефтегазохимических кластеров среди возможных вариантов потребует перейти от моделей корреляционно-регрессионных анализа с элементами оптимизации, как, например, в работе [2], к привлечению моделирующих

**Хохлов Александр Сергеевич**  
Д.т.н., профессор, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина  
box1563@gmail.com  
**Мишутин Дмитрий Юрьевич**  
АО «Хоневелл» (Москва)  
**Бородин Павел Евгеньевич**  
АО «Хоневелл» (Москва)

*Аннотация.* Рассмотрен оптимизационный инструментарий для класса задач APS (Advanced Planning & Scheduling) и их взаимосвязь применительно к моделированию нефтехимических кластеров. Предлагается применить апробированный подход по планированию вертикально интегрированной нефтяной компании (ВИНК) к решению ключевых задач развития подобных кластеров. В качестве примера реализации рассмотрено оптимизационное моделирование Нижнекамского нефтехимического кластера (ННХК).

*Ключевые слова:* развитие, оптимизационные инструменты, моделирование, нефтехимические кластеры, комплекс интегрированного планирования, линейное программирование, эффективность.

комплексов в виде оптимизационных инструментариев используемых для этого класса предприятий и показавших свою эффективность. Речь идет о комплексах планирования деятельности ВИНК [3], успешно применяемых как на уровне центрального офиса ВИНК, так и в его дочерних предприятиях НПЗ/НХК.

В предлагаемой работе рассматривается подход к применению оптимизационного инструментария к моделированию Нижнекамского нефтехимического кластера (ННХК). В качестве кластерообразующих предприятий, согласно [2], выбрано производственное ядро: ОАО «ТАИФ-НК», АО «Танеко», ПАО «Нижнекамскнефтехим» с рядом химических и нефтехимических заводов, и ПАО «Нижнекамскшина» (НКШ), что и представлено в виде производственной структуры на рис. 1:

### Производственная структура ННХК

Структуру ННХК условно можно разделить согласно рис. 1 на три блока:

1. ОАО «ТАИФ-НК», АО «Танеко» — производства непрерывные — НПЗ;
2. ПАО «Нижнекамскнефтехим» с рядом химических и нефтехимических заводов — совокупность в основном непрерывных производств — НХК и 10 малых и средних производителей промышленной продукции.

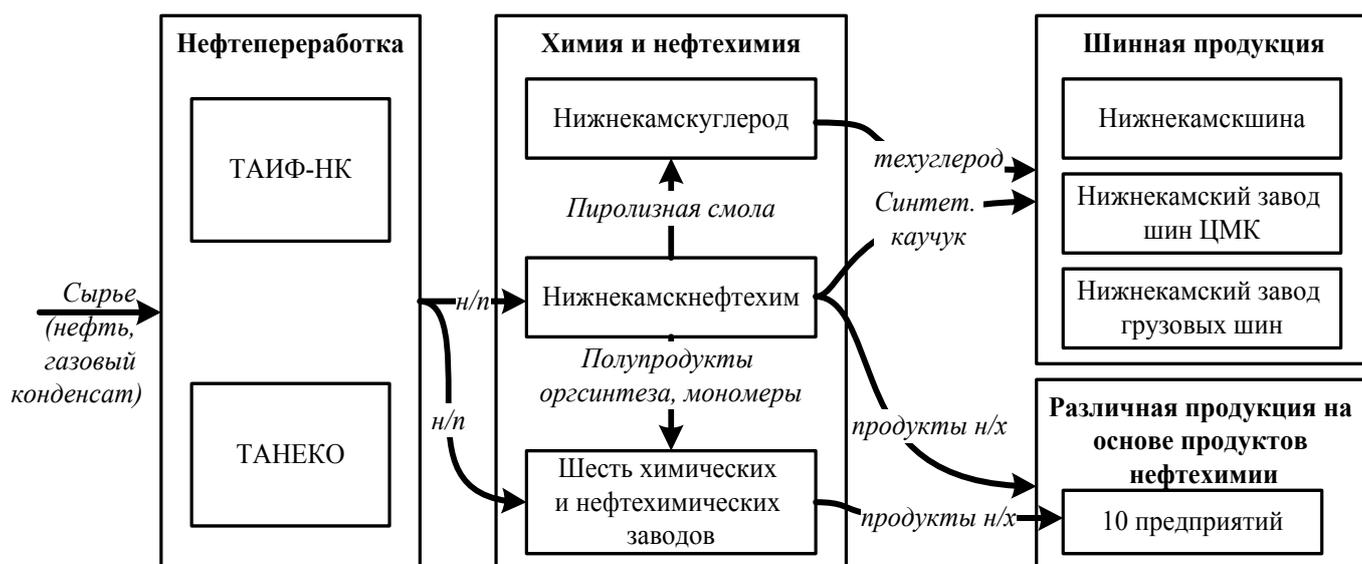


Рис. 1 Производственная структура ННХК

3. ПАО «Нижнекамскшина» — массовое дискретное производство.

Рассмотрим технологические особенности первых двух блоков и, соответственно, способы их моделирования как по отдельности, так и в совокупности с учетом потоковой взаимосвязи, а затем и специфику третьего блока, модель и общий подход к моделированию всего ННХК.

Модели предприятий нефтепереработки, нефтехимии

Производства непрерывного типа вообще, и предприятия нефтепереработки, нефтехимии из ННХК, в частности, характеризуются:

- ◆ крупнотоннажностью и энергоемкостью — суммарный объем первичной переработки нефти/конденсат на двух НПЗ Нижнекамска составляет порядка 24 млн. тонн, что около 9% от ее валового объема в стране;
- ◆ колебаниями свойств сырья (сырая нефть, конденсат) — на два НПЗ Нижнекамска могут поступать различные сорта нефти и конденсат, различающихся плотностью, вязкостью, содержанием серы и т.д., и, соответственно, возникает вопрос какую нефть перерабатывать;
- ◆ разнообразием технологических процессов и режимов и, соответственно, их модернизация с повышением глубины переработки и снижением энергоемкости. К примеру ТАНЕКО планирует выйти на показатели: мощность по сырью в 15 млн.

тонн в год, глубина переработки 95%, выход светлых нефтепродуктов — 90%, темных — 0.;

- ◆ сложной логистикой большого числа потоков и резервуарных парков (сырья, полупродуктов, товарной продукции) — например, стальные резервуары могут иметь емкость до 120~<000 м<sup>3</sup>;
- ◆ интенсивной динамикой рынков различных нефтепродуктов и многовариантностью производственных планов, обусловленная большим ассортиментом продукции и конкуренцией по сбыту нефти (прямого бензина и бензина газомоторного) и на топливном рынке.

Указанные характеристики порождают многовариантность при подготовке текущих/стратегических планов развития производства (программа работы объектов предприятия на горизонте внутри / более года) и при инвестиционном моделировании [4]. Это предполагает, что при расчете должна быть использована оптимизационная модель производства. Именно критерий оптимизации и позволит определить наилучший вариант среди допустимых.

Основными задачами класса APS (*Advanced Planning & Scheduling*), решаемыми на уровне предприятий двух блоков ННХК являются:

- ◆ оптимизационное производственное моделирование предприятия на горизонте планирования внутри и более года с использованием одно и многоинтервальных (многопериодных) оптимизационных моделей, позволяющих определять весь спектр целевых параметров планирования (объем и номенклатуры сырья и товарных

продуктов, потребление вспомогательных материалов и технологические режимы работы производства, технико-экономические показатели работы предприятия в целом);

- ◆ технико-экономическая оценка процессинговых соглашений по переработке давальческого сырья;
- ◆ оптимизационное инвестиционное моделирование технологических реконструкций и техперевооружений (например, при подготовке Мастер-планов и Технико-Экономическое Обоснования проектов)[4];
- ◆ проведение различных расчетов технологического характера (изменение технологических режимов, структуры отбора полупродуктов, замена катализаторов и т.п.);
- ◆ решение задач оптимального выбора перерабатываемых нефтей в зависимости от состояния рынка нефти и нефтепродуктов и технологической конфигурации первых двух блоков ННХК.

Реализация этого круга задач для предприятий двух блоков ННХК, предполагает наличие оптимизационных моделей, где необходимо учитывать:

- ◆ Качество поступающих нефтей, промежуточных потоков с технологических установок, товарных нефтепродуктов (т.е. увязать качество и технологию компаундирования на производстве всех потоков от нефти до нефтепродуктов);
- ◆ Условия вход-выход технологических установок для различных видов сырья и режимов работы и сезонные нормы потребления вспомогательных материалов, энергии в диапазоне работы установки;
- ◆ Ограничения, отражающие технологию переработки, мощность и график ремонтов установок на горизонте планирования, запасы и внешнюю рыночную ситуацию. К ним относятся ресурсные, ассортиментные, производственные, спецификационные ограничения и баланс потоков (объемный и весовой);
- ◆ Экономику переработки, включая стоимость всей номенклатуры потребляемого сырья, вспомогательных материалов, энергии и цен на товарные нефтепродукты.

В качестве критерия оптимизации используется маргинальная прибыль (товарный выпуск продукции НПЗ минус затраты на сырье, минус условно-переменные производственные затраты). Для получения значения прибыли или стоимости процессинга необходимо из маргинальной прибыли вычесть условно-постоянные затраты.

Формально, исходя из предлагаемой постановки, рассматриваемая задача моделирования работы про-

изводства представлена в виде оптимизационной модели[5, 6]:

$$F = \sum_{j=1}^m c_j x_j - \sum_{j=m+1}^n d_j x_j \rightarrow \max, \quad (1.1)$$

$$\underline{b}_i \leq \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j + \sum_{j=n+1}^p a_{ij}(x_j) x_j \leq \bar{b}_i, i = 1, \dots, k, \quad (1.2)$$

$$x_j \geq 0, j = 1, \dots, p.$$

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;
- ◆  $a_{ij}(x)$  — переменные коэффициенты матрицы ограничений, зависящие от одной или нескольких  $x_j$ ;
- ◆  $\underline{b}_i, \bar{b}_i$  — левые и правые части ограничений,  $i = 1, \dots, k$ .
- ◆  $F$  — критерием решения данной задачи является максимизация маргинальной прибыли.

Непосредственно из условий (1.2) следует, что модель оптимизационного производственного планирования НПЗ/НХК представляет собой нелинейную задачу математического программирования большой размерности (несколько тысяч переменных). Природа нелинейности задачи планирования производства скрыта в сложных зависимостях параметров производства от значения переменных, например: материальные балансы установок, изменяются в зависимости от качества поступающего сырья; расход потребления энергоресурсов и вспомогательных материалов зависит от загрузки установок и др. Учет условий нелинейности от качества сырья остается актуальным и при выборе корзины нефтей для переработки на перспективу, т.е. при стратегическом и инвестиционном моделировании [4].

Структурно модель НПЗ/НХК состоит из подмоделей: установок, объединения (смешения) потоков в соответствии со схемой трубопроводов и смешения товарных нефтепродуктов, и исходные данные представлены для каждой подмоделей. Результаты решения анализируются для общей модели завода и подмоделей.

На предприятиях ОАО «ТАИФ-НК», АО «Танеко» указанные задачи реализованы с использованием системы

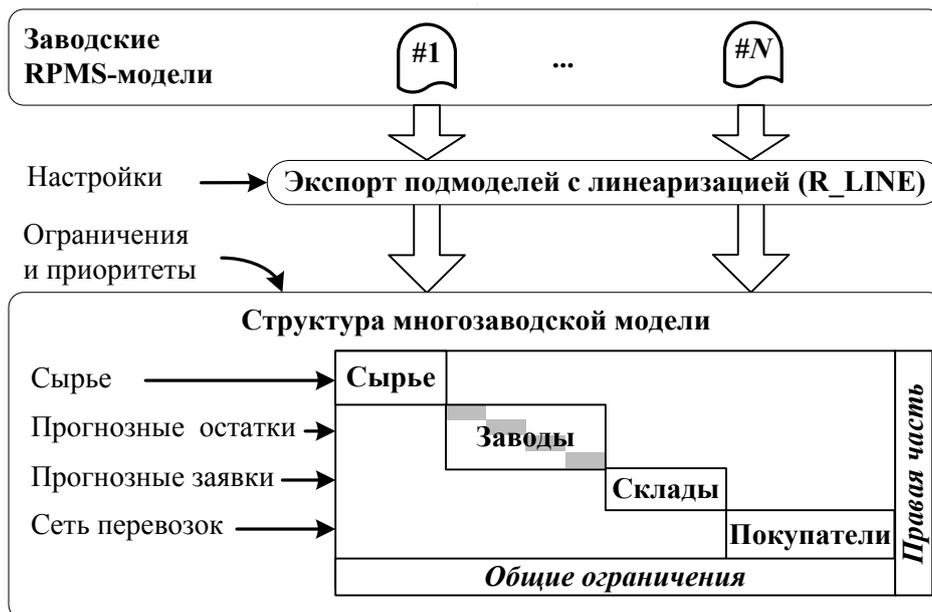


Рис. 2. Структура многозаводской RPMS-модели

RPMS (Refinery and Petrochemical Modeling System, текущий релиз R510, разработки корпорации Honeywell, (<https://www.honeywellprocess.com>)), на ПАО «Нижнекамскнефтехим» с рядом химических и нефтехимических заводов применяются более простые модели в среде Microsoft Excel.

Автоматизированное планирование предприятиями типа НПЗ/НХК в среде RPMS позволяет по имеющимся оценкам получить дополнительный операционный доход более 27 млн. долл. США в год для НПЗ с мощностью 17 млн. т в год по первичной переработке нефти [7].

Система RPMS наряду с построением одно и многопериодных оптимизационных моделей, позволяет создавать и многозаводские модели с учетом первичной логистики с общим критерием оптимизации в виде структуры рис. 2.

Создав, например, RPMS-модель ПАО «Нижнекамскнефтехим» с рядом химических и нефтехимических заводов станет возможным сгенерировать подобную многозаводскую модель на основе RPMS-моделей заводов с разным уровнем агрегирования, и моделировать различные аспекты работы двух первых блоков ННХК. При этом 10 малых и средних производителей промышленной продукции предстанут в многозаводской модели как отдельные вектора вариантов выпуска конечной продукции и увязанные с рынками ее сбыта.

Имеется специализированная апробированная система F\_PRESS, позволяющая генерировать много-

заводские модели в виде структуры рис. 2 на основе RPMS-моделей заводов с разным уровнем агрегирования, учитывая их взаимосвязи, и формируя общий критерий оптимизации. Детали по системе F\_PRESS и необходимые при этом современные средства интеграции данных и генерации модели приведены в [3].

После описания подхода к построению многозаводской модели двух первых блоков ННХК, рассмотрим способ построения оптимизационной модели НКШ, функционирующую на предприятии более 20 лет[8].

Модель НКШ- дискретное производство массового характера

Рассмотрим кратко особенности технологии шинного производства и структур данных для моделирования. Укрупненная технологическая схема производства шин представлена на рис 3.

В цехе подготовки осуществляются технологические операции, необходимые для приведения всех видов сырья (производстве шин используется до 100 видов сырья) к форме, в которой они могут быть использованы при производстве шин, такие как разгрузка транспортных средств, освобождение от упаковки и т.п.

Из цеха подготовки основные виды сырья — каучуки, химикаты, технический углерод (в основном продукция блока 2 ННХК рис. 1) — поступают в подготовительное производство, в котором, в технологическом процессе 2-х или 3-х стадийного смешения, производится вся но-

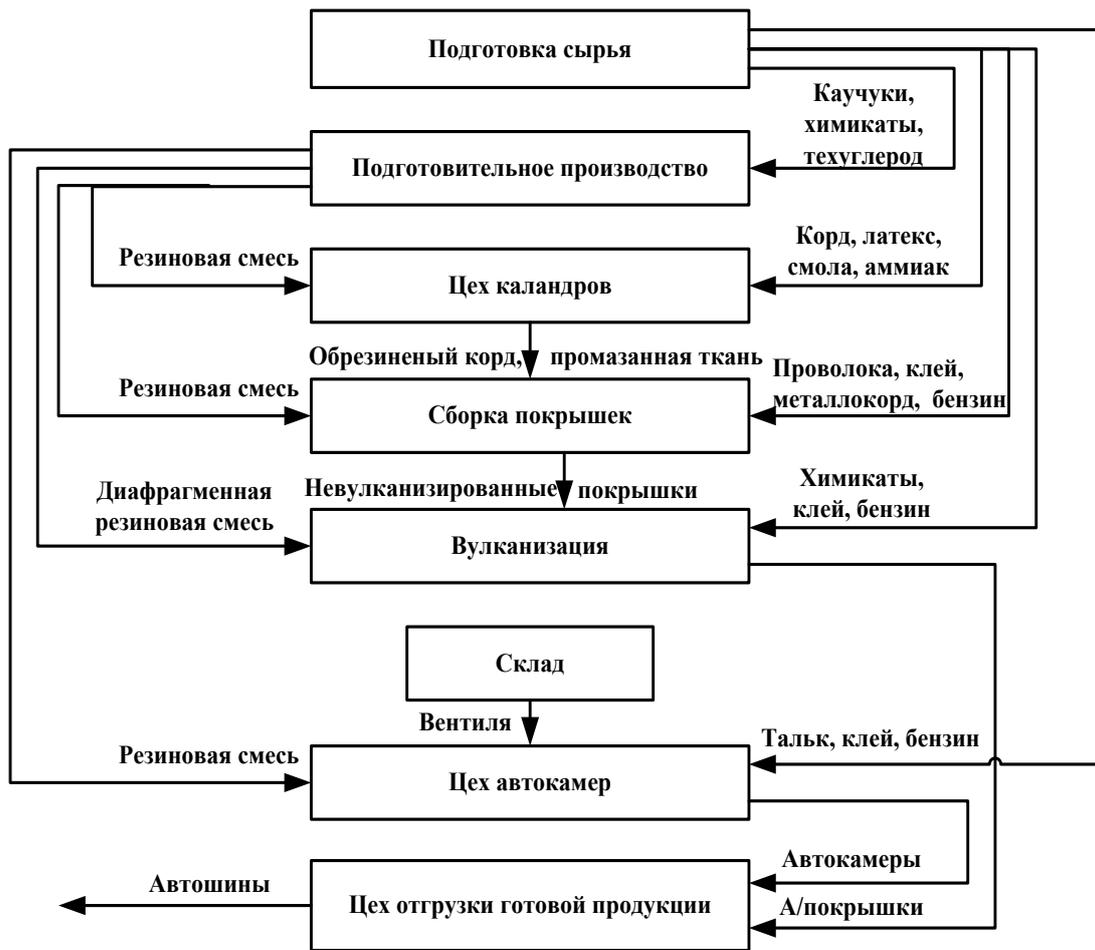


Рис. 3. Технологическая структурная схема производства шин

менклатура резиновых смесей, необходимых для производства всех типоразмеров автопокрышек, автокамер и др. запланированных к производству резинотехнических изделий.

Все подготовленные таким образом необходимые для производства автопокрышек компоненты поступают в сборочное производство, где на специализированных сборочных технологических линиях конвейерного типа осуществляется сборка невулканизированных покрышек, поступающих в дальнейшем на вулканизацию.

Вулканизация осуществляется в технологических аппаратах — вулканизаторах периодического типа, при относительно высоких температуре и давлении, в результате чего получают готовые автопокрышки.

Наконец, автопокрышки комплектуются автокамерами и отправляются через цех отгрузки готовой продукции потребителям.

Для моделирования производства шин на требуемом уровне агрегирования (детальности) и в соответствии с регламентом производства (где задан ритм) необходимо решить две основные проблемы:

- ♦ сбор, обработка и структурирование большого объема разнородных и одновременно взаимосвязанных технико-коммерческих исходных данных многозаводского объединения, которые должны быть учтены в расчете, и представлены в плане;
- ♦ организация взаимодействия большого числа специалистов из различных служб в управлении предприятием, и вовлеченных в бизнес-процессы подготовки, принятия и реализации решений по плану производства, закупок и поставок.

В связи указанным уровнем сложности управленческой задачи потребовалось разработать автоматизированный комплекс планирования шинного объединения SOFTYRE. Задача была решена на основе создания и внедрения трех основных компонент методологического,

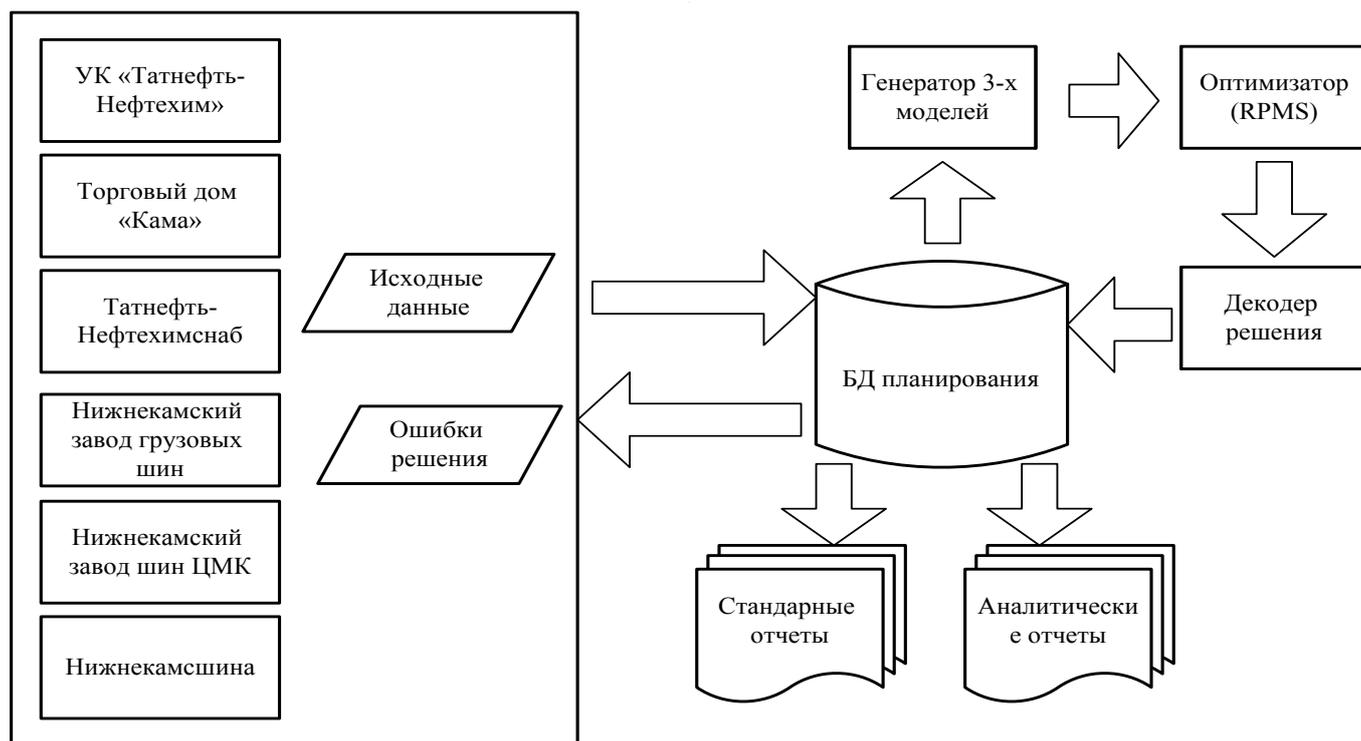


Рис. 3. Реализация оптимизационного моделирования НКШ.

информационного, математического и программного обеспечения:

- ♦ методология и подходы к построению структур данных большого объема, учитывающих специфический характер технологических ограничений предметной области;
- ♦ математической модели оптимизационного планирования шинного объединения и программных средств ее реализации;
- ♦ многопользовательской подсистемы сбора, контроля и диагностики исходных данных.

Реализация программного комплекса оптимизационного планирования шинного производственного объединения для автоматизации процедур формирования структур данных, ведения исходных данных, формирования и актуализации модели планирования, получения решения и его анализа, основано на технологии R\_SAND<sup>3</sup> и включает следующий набор основных элементов (см. рис. 3):

Оптимизационная модель НКШ имеет вид подобный структуре (1.1–1.2), где критерий:  $F = S - P - L - Z \rightarrow \max$ ,

<sup>3</sup> R\_SAND — технология построения оптимизационных систем планирования, позволяющих в автоматизированном режиме генерировать структурно-поточковые модели планирования деятельности компании и ее дочерних обществ в формате RPMS.

то есть разность плановой выручки от реализации произведенной продукции  $S$ , затрат на необходимые для производства закупки сырья, материалов, комплектующих изделий и энергоносителей  $P$ , затрат на сдельную оплату труда  $L$  и затрат, связанных с созданием и хранением запасов  $Z$ . Критерий  $F$  является линейной функцией переменных задачи — объемов закупок сырья, производства изделий и продаж соответствующих товарных позиций.

Опыт длительной эксплуатации программного комплекса SOFTYRE показал свою высокую эффективность, т.к. позволил получить целый ряд преимуществ за счет автоматизации построения модели планирования и интеграции комплекса в существующую программную и организационную среду шинного объединения.

В результате управляющая компания ПАО «Нижнекамскшина» решает широкий спектр задач планирования на различные горизонты планирования от декады и далее, а также и проводит инвестиционное моделирование, что является исключительно важным конкурентным преимуществом при меняющейся рыночной конъюнктуре.

Способы моделирования производственной структуры ННХК

Представленные выше три оптимизационных инструмента: RPMS, F\_PRESS, SOFTYRE в совокупности позволяют моделировать ННХК по следующей схеме:

0. Внедрение системы RPMS в ПАО «Нижнекамскнефтехим», что позволит иметь RPMS-модель нефтехимического комплекса и наряду с возможностью проведения текущего планирования его деятельности внутри года, соответственно, будет подготовлена группа пользователей для проведения моделирования и актуализации RPMS-модели на требуемый горизонт планирования.

1. Наличие трех RPMS-моделей предприятий ОАО «ТАИФ-НК», АО «Танеко», ПАО «Нижнекамскнефтехим» и агрегированное представление балансов производства в виде векторов вход-выход ряда химических и нефтехимических заводов и малых / средних производителей промышленной продукции позволит сгенерировать F\_PRESS — модель с общей системой ограничений и выбранным критерием оптимизации.

Моделирование средствами F\_PRESS различных сценарных условий для этих двух блоков позволит получить семейство решений, например, с экономической оценкой их эффективности.

2. Ряд выделенных решений с шага 1 можно использовать как входные данные системы SOFTYRE для последующего моделирования производства шинной продукции.

3. Анализ результатов решений с шага 1 и 2 дадут представление об эффективности принятых сценариев развития, что позволит завершить процесс моделирования или скорректировать сценарные условия и вернуться к шагу 1 и/или 2.

Непосредственно из представленной схемы моделирования с использованием трех оптимизационных инструментов следует, что возможны различные ее модификации, связанные с последовательностью модели-

рования, уровнем агрегирования моделей производств и выбранным критерием оптимизации.

Отметим по поводу критерия оптимизации, что для измерения и анализа технико — экономического уровня производства в отраслях народного хозяйства отдается предпочтение относительным показателями [2], таким как фондоотдача, рентабельность и т.п. Введение в задачу линейного программирования критерия в виде относительного показателя, переводит ее в класс дробно-линейной оптимизации, что при существующем прогрессе математического программирования не является вычислительной проблемой. Оптимизационный инструментарий должен будет расширен в части учета подхода, реализующего метод анализа среды функционирования (АСФ — англ. DEA- Data Envelopment Analysis) [9].

## Заключение

1. Предлагаемый оптимизационный инструментарий в виде трех систем для моделирования нефтехимических кластеров прошел длительную апробацию в ВИНК[3,8] и совершенствуется российской командой в ходе его эксплуатации в связи с возникновением новых аспектов для оптимизации на производствах НПЗ/НХК и прогресса в ИТ.

2. На предприятиях ОАО «ТАИФ-НК», ПАО «Нижнекамскшина», АО «Танеко» из ядра ННХК длительно эксплуатируются две из трех систем, что указывает на наличие команд подготовленных пользователей для эффективной эксплуатации этих систем, и обеспечено их сопровождение со стороны консультантов и разработчиков.

3. Моделирование нефтехимических кластеров указанными средствами может проводиться только подготовленной командой пользователей внутри некой управляющей структуры, которой бы гарантировали доступ к производственной информации и моделям с предприятий входящих в кластер. Например, для ННХК такой управляющей структурой мог бы быть «ИННОКАМ».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Марков Л. С. Теоретико-методологические основы кластерного подхода. Новосибирск: ИЭОПП СО РАН, 2015, — 300с.
2. Фомин Н. Ю. Кластерная стратегия инновационного и экономического развития народнохозяйственного комплекса России / Н. Ю. Фомин, А. Н. Дырдонова // Инновационные и экономические особенности укрепления государственности России в XXI веке / под ред. Адамова Н. А. — М.: ЭКЦ «Профессор», 2016. — С. 43–73
3. Хохлов А.С., Баулин Е. С., Коннов А. И., Мишутин Д. Ю. Комплекс интегрированного планирования деятельности ВИНК// Автоматизация в промышленности, Москва, 2018, № 12. — с. 15–26.
4. Шишорин Ю.Р., Цодиков Ю. М., Мостовой Н. В., Аксенова Т. С. Оптимизационное моделирование при перспективном планировании предприятий нефтепереработки и нефтехимии// Автоматизация в промышленности, Москва, 2018, № 12. — с. 42–47.
5. Дудников Е.Е., Цодиков Ю. М. Типовые задачи оперативного управления непрерывным производством. М.: Энергия, 1979. — 272 с.

6. Хохлов А.С., Цодиков Ю. М., Баулин Е. С., Оптимизационные модели НПЗ/НХК и средства их поддержки. Учебное пособие. — М.: Издательский центр РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина, 2015. — 91 с.
7. Кувыкин В. И. Организация автоматизированных систем планирования и материального баланса // Автоматизация в промышленности. 2014. № 8. С. 29–33.
8. Артемьев С. Б., Бородин П. Е., Курьянова Е. В. Опыт автоматизации планирования шинного производства//Автоматизация в промышленности. 2015. № 4. С. 41–46.
9. Кривоножко В. Е., Лычев А. В. Моделирование и анализ деятельности сложных систем. — М.: ЛЕНАНД, 2013. — 256 с.

---

© Хохлов Александр Сергеевич ( box1563@gmail.com ), Мишутин Дмитрий Юрьевич.