

## ИМИТАЦИОННЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И ПОСТРОЕНИЯ РАСПИСАНИЙ В НЕФТЕПЕРЕРАБОТКЕ

М.В. Городнова, А.С. Хохлов (ООО «Центр цифровых технологий»)

Рассматривается система планирования производственных процессов SKARD, разработанная для автоматического построения имитационных моделей производства и позволяющая автоматизировать процесс построения календарных планов и расписаний в нефтепереработке.

Ключевые слова: нефтепереработка, календарное планирование, построение расписаний, имитационное моделирование.

### Введение

Объемный план производства определяет количество и тип перерабатываемого сырья и производимых товарных продуктов и максимизирует прибыль предприятия с учетом его ключевых технико-экономических аспектов на рассматриваемом горизонте планирования (обозначим как  $T$ , и это обычно месяц).

Календарный план работы завода (план по суткам) и расписание работы завода (почасовой план производства) составляются на основе текущего объемного плана с учетом технологических ограничений завода, таких как скорости потоков, длительность проведения анализов для паспортизации резервуаров, ограничения емкости резервуаров. Влияние этих ограничений сказывается, начиная с суточных интервалов, и, естественно, не учитывается в моделях текущего планирования [1].

Решением задачи календарного планирования и построения расписания (КПР) является допустимый план производства — план, определяющий объемы перекачек между объектами производства (терминалы приема сырья, первичные и вторичные установки, резервуары товарной продукции, и т.д.) с точностью до суток или часов, и удовлетворяющий всем ограничениям сформированной модели. Для построения КПР привлекаются разнообразные методы прикладной математики (линейного, нелинейного, динамического программирования и др.) [2–4].

Однако при необходимом уровне детализации моделей применить на практике методы оптимизации календарного плана не всегда возможно в силу сложности нахождения решения за время, отведенное производственным регламентом.

Предлагаемый в работе имитационный подход позволяет автоматизировать решение задач КПР такой размерности и структуры, при которой модели математического программирования не могут быть применены [5, 6].

### Имитационный подход в задачах КПР

Имитационный подход включает построение модели рассматриваемого производства, определение исходных значений параметров и дальнейшее «протигрывание» этой модели во времени с целью нахождения значений совокупности переменных, отражающих функционирование производства [7]. Имитационная модель (ИМ или модель) должна описывать в терминах переменных и параметров изме-

нение состояния объектов производства и связывающих их потоков с учетом существующих ограничений.

В модели системы различаются:

- *управляющие переменные или воздействия* ( $u$ ) — их необходимо определить для решения задачи КПР;
- *вычисляемые переменные* ( $x$ ) — определяются значениями других переменных модели и ее параметрами.

Управляющие и вычисляемые переменные должны удовлетворять ограничениям, которые могут быть выражены через функциональные зависимости от параметров и переменных модели.

*Параметры модели* ( $p$ ) — известные значения; в отличие от управляющих воздействий они задаются перед началом поиска решения. Примерами параметров являются минимальные и максимальные уровни резервуаров, длительности проведения анализов для паспортизации товарной продукции, скорости перекачек насосов и т.д.

Структуру имитационной модели можно представить в общем виде следующим образом:

$$\begin{aligned} U &= F(u, x, p), \\ u &\leq G(u, x, p), \\ x &\leq Q(u, x, p), \end{aligned}$$

где  $U$  — состояние моделируемой системы,  $F$ ,  $G$  и  $Q$  — функциональные зависимости,  $u$  — управляющие переменные,  $x$  — вычисляемые переменные,  $p$  — параметры модели.

Для задачи КПР, в которой переменные и параметры модели зависят от времени, структура имитационной модели выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} U(t) &= F(u(t), x(t), p(t)), \\ u(t) &\leq G(u(t), x(t), p(t)), \\ x(t) &\leq Q(u(t), x(t), p(t)), \end{aligned}$$

где  $t$  — порядковый номер периода (часа или дня) внутри горизонта планирования  $T$ .

В общем случае вычисляемые переменные зависят от собственного значения в предыдущий период, а также от значений других переменных и параметров в текущий и предыдущие периоды. Например, уровень резервуара в период  $t$  выражается через уровень этого резервуара на предыдущем периоде  $t-1$  и значения управляющих переменных, отвечающих за исходящие и входящие перекачки:

$$\text{volume\_tank}(t) = \text{volume\_tank}(t-1) + \text{input}(t) - \text{output}(t),$$

где  $\text{volume\_tank}$  — вычисляемая переменная, уровень продукта в резервуаре в период  $t$ ,  $\text{input}$  и  $\text{output}$  —

управляющие переменные, отвечающие за входящий и исходящий объем продукта соответственно. При этом при определении этих управляющих параметров нужно следить, чтобы параметр  $volume\_tank$  в период  $t$  не нарушал следующих ограничений модели:

$min\_volume\_tank(t) \geq volume\_tank(t) \leq max\_volume\_tank(t)$ , где  $max\_volume\_tank$  и  $min\_volume\_tank$  — параметры модели — минимальный и максимальный возможные уровни резервуара.

Зная значения параметров для любого периода  $t$  внутри  $T$ , а также значения вычисляемых переменных в предшествующие периоды, подбором управляющих переменных в ИМ для текущего периода получаем значения вычисляемых переменных в последующие периоды  $t+1$  и далее. Поиск решения задачи КПП при этом сводится к определению таких допустимых значений управляющих переменных и для каждого периода  $t$  внутри  $T$ , которые не приводят к нарушению ограничений модели, накладываемых на ее вычисляемые переменные. Далее, пользователь (оператор ИМ) может получить несколько допустимых планов, сравнить их и выбрать наилучший план, руководствуясь своими собственными критериями оценки.

Отметим, что производство, например НПЗ, можно разбить (декомпозировать) по принятым переделам (цехам) в виде блоков первичных и вторичных установок смешения и т.д. Каждому из переделов ставится в соответствие своя ИМ, а их суперпозиция через входные/выходные потоки и есть ИМ задачи КПП.

Таким образом, применение имитационного подхода для построения КПП на производстве включает следующие этапы:

- разделение производства на составные части;
- описание каждой выделенной части производства в виде ИМ — совокупности переменных, параметров и функциональных зависимостей, накладываемых на вычисляемые переменные и на их ограничения;
- описание взаимодействия подмоделей;
- определение решений задачи КПП путем подбора таких значений управляющих переменных на каждый период  $t$  внутри  $T$ , которые не приводят к нарушению ограничений ИМ.

После этого оператор ИМ имеет возможность выбрать из списка полученных допустимых планов наилучший с его точки зрения окончательный план.

#### Принципы построения ИМ для решения задачи КПП

Далее, исходя из опыта, накопленного в области применения имитационного подхода к решению задачи КПП на производстве, сформулированы основные принципы построения ИМ и поиска при помощи них решения задачи КПП. Данные принципы были сформулированы с учетом специфики дальнейшей реализации основанной на них имитационной системы планирования производственных процессов.

*Принцип 1. Объектно-ориентированный подход при создании ИМ.*

Производство в постановке задачи КПП рассматривается как совокупность объектов, взаимосвязанных материальными потоками; и объектно-ориентированный подход в моделировании это наиболее полно отражает. Суть применения этого подхода при построении ИМ для задачи КПП состоит в выделении у выбранного типа производства классов объектов и описании класса в терминах управляющих и вычисляемых переменных и параметров объектов.

*Принцип 2. Дискретно-событийная последовательность в ИМ.*

При дискретно-событийном подходе в ИМ производства воспроизводится его функционирование как хронологическая последовательность событий, происходящих в системе. В терминах имитационного подхода в задаче КПП события — это изменение управляющих переменных объектов ИМ. При этом каждое событие происходит в определенный период внутри горизонта планирования и приводит к изменению состояния объектов производства и, следовательно, системы в целом.

*Принцип 3. Ранжирование событий в ИМ.*

Все происходящие события, согласно принципам 1 и 2, определяют состояние ИМ через значения переменных и параметров, входящих в модель объектов. Состояния ИМ ранжируются по характеру выполнения ограничений модели на допустимые и недопустимые. Соответственно событие в ИМ можно отнести по характеру состояния, в которое приходит модель после его наступления, к одному из следующих классов:

- *корректное.* Все значения переменных модели после наступления данного события принимают допустимые значения, то есть ограничения на вычисляемые переменные не нарушены;
- *ошибка.* Данное событие приводит к нарушению ограничений модели — полученное состояние является недопустимым.

*Принцип 4. ИМ как набор электронных таблиц.*

ИМ, согласно принципам 1–3, воссоздает хронологическую последовательность событий с объектами на производстве при выполнении текущего плана и ранжирует их, что наиболее полно реализуется инструментарием электронных таблиц. Столбцы таблиц представляют параметры модели, строки — периоды, а ячейки хранят значения параметров. При изменении состояния ИМ происходит пересчет всех вычисляемых параметров модели, начиная с текущего периода и далее, и результат вычислений, а также допустимость полученного решения отображаются в таблице. Совокупность таблиц и определяет ИМ для решения задачи КПП.

*Принцип 5. Поиск последовательности допустимых состояний ИМ.*

Поиск решения задачи КПП с использованием ИМ, согласно принципу 4, заключается в построении итоговой таблицы, где будут определены значения всех управляющих переменных по периодам до конца горизонта планирования. Иными слова-

ми, согласно принципу 2, необходимо определить хронологическую последовательность событий. При этом решение ИМ будет допустимым, согласно принципу 3, если ни одно событие в последовательности не принадлежит классу «Ошибка», то есть соблюдены все ограничения, накладываемые на переменные модели.

#### Система SKARD

На основе выше сформулированных принципов построения ИМ задачи КПП была реализована система SKARD — имитационная система календарного планирования и построения расписаний производственных процессов. Система SKARD служит для автоматического создания ИМ работы отдельных производственных переделов НПЗ исходя из их потокового описания, дальнейшего нахождения плана производства по часам или суткам, а также представления решения в виде графиков и отчетов.

#### Библиотеки объектов и автоматическое построение ИМ

Для реализации принципа 1 объектно-ориентированного подхода при создании ИМ в системе SKARD были разработаны библиотеки классов. Каждая из них описывает структурные единицы — классы, типовые технологические объекты и потоки между ними, соответствующие определенной части производства. Каждый класс из библиотек описывается совокупностью переменных и параметров  $x$ ,  $u$  и  $p$ .

Любой участок производства может быть представлен в виде потоковой схемы — ориентированного графа. Пример подобной потоковой схемы представлен на рис. 1. Каждый узел отождествляется с реальным объектом производства — это может быть установка, резервуар, точка отгрузки и др. Ребро же указывает на возможность перемещения определенного материала между объектами производства.

Из такого представления участка производства можно выделить следующие типы классов:

- *SchemeNode* — тип, описывающий технологический объект, узел потоковой схемы. Должен хранить ссылки на объекты, описывающие входящие и исходящие из него потоки *SchemeEdge*;
- *SchemeProduct* — тип, соответствующий определенному материалу потоковой схемы;
- *SchemeEdge* — тип, описывающий перемещение материала *SchemeProduct* от одного объекта *SchemeNode* к другому.

Каждый класс из разработанных библиотек соответствует одному из вышеперечисленных типов, то есть описывает узел, материал или поток.

Именно на основе библиотек классов в системе SKARD реализовано автоматическое построение ИМ в соответствии с ее потоковым описанием. Описание потоковой схемы для построения на основе нее ИМ передела можно загрузить в систему в виде файла Excel или xml. Описание должно содержать список всех узлов схемы, материалов и потоков.

#### Описание параметров ИМ в SKARD

Каждый класс из библиотек классов описывается совокупностью параметров, а также управляющих и вычисляемых переменных. В терминах системы SKARD переменные и параметры модели называются *столбцами (Column)*, так как по сути каждой переменной и каждому параметру при создании плана и отображении его в интерфейсе пользователя соответствует свой столбец таблицы.

Исходя из принципа 2 дискретно-событийной последовательности в ИМ, столбцы системы, соответствующие управляющим переменным модели, то есть параметрам, характеризующим события ИМ, могут хранить и изменять свои значения только в дискретные промежутки времени. Этот дискретный промежуток времени  $t$  равен одному периоду планирова-

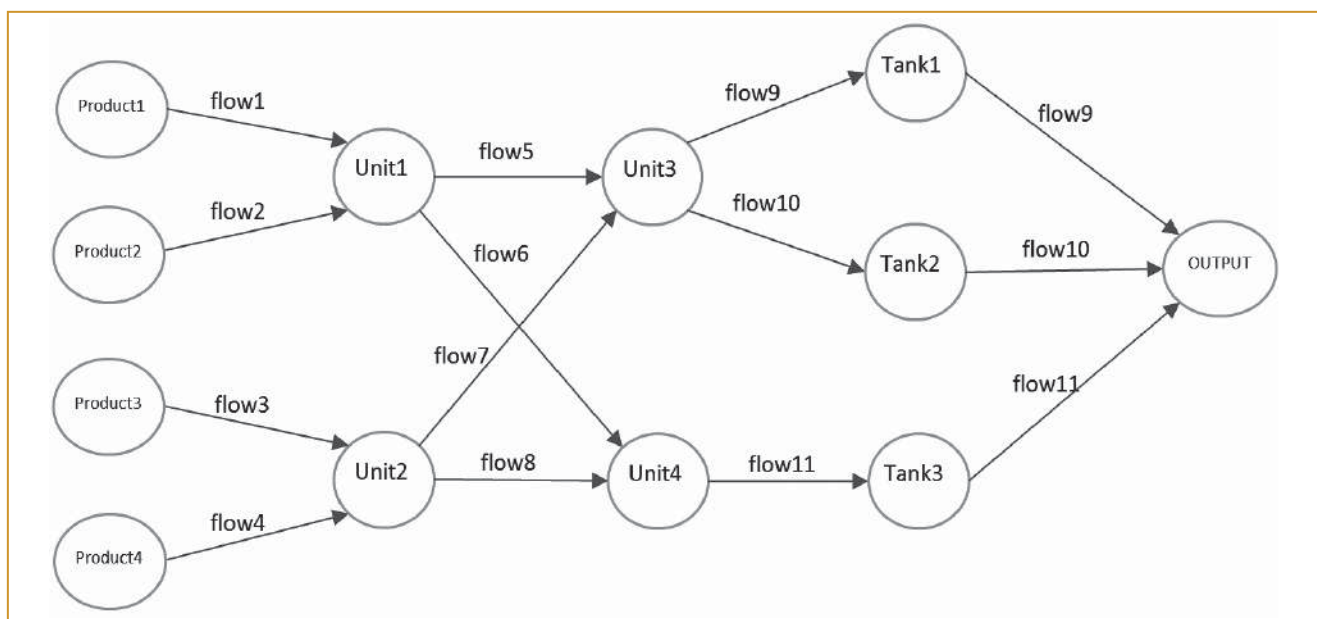


Рис. 1. Пример потоковой схемы участка производства

ния — одни сутки для календарного планирования и один час при построении расписания. Из этого следует, что и все другие столбцы ИМ также принимают свои значения в дискретные промежутки времени  $t$ .

Столбцы делятся, исходя из своих функций, на следующие категории:

- *фактический* — столбец с возможностью ввода, без начального значения при инициализации плана. Соответствует параметру ИМ. Перед началом поиска плана необходимо актуализовать каждый такой столбец, то есть ввести значение для всех периодов плана либо вручную, либо загрузить из внешних систем типа MES/ERP или файла Excel;

- *управляющий* — столбец с возможностью ввода. Соответствует управляющей переменной;

- *зависимый* — вычисляемый столбец, без возможности ввода. Значение такого столбца зависит от значений других столбцов и для каждого периода автоматически вычисляется «движком» системы. Хранит в себе функцию для вычисления, которая может быть выражена через значения других столбцов в текущий период и предшествующие, а также через собственное значение в текущий период с использованием различных математических и логических операций.

После наступления события в ИМ, иначе после изменения значения управляющего столбца автоматически происходит пересчет всех вычисляемых столбцов модели — меняется состояние ИМ. Данная функция в системе SKARD отвечает принципу дискретно-событийной последовательности в ИМ.

Исходя из принципа 3 ранжирования событий в ИМ, если изменение значения управляющего столбца привело к нарушению каких-либо ограничений модели, система тут же должна уведомить об этом пользователя. Для этого система должна произвести автоматическую проверку и определить, является ли событие корректным или ошибкой. Для реализации данной функциональности каждый столбец поддерживает функцию валидации своего значения. В системе SKARD каждый столбец может хранить несколько функций проверки, каждая из которых посылает в систему сообщение об ошибке в случае возникновения событий, приводящих к некорректному состоянию.

### Интерфейс пользователя

Исходя из принципа 4 построения ИМ для КПП, система в основе имеет электронные таблицы и соответственно графический интерфейс пользователя (рис. 2). Столбцы таблиц представляют параметры и переменные модели, строки — периоды, а ячейки хранят значения параметров и переменных. При изменении значения какого-либо столбца, происходит пересчет всех вычисляемых переменных модели, начиная с текущего периода

и далее, и результат вычисления тут же отображается в таблице.

Столбцы объединены в таблицы таким образом, чтобы нагляднее представить данные модели пользователю и облегчить процесс ручного редактирования решения. При этом таблицы можно подразделить в зависимости от их предназначения на следующие типы:

- для представления характеристик определенного объекта системы. Например, таблица, содержащая параметры конкретного резервуара;

- для объединения данных, относящихся к разным объектам системы одного класса. Например, таблица, содержащая данные о поступлении продукции в товарно-сырьевой парк — для каждого периода данная таблица содержит скорость каждого поступающего потока;

- для работы с определенным процессом системы. Примером может служить распределение входящего потока по резервуарам либо процесс налива в железнодорожные цистерны на эстакадах. В этом типе таблиц содержатся все столбцы модели, относящиеся к данному процессу, а также столбцы, облегчающие определение управляющих переменных, его характеризующих. Например, при определении резервуара, в который в данный период будет направлен поступающий поток, необходимо видеть свободный объем в каждом резервуаре.

Система поддерживает автоматический пересчет зависимых параметров сразу же после изменения значения какого-либо параметра, начиная с текущего дня и далее, и результат вычисления тут же отображается в таблицах. Если изменение привело к нарушению каких-либо ограничений, накладываемых на зависимые параметры, система тут же уведомит об этом пользователя:

- путем окрашивания ячеек таблицы со значениями параметров, нарушивших свои ограничения;
- выводом предупреждения о получении недопустимого решения на экране пользователя;
- выводом списка сообщений обо всех нарушениях ограничений в протоколе решения.

Таким образом, в системе реализована функция автоматического пересчета состояний ИМ и проверка, получено ли решение задачи КПП.

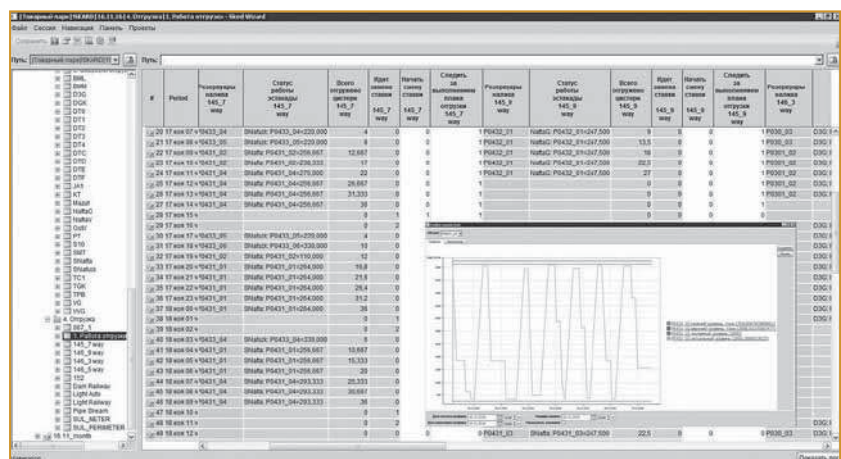


Рис. 2. Интерфейс пользователя системы SKARD

**Поиск решения в системе SKARD**

Для нахождения решения задачи КПП, согласно принципу 5, необходимо определить значения всех управляющих переменных для каждого периода до конца горизонта планирования. Причем, чтобы найденный план был допустимым, должны соблюдаться все многочисленные ограничения модели.

Первым способом нахождения решения в системе SKARD является ручной поиск — подбор значений управляющих столбцов на каждый период. В случае с небольшими моделями имеется возможность нахождения допустимого плана вручную за приемлемое время, но в случае с реальными моделями производства такая возможность исключена.

Автоматическое построение планов в системе SKARD осуществляется при помощи решателей, использующих эвристические алгоритмы, основанные на методе решающих правил [8]. В системе реализована возможность запуска решателя с любого периода планирования. При этом после нахождения плана при помощи решателя возможно отредактировать его вручную в какой-либо период, а далее запустить решатель уже со следующего периода для нахождения обновленного решения.

Эвристические алгоритмы, основанные на методе решающих правил, используют «здравый смысл» в виде ряда соображений без строгих обоснований и позволяют формировать рациональное (субоптимальное) решение задач большой размерности за приемлемое время [9].

Например, реальный товарно-сырьевой парк (ТСП) одного из российских НПЗ, на котором была внедрена система SKARD, включает 46 резервуаров и рассчитан на хранение 20 наименований продукции. Отгрузка

осуществляется авто и железнодорожным транспортом, а также по трубопроводу. Время поиска почасового плана на 2 недели в системе SKARD для данной модели ТСП при помощи решателя составляет 6 с. Отметим, что число управляющих параметров этой ИМ, значения которых необходимо определить на каждый час, равно 180 ед. Таким образом, суммарное число неизвестных поставленной задачи нахождения почасового расписания на 2 недели равно 60480 ед., при этом 17808 из них являются дискретными.

Формирование нужных решающих правил для конкретной задачи возможно на основе знаний эксперта в заданной области путем алгоритмического описания подходов, приводящих к допустимому решению задачи.

После нахождения плана при помощи таких решателей за пользователем остается возможность вручную изменить необходимые управляющие параметры для модификации найденного решения.

**Пример реализации ИМ в системе SKARD**

Система SKARD успешно внедрена на одном из российских НПЗ. В рамках внедрения была решена задача автоматизированного построения почасовых расписаний работы ТСП. Была разработана библиотека классов для построения ИМ ТСП, а также разработаны решатели для работы с данной библиотекой.

Рассмотрим применение разработанной библиотеки в SKARD на примере небольшого ТСП. Расписание будет строиться на 5 сут. по часам, потоковая схема ТСП представлена на рис. 3. Обозначения представлены ниже при описании структуры ИМ ТСП.

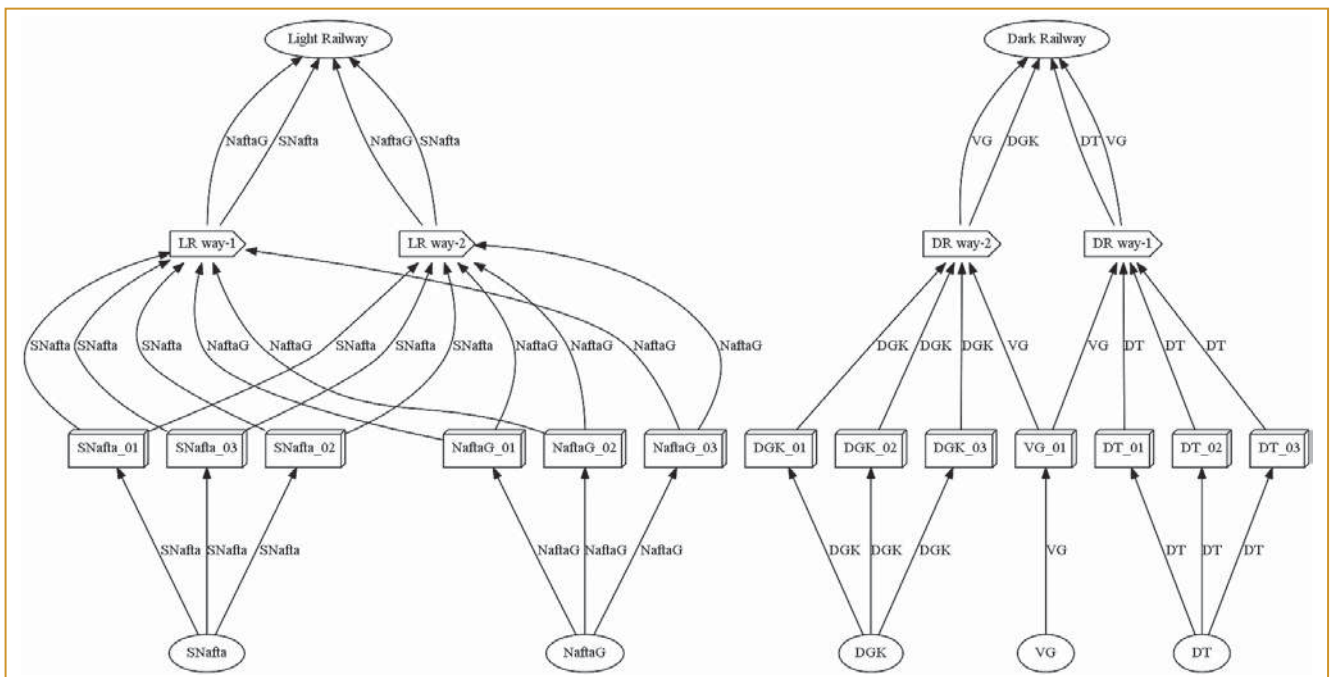


Рис. 3. Схема товарно-сырьевого парка

**Построение расписания работы ТСП**

В товарно-сырьевой парк НПЗ продукция с производства поступает непрерывно для хранения, проведения анализов и отгрузки. Для хранения каждого наименования продукции предназначен определенный набор резервуаров. Заполнение резервуаров производится поочередно. После заполнения резервуара происходит проведение анализов для контроля и выдачи паспорта на товарный продукт.

Отгрузка товарной продукции производится железнодорожным транспортом, составами с фиксированным числом цистерн. Налив в цистерны производится при помощи четырех эстакад налива — по две для налива светлых и темных групп нефтепродуктов. Эстакада обслуживает один железнодорожный состав, и при этом возможен одновременный налив продукции в цистерны только из одного резервуара, и цистерна по окончании налива должна содержать продукцию строго из одного резервуара.

Таким образом, исходными данными для построения расписания работы ТСП являются:

- график поступления продукции (т/ч);
- плотность продукции в тоннах ( $m^3$ );
- время проведения анализов для каждого товарного продукта (ч);
- продукты, хранящиеся в резервуарах.
- начальные уровни резервуаров в тоннах.
- минимальные и максимальные уровни резервуаров ( $m^3$ );
- для каждой эстакады: номинальные, минимальные и максимальные скорости налива (т/ч);
- число цистерн в железнодорожном составе для каждой эстакады;
- вместимость цистерн ( $m^3$ );
- время смены состава для налива на эстакадах (ч).

Для построения расписания работы ТСП необходимо определить по часам:

- резервуары назначения для поступающей продукции;
- график проведения анализов для каждого резервуара;
- график работы эстакад налива с определением отгружаемой продукции, исходных резервуаров и объемов перекачек;
- график смены составов на железнодорожных путях.

При этом должны быть соблюдены следующие ограничения:

- уровни резервуаров в каждый период должны быть между минимальными и максимальными значениями;
- объем налива продукции в цистерны должен удовлетворять ограничениям на скорость налива;
- число цистерн в каждом составе в графике на отгрузку не должно превышать заданного значения;
- время между окончанием заполнения состава и началом заполнения следующего должно быть не меньше, чем заданное время смены составов;
- в одну цистерну должен производиться налив продукции строго из одного резервуара.

**Имитационная модель расписания работы ТСП в системе SKARD**

Поставленная задача была решена в системе SKARD при помощи разработанной библиотеки классов TANK\_FARM.

Библиотека TANK\_FARM предназначена для построения моделей ТСП для планирования операций хранения и отгрузки товарной продукции. Данная библиотека включает следующие классы (в скобках приведен тип данного класса):

- **Product** (*SchemeProduct*) — материал потоковой схемы;
- **Flow** (*SchemeNode*) — описывает точку поступления продукта в резервуарный парк, для распределения между резервуарами;
- **Tank** (*SchemeNode*) — класс, описывающий резервуар;
- **Shipping** (*SchemeNode*) — описывает точку налива товарной продукции из резервуаров на отгрузку. Это может быть эстакада налива в железнодорожные цистерны, или налив в тару для отгрузки автотранспортом;
- **Sale** (*SchemeNode*) — описывает точку отгрузки товарной продукции, например, отгрузка железнодорожным транспортом;
- **ProductFlow** (*SchemeEdge*) — описывает поступление материала product на точку входа flow;
- **FlowTank** (*SchemeEdge*) — перемещение продукта между точкой входа и резервуаром;
- **TankShipping** (*SchemeEdge*) — перемещение товарного продукта между резервуаром и точкой налива на отгрузку;
- **ShippingSale** (*SchemeEdge*) — связь между точками налива и конечной отгрузки.

Таким образом, построенная на основе приведенной потоковой схемы (рис. 3.) модель будет включать следующие объекты:

- материалы:  $product_n \{SNafta, NaftaG, DGK, VG, DT\}$ , соответствующие классу *Product*;
- точки поступления продукции:  $flow_n \{SNafta, NaftaG, DGK, VG \text{ и } DT\}$ , соответствующие классу *Flow*;
- резервуары:  $tank_m \{SNafta\_01, SNafta\_02, \dots, DT\_02, DT\_03\}$ , соответствующие классу *Tank*;
- эстакады налива в цистерны:  $shipping_k \{LR\text{-way } 1, LR\text{-way } 2, DR\text{-way } 1, DR\text{-way } 2\}$ , из класса *Shipping*;
- точки отгрузки:  $sale_l \{Light \text{ Railway}, Dark \text{ Railway}\}$  из класса *Sale*.

• соответствующие объекты из классов потоков, связующие вышеприведенные узловые объекты.

Полученная ИМ содержит настраиваемые параметры, полностью соответствующие исходным данным поставленной задачи:

- $[Поступление \text{ потока } \langle flow_n \rangle] (t)$ ;
- $[Плотность \text{ продукта } \langle product_n \rangle] (t)$ ;
- $[Время \text{ наспортизации } \langle product_n \rangle] (t)$ ;
- $[\langle tank_m \rangle \text{ хранящийся продукт}] (t)$ ;
- $[\langle tank_m \rangle \text{ актуальный уровень}] (t = 0)$ ;
- $[\langle tank_m \rangle \text{ нижний уровень}] (t)$ ;
- $[\langle tank_m \rangle \text{ верхний уровень}] (t)$ ;
- $[Скорость \text{ налива } \langle shipping_k \rangle] (t)$ ;

- [Миним. скорость налива  $\langle shipping_k \rangle$ ] ( $t$ );
- [Макс. скорость налива  $\langle shipping_k \rangle$ ] ( $t$ );
- [Число цистерн в ставке  $\langle shipping_k \rangle$ ] ( $t$ );
- [Объем цистерны  $\langle shipping_k \rangle$ ] ( $t$ );
- [Время смены состава  $\langle shipping_k \rangle$ ] ( $t$ ).

Список управляющих переменных ИМ, соответствующих данным, которые необходимо определить для построения расписания:

- [ $\langle tank_m \rangle \langle flow_n \rangle$  приход] ( $t$ ) — объем потока  $flow_n$ , поступающего в текущий период в резервуар  $tank_m$ ;
- [ $\langle tank_m \rangle$  начать паспортизацию] ( $t$ ) — принимает значение 1, если в данный период  $t$  необходимо начать проведение анализов для резервуара  $tank_m$ ;
- [ $\langle tank_m \rangle \langle shipping_k \rangle$  отгрузка] ( $t$ ) — объем продукта, хранящегося в резервуаре  $tank_m$ , который будет перекачен для налива в цистерны с эстакады налива  $shipping_k$ ;
- [Начать смену ставки  $\langle shipping_k \rangle$ ] ( $t$ ) — принимает значение 1, если в данный период  $t$  необходимо произвести замену железнодорожного состава у эстакады  $shipping_k$ .

В поставленной задаче необходимо определить значения всех вышеприведенных управляющих переменных на каждый  $t$ -период, равный часу, на 5 дней. При этом должны быть соблюдены следующие основные ограничения модели:

- [Осталось распределить  $\langle flow_n \rangle$ ] ( $t$ ) == 0,

то есть все продукты, поступающие на ТСП, распределены между резервуарами, для каждого периода  $t$ . При этом остаток распределения вычисляется следующим образом:

$$[\text{Осталось распределить } \langle flow_n \rangle] (t) = [\text{Поступление потока } \langle flow_n \rangle] (t) - \sum_m [\langle tank_m \rangle \langle flow_n \rangle \text{ приход}] (t);$$

- Ограничения на уровни резервуаров:

$$[\langle tank_m \rangle \text{ актуальный уровень}] (t) \leq [\langle tank_m \rangle \text{ верхний уровень}] (t),$$

$$[\langle tank_m \rangle \text{ актуальный уровень}] (t) \geq [\langle tank_m \rangle \text{ нижний уровень}] (t),$$

при этом актуальный уровень резервуара вычисляется исходя из следующей зависимости:

$$[\langle tank_m \rangle \text{ актуальный уровень}] (t) = [\langle tank_m \rangle \text{ актуальный уровень}] (t-1) + \sum_m [\langle tank_m \rangle \langle flow_n \rangle \text{ приход}] (t)$$

$$- \sum_k [\langle tank_m \rangle \langle shipping_k \rangle \text{ отгрузка}] (t);$$

- Ограничения на объемы налива на эстакадах:

$$[\langle tank_m \rangle \langle shipping_k \rangle \text{ отгрузка}] (t) \leq [\text{Макс. скорость налива } \langle shipping_k \rangle] (t),$$

$$[\langle tank_m \rangle \langle shipping_k \rangle \text{ отгрузка}] (t) \geq [\text{Миним. скорость налива } \langle shipping_k \rangle] (t);$$

- Если на эстакаде закончен налив, то есть

$$[\text{Всего отгружено цистерн } \langle shipping_k \rangle] (t) > 0,$$

$$[\text{Всего отгружено цистерн } \langle shipping_k \rangle] (t+1) == 0,$$

то должно быть соблюдено следующее ограничение:

$$[\text{Всего отгружено цистерн } \langle shipping_k \rangle] (t) \leq$$

$$[\text{Число цистерн в ставке } \langle shipping_k \rangle] (t).$$

Суммарное число отгруженных цистерн при этом вычисляется следующим образом:

$$[\text{Всего отгружено цистерн } \langle shipping_k \rangle] (t) = [\text{Всего отгружено цистерн } \langle shipping_k \rangle] (t-1) + \sum_k [\langle tank_m \rangle \langle shipping_k \rangle \text{ отгрузка}] (t) / [\text{Объем цистерны } \langle shipping_k \rangle] (t).$$

Решение поставленной задачи нахождения почасового расписания на 5 сут. на описанной ИМ было найдено при помощи решателей, разработанных для библиотеки классов TANK\_FARM. Число всех управляющих переменных данной модели, которые необходимо определить на каждый час, равно 50 ед.

Таким образом, суммарное число неизвестных переменных модели для выбранного горизонта планирования в 5 сут., равно 6000 ед. Для данной задачи были применены два решателя, основанные на методе решающих правил. Время работы каждого из решателей составило примерно 200 мс. При этом время поиска плана для этой же модели на месяц, то есть определение 36000 неизвестных, составило 2 с. В отличие от методов оптимизации, где увеличение размерности приводит к нелинейному увеличению сложности, увеличение размерности ИМ приводит к линейному увеличению времени решения.

Оба решателя работают по одинаковому алгоритму, который последовательно на каждый час сначала определяет резервуар назначения для каждого поступающего в ТСП продукта, затем определяет резервуар и объем перекачки из него для каждой эстакады налива.

Отличия двух решателей состоят в наборе решающих правил, используемых для определения резервуара, из которого необходимо начать отгрузку продукта для заполнения нового состава. В обоих решателях приоритет будет выше у резервуаров с тем продуктом, для которого число часов, оставшихся до перелива, наименьшее. Число часов, оставшихся до перелива, определяется как суммарный свободный объем резервуаров, в которых возможно хранение определенного продукта, деленный на скорость поступления этого продукта.

В первом решателе из группы резервуаров, соответствующих продукту, для которого, скорее всего, возможен перелив, выбирается резервуар с наименьшим текущим уровнем. Во втором же решателе из этой группы выбирается резервуар с наибольшим текущим уровнем. В результате работы обоих решателей был получен допустимый план, но во втором плане суммарная отгруженная продукция оказалась больше, чем в первом. При этом решатели были настроены таким образом, чтобы отгружать товарную продукцию по максимуму. Однако имеется возможность задать календарный план отгрузки на каждые сутки либо месячный план для определенного вида отгрузки или непосредственно на эстакаду — тогда решатель будет отгружать продукцию из резервуаров в соответствии с заданным планом.

На рис. 4 представлен полученный график работы эстакад налива и график смены составов на первые сутки по часам. Столбцы «Статус работы эстакады» отображают, какой именно продукт, из какого резервуара

Рис. 4. График работы эстакад налива для отгрузки товарной продукции

и в каком объеме необходимо загрузить в цистерны для каждого часа на соответствующей эстакаде налива. Столбцы «Всего отгружено цистерн» показывают, какое число цистерн будет заполнено к окончанию часа. Обратим внимание, что каждый раз налив в цистерны заканчивается, когда заполняется 36 цистерн. Данное число соответствует заданному ограничению на число цистерн в железнодорожном составе и не может быть больше. После окончания заполнения состава начинается замены состава. Данный процесс для каждой эстакады отображен в соответствующих столбцах «Начать смену состава» и «Идет замена состава».

Для рассматриваемого ТСП время замены состава принято за 2 часа, и промежутки между окончанием налива в предыдущий состав и началом заполнения следующего всегда не меньше, чем данное временное ограничение.

**Выводы**

Представленный в работе имитационный подход позволяет автоматизировать процесс нахождения производственного плана задачи КПП и решать задачи большой размерности в рамках производственного регламента.

При помощи системы SKARD возможно автоматическое построение ИМ по переделам и в совокупности всего производства, а также автоматизированное (при помощи решателей) построение производственных планов по суткам или по часам на несколько дней или месяцев. В рамках системы возможна разработка библиотек для подготовки календарных планов и расписаний работ участков производства для различных предприятий с потоковым производством продукции. Отметим, что использование системы SKARD возможно в связке с оптимизационными системами планирования [10].

Успешное внедрение имитационного подхода предполагает промышленную эксплуатацию на про-

изводстве развитой системы уровня MES для сбора информации по факту и возможность интеграции ее с системой SKARD.

Уровень детализации ИМ ограничен только возможностью своевременного получения данных из MES-окружения и актуализации модели на их основе. Поиск решения ИМ задачи КПП пользователь ведет в автоматизированном режиме, так как при нарушении ограничений модели имеется возможность ручного редактирования плана, либо останов или запуск решателя с того момента обнаружения ограничения.

Учет фактических данных через регулярную актуализацию модели позволяет в ходе реализации плана ответить на вопрос, как будут развиваться события с выполнением принятого объемного плана на месяц и при необходимости своевременно корректировать его оперативным бизнес-решением.

**Список литературы**

1. Баулин Е.С., Боронин А.Б., Хохлов А.С. Скользящая детализация текущего плана деятельности НПЗ/НХК и актуализация оптимизационных моделей планирования // Автоматизация в промышленности. 2012. №10. С. 8-14.
2. Pinto J.M. and Grossmann I.E. Assignment and sequencing models for the scheduling of chemical processes // Annals of Operations Research. 1998. V. 81. p. 433-466.
3. Kelly J.D. Logistics: the missing link in blend scheduling optimization // Hydrocarbon Processing. 2006. №6. Pp. 45-56.
4. Цодиков Ю.М. Оптимальное календарное планирование для непрерывного производства с ограничениями на структуру графика // Автоматика и телемеханика. 2008. №1. С. 171-179.
5. Chryssolouris G., Papakostas N., Mourtzis D. Refinery short-term scheduling with tank farm, inventory and distillation management: An integrated simulation-based approach // European Journal of Operational Research, 166 (2005). Pp. 812-827.
6. Шайдуллин Р.А., Хохлов А.С., Проказина М.В. Имитационные модели в комплексе календарного планирования производства НПЗ // Автоматизация в промышленности. 2012. №10. С. 15-21.
7. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем - искусство и наука. М.: Мир. 1978.
8. Проказина М.В. Применение метода решающих правил для решения задачи календарного планирования товарно-сырьевого парка НПЗ // Тр. 56-й науч. конф. МФТИ. Аэрофизика и космические исследования. 2013. Т.2. С.60-61.
9. Джарратано Д., Райли Г. Экспертные системы: принципы разработки и программирование. М.: И.Д. Вильямс. 2007.
10. Хохлов А.С., Коннов А.И., Шайдуллин Р.А. Комплексный подход к планированию непрерывного производства // Автоматизация в промышленности. 2015. № 4. С. 35-39.

*Хохлов Александр Сергеевич – д-р техн. наук, проф. РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина, ведущий консультант, Горднова Мария Владимировна – аспирант МФТИ, консультант ООО «Центр цифровых технологий». Контактный телефон (495) 796-98-00. E-mail: maria.gorodnova@mipt-cdt.ru*