



ОПТИМИЗАЦИОННОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ И ПОВЫШЕНИЕ ОПЕРАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

КОМПЛЕКС ИНТЕГРИРОВАННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ВИНК

А.С. Хохлов, Е.С. Баулин (ООО «Центр цифровых технологий» МФТИ (ГУ)),
А.И. Коннов, Д.Ю. Мишутин (АО «Хоневелл»)

Рассмотрены задачи класса APS (Advanced Planning & Scheduling) и их взаимосвязь применительно к вертикально интегрированной нефтяной компании (ВИНК). Представлен апробированный подход к решению ключевых задач планирования деятельности и оперативного управления ВИНК в цепочке поставок от нефтегазодобывающего управления (сдача нефти в АК «Транснефть») до потребителя на АЗС с использованием комплекса интегрированного планирования. На основе 20 лет опыта его развития в ВИНК сформулированы общие требования для успешного их внедрения и эксплуатации.

Ключевые слова: комплекс интегрированного планирования, оперативное управление, оптимизация, линейное программирование, имитационное моделирование, повышение эффективности, внедрение и сопровождение комплекса вычислительных систем.

Введение

На рубеже столетий произошли значительные перемены во взаимоотношениях производителей/поставщиков товаров, различного рода работ, услуг и их клиентов, поскольку для сохранения конкурентоспособности на рынке компаниям потребовалось существенно уменьшить время отклика на запросы заказчиков, расширить список и улучшить качество предоставляемых ими услуг. Для предприятий нефтеперерабатывающей отрасли это определило направление на развитие сервисной экономики, то есть расширение номенклатуры услуг и повышения уровня обслуживания (например, появилась необходимость вести продажи продукции с завода в режиме on-line и осуществлять по запросу клиентов доставку продукции в определенных временных рамках на нужный склад, нефтебазу, АЗС и т.д.). В свою очередь, такие изменения подтолкнули развитие автоматизированных средств информационно-алгоритмической и методической поддержки процессов планирования и управления по всей логистической цепочке от поставки сырья, производства и до отгрузки продуктов.

Подобная тенденция нашла отражение в ВИНК. Плановые отделы перешли к расчету большего числа вариантов развития событий на всех участках логистической цепочки поставок, при этом все вычисления должны быть сделаны за короткий интервал времени, отведенный регламентом планирования. В результате нефтяные компании повысили требования к проектным командам, разрабатывающим программное обеспечение для решения задач APS (Advanced Planning & Scheduling — оптимизационное планирование и составление расписаний) и выполняющим их внедрение и сопровождение. От исполнителей требовалось вместо поставки и вне-

дрения отдельных систем планирования разработать комплексный подход к их интеграции, позволяющий решать оптимизационную задачу интегрированного планирования для подготовки корректных управленческих решений.

В конце 90-х годов XX века перед командой разработчиков и консультантов из ООО «СП Петроком» (сейчас ее участники работают в корпорации Honeywell и в ООО «Центр цифровых технологий») была поставлена задача создать комплекс интегрированного планирования для одной из крупнейших отечественных ВИНК. При реализации данного проекта команда столкнулась с проблемами, которые приходилось решать прямо по ходу выполнения работ. Требовалось разработать новые программные модули, позволяющие организовать передачу данных между отдельными системами, и дополнительные опции, обеспечивающие подготовку данных для решения задачи интегрированного планирования и интерпретации результата.

О комплексе интегрированного планирования. Общую задачу планирования в рамках отдельно взятой ВИНК можно укрупнено разделить на три подзадачи (рис. 1).

I. Задача размещения сырья: необходимо разместить собственные и приобретенные сырьевые ресурсы по направлениям (с учетом финансово-коммерческих схем):

- продажа в ближнее и дальнее зарубежье (куда, сколько, каким маршрутом);
- переработка (на собственных и/или арендованных мощностях).

II. Задача планирования переработки (производства): необходимо разработать план производства товарных продуктов для потребителей на внутреннем

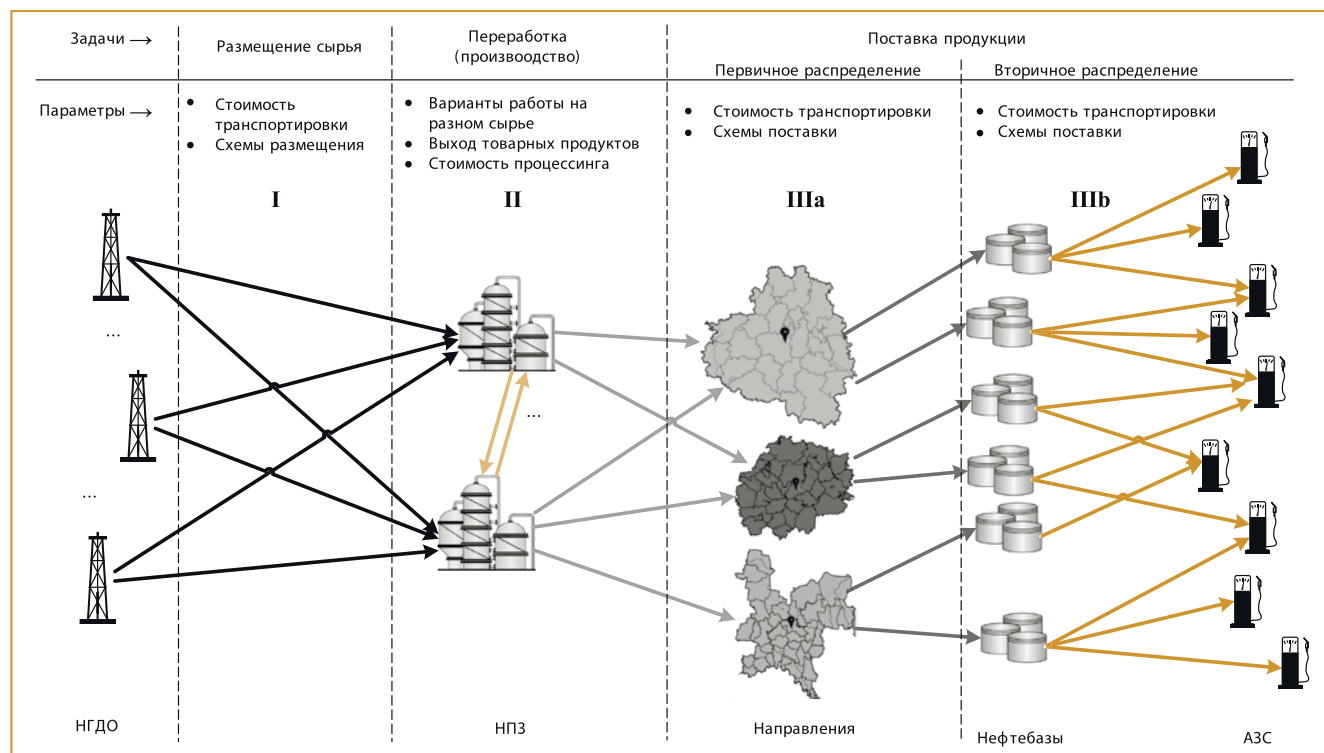


Рис. 1. Общая задача планирования ВИНК

рынке и для экспорта за границу с учетом технико-экономической специфики предприятий нефтепереработки/нефтехимии, рыночных ограничений и схем налогообложения на продажу различных групп продуктов.

III. Задача поставки продукции (куда, сколько, каким маршрутом):

а. *первичное распределение*. Необходимо поставить товарную продукцию централизованному потребителю, например, нефтебазы (НБ), исходя из ее ресурса на производстве, определенного в ходе решения задачи II, и потребностей по различным направлениям;

б. *вторичное распределение*. Необходимо поставить товарную продукцию от НБ, например, до АЗС, исходя из имеющегося ресурса на нефтебазах (IIIa) и текущей потребности на рынке.

Все эти задачи взаимосвязаны, и результат решения одной задачи формирует исходные данные для решения последующей задачи. При этом все задачи обладают своей спецификой, и для их решения используются различные исходные данные, математические модели, программное обеспечение.

Из-за сложности планирования деятельности ВИНК (например, из-за неравномерности производства товарных продуктов на НПЗ, изменения качества поставляемого нефтяного сырья, изменения спроса на рынке и множества других факторов) даже при решении любой из перечисленных выше задач в зависимости от длительности горизонта планирования могут использоваться различные математические модели и критерии оптимизации. Так при решении задачи II (планирование производства) производственные объекты будут описаны и агрегирова-

ны в единую модель планирования НПЗ по-разному с учетом конкретной задачи планирования: долгосрочное планирование (> 1 года), текущее (1...12 мес.), оперативное (детализация текущего плана до конца месяца), календарное планирование (неделя, декада с детализацией по суткам), составление расписаний (на несколько дней с детализацией по часам).

В зависимости от горизонта используют программные средства, основанные на различном математическом аппарате. Так, для задач долгосрочного и текущего планирования во всем мире получили широкое распространение системы оптимизационного планирования, основанные на методе последовательного линейного программирования (ЛП) (например, система RPMS компании Honeywell (<https://www.honeywellprocess.com>) или система PIMS разработки компании Aspen Technology (<https://www.aspentech.com>)). При решении задач календарного планирования и составления расписаний в силу огромной размерности этих задач и большого числа целочисленных переменных, как правило, используют системы, основанные на имитационном подходе либо на продвинутом имитационном подходе с набором оптимизационных решающих правил (например, система SCARD [1] и программные продукты компании Aspen Technology (<https://www.aspentech.com>)).

Таким образом, комплекс интегрированного планирования представляет собой набор взаимосвязанных систем математического моделирования и дополнительных программных модулей, которые в совокупности должны осуществлять генерацию моделей и находить решение задач I, II, III на любом



Рис. 2. Комплекс интегрированного планирования, встроенный в существующую структуру ВИНК. Указаны задачи двух уровней управления ВИНК, названия используемых систем и номера «задач» — I, II, III

требуемом горизонте планирования, обеспечивать обмен данными между моделями и подготавливать отчеты в требуемом пользователю формате.

В общей сложности, упомянутая команда специалистов работает над развитием комплекса более 20 лет, и эти работы не могут остановиться, поскольку одним из драйверов развития комплекса является движение в направлении роста прибыли ВИНК. Как справедливо отмечается в [2], «искусству делать деньги на нефти и посредством нефти присущи тонкости, связанные уже не столько с физическими свойствами нефти, сколько со сложившимися вокруг нее экономическими и политическими структурами». Например, введение санкций и/или срыв сроков импортозамещения может сказаться на инфраструктуре добычи и направлении транспортировки нефти и нефтепродуктов.

Рассмотрим результат работы над комплексом, к архитектуре которого команда пришла, исходя из многолетнего опыта решения задач APS. Изложение дано в следующей последовательности: основные принципы разработки, внедрения и сопровождения комплекса; описание апробированного подхода к детализированному решению отдельных задач планирования; агрегированный подход к решению задачи глобальной оптимизации цепочки поставок; проблемы интеграции систем комплекса. В заключении даны рекомендации по внедрению и сопровождению комплекса на основе опыта авторов.

Принципы построения комплекса интегрированного планирования

На практике в российских ВИНК приняты два уровня управления: головная компания и дочерие

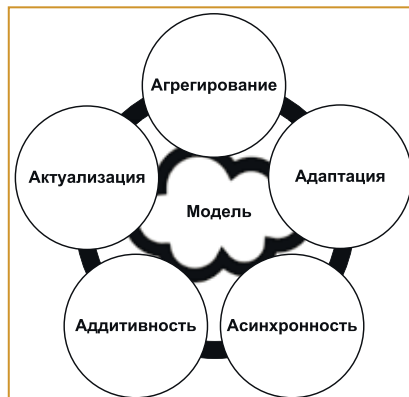


Рис. 3. Пять принципов построения модели планирования

общества (ДО). Задачи долгосрочного и текущего планирования I, II, III решаются в департаментах головной компании ВИНК на горизонте от месяца до года и более; задачи оперативного и календарного планирования II решаются на уровне ДО НПЗ/НХК, и задача оперативного управления звеном от НБ до АЗС III решаются на уровне ДО нефтепродуктообеспечения с циклами декада/неделя/несколько суток/рабочие смены.

Результаты решения подзадач I, II, III должны быть синхронизированы при подготовке взаимос-

вязанных планов на различных горизонтах планирования. После синхронизации результаты решения этих трех задач, полученные с помощью систем класса APS, должны передаваться в системы класса ERP (Enterprise Resource Planning), где проводится бюджетная оценка планов с возможной корректировкой цен на продукцию и повторным пересчетом планов по всей логистической цепочке. В силу сказанного синхронизация планов должна обеспечиваться, с одной стороны, лицами, ответственными за выполнение регламента планирования (начальники отделов/руководители департаментов), и, с другой, автоматизированными средствами интеграции систем планирования.

На рис. 2 схематично изображено местоположение систем комплекса интегрированного планирования в общей структуре информационных систем и распределение задач планирования по уровням управления ВИНК. Системы класса APS, входящие в состав комплекса, располагаются между системами класса MES (Manufacturing Enterprise System), формирующими исходные данные на уровне ДО, и системами класса

ERP, с которыми идет обмен данными на уровне головной компании в соответствии с регламентом планирования. Задачи на уровне головной компании решаются последовательно с различной степенью детализации моделей: сначала детально решаются задачи I, II, III, затем на основе полученных планов агрегировано решается задача глобальной оптимизации, синхронизируя планы между собой.

Развитие комплекса идет успешно только при выполнении трех ключевых условий: 1) взаимопони-

мание и доверие команды исполнителя и руководителя департамента ВИНК, где осуществляется запуск комплекса; 2) профессионализм команды заказчика и заинтересованность каждого специалиста в достижении желаемого результата эксплуатации комплекса; 3) наличие методологии планирования, разработанной командой исполнителя совместно с представителями заказчика для обеспечения роста прибыли ВИНК. Это связано с тем, что первоначальные требования к проекту претерпевают существенные изменения в ходе его исполнения, что предполагает тесное сотрудничество в поиске компромиссов и профессиональных решений и необходимость руководствоваться принятой разработчиком методологии реализации подобных проектов. Под методологией здесь подразумевается стратегия реализации проекта, описывающая взаимосвязь бизнес-процессов компании на всех уровнях планирования (инвестиционного, стратегического, текущего, оперативного, календарного) и управления (на основе регулярного мониторинга фактического состояния производства, цепи поставок сырья и продуктов, ключевых показателей эффективности деятельности). При этом необходимо руководствоваться пятью взаимосвязанными принципами построения моделей (рис. 3), которые авторы называют принципами «5А»: *агрегирование, актуализация, адаптация, аддитивность, асинхронность* [3].

Уровень *агрегирования* блоков модели (например, качество нефтяного сырья, установки первичной переработки нефти, установки вторичной переработки нефти, расход энергоресурсов, смешение, общие экономические ограничения и др.) определяется широким набором факторов. В качестве ключевых можно выделить следующие три:

1) горизонт планирования (длительность временного интервала, на котором решается задача планирования);

2) набор сценарных условий развития технико-экономической ситуации в ВИНК и соответствующих ретроспективных данных, подготовленных по утвержденной регламентом процедуре;

3) временные интервалы, отведенные регламентом на актуализацию, получение решения, анализ и интерпретацию его результатов с целью формирования утвержденного плана для передачи заинтересованным службам/подразделениям компании и ДО.

Профессионализм команды разработчиков модели как раз и заключается в том, чтобы правильно учитывать указанные факторы. Соответственно, и уровень подготовки пользователей, обеспечивающих сопровождение и эксплуатацию моделей на предприятии или в компании, определяется их пониманием и умением отразить при моделировании все эти ключевые факторы.

На примере одного из технологических процессов вторичной переработки нефти (установки гидрокрекинга) проиллюстрируем, как будет меняться подход к детализации описания технологического процесса

при решении различных задач производственного планирования.

В качестве задачи долгосрочного планирования рассмотрим проект по оценке экономической эффективности строительства установки гидрокрекинга (рассчитывается на горизонте планирования > 5 лет). На таком длительном горизонте можно говорить только о предполагаемых возможных вариантах развития событий, например, таких: через несколько лет нефть на завод будет поступать некоторого определенного качества; потенциальный спрос на рынке будет на некоторую определенную корзину продуктов; курс доллара будет в каком-то спрогнозированном диапазоне и т.п. В качестве исходных данных для описания еще не запущенного в производство процесса гидрокрекинга в задаче инвестиционного анализа будут использоваться проектные данные лицензиара — усредненные значения долей отборов и показатели качества продуктов; нормы расхода энергоресурсов, реагентов и др., соответствующие какому-то определенному качеству поступающего сырья, степени конверсии и пр. В этом случае сама модель гидрокрекинга может иметь линейный вид, то есть, например, каждому заданному виду сырья будет соответствовать фиксированный «вектор долей отборов продуктов» с постоянными показателями качества.

При решении задачи текущего планирования (горизонт планирования — 1 мес.) на том же заводе, когда собрана фактическая информация о работе установки, более точно известно, в каких диапазонах может изменяться качество сырья и как это повлияет на доли отборов и качество продуктов, точности линейных моделей может быть недостаточно для нахождения оптимальной производственной программы. В этом случае необходимо актуализировать более точную нелинейную подмодель установки, чтобы корректнее спрогнозировать количество и качество выпускаемых продуктов. На практике при решении задач текущего планирования для описания работы технологического процесса широко используют нелинейные подмодели, позволяющие описать поведение объекта с необходимой точностью. Разработка таких подмоделей является трудоемким процессом с точки зрения подготовки исходных данных, так как требуются дополнительные опытные пробеги установок. При невозможности собрать необходимый набор данных часть из них может быть получена с помощью строгих моделей технологических процессов, разработанных с помощью специализированных программных пакетов типа UniSim Design (Honeywell), HYSYS (Aspen Technology) и др.

В моделях календарного планирования должны детально учитываться схема трубопровода, подведенного к установке гидрокрекинга, и резервуары, из которых подается сырье на установку. В силу огромной размерности получаемой задачи, большого числа логических правил, накладывающих целочисленные ограничения на значения переменных, оптимизаци-

онный подход не позволяет найти решение за время, допустимое регламентом. Поэтому при решении задач календарного планирования и составления расписаний используют системы имитационного моделирования с набором оптимизационных решающих правил, в которых можно в виде нужного пользователю набора математических зависимостей с необходимой точностью описать все особенности и производственные характеристики технологического процесса гидрокрекинга.

Методология планирования, построенная на принципах «5А», учитывает ключевые факторы 1–3 следующим образом.

- Разработанная модель должна быть корректно настроена на основе достоверных исходных данных и должна адекватно отражать развитие событий на текущем горизонте планирования. Этот принцип должен гарантировать, что существует способ актуализации, позволяющий на основе исходных данных (фактор № 2) выполнить настройку модели в рамках регламентных сроков (фактор № 3). Важно отметить, что имеющаяся степень автоматизации процедуры актуализации модели планирования должна позволить пользователям за приемлемое время собрать, верифицировать и ввести в модель надежные данные. Исходя из сложности и степени автоматизации процедуры актуализации моделей, разрабатывается необходимый набор программно-информационных подсистем комплекса.

- Пользователи всех задействованных служб должны быть подготовлены и обладать соответствующей квалификацией для поддержки выбранного уровня агрегирования модели (должен быть достигнут достаточный уровень *адаптации* в подходах к моделированию производственных процессов). Очень важно,

чтобы пользователи понимали структуру модели, поскольку грамотно оценить результаты решения и дать их интерпретацию для принятия управленческих решений невозможно без знания математических и технологических правил построения модели. Это, в свою очередь, означает, что должен быть выбран соответствующий способ обучения персонала и определен набор средств программно-информационной поддержки пользователей разных служб предприятия.

- Должна быть выбрана степень *аддитивности* планов, исходя из принятой на предприятии общей методологии планирования на различные горизонты (рис. 4), где δ_r , $\delta_{кв}$, δ_m — отклонение плана периода (год, квартал, месяц) и суммы планов, его составляющих. Должны быть утверждены процедуры контроля и корректировки планов в случае больших значений δ_r , $\delta_{кв}$, δ_m .

- Используемые для актуализации ретроспективные данные выбираются с учетом прогнозируемого развития событий. Однако развитие событий в плановом периоде может пойти по другому сценарию и возникнет ситуация *асинхронности*, то есть фактическое исполнение плана может значительно отличаться от прогнозируемых плановых значений. Подобная ситуация может существенно сказаться на выполнении месячного и квартального плана, что потребует их оперативной корректировки.

Но при этом на годовом горизонте эта разница может быть сглажена за счет правильных управленческих решений. Поэтому должна быть регламентирована процедура мониторинга расхождения плановых данных и реальных фактических значений внутри горизонта планирования. Соответственно, при серьезном расхождении плана и факта должна быть принята и утверждена процедура оперативной корректировки плана и самой модели в отведенные регламентом сроки.

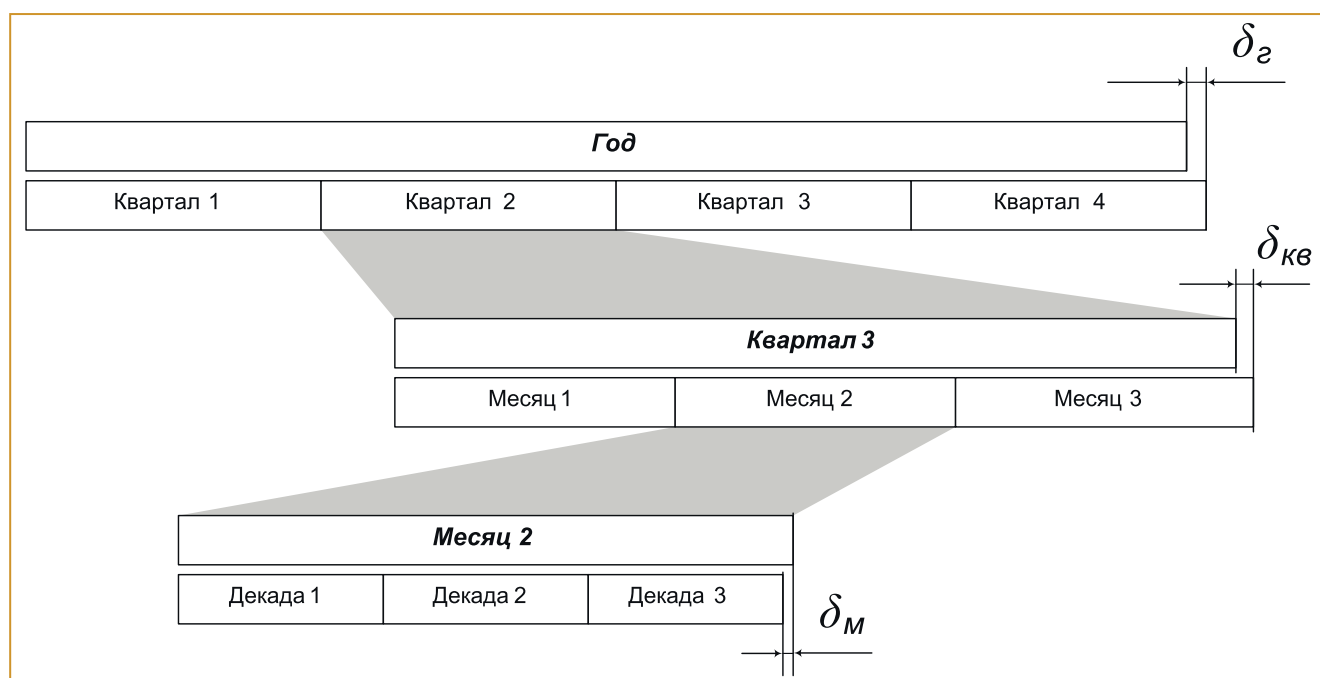


Рис. 4. Согласованность временных интервалов планирования

Приведем один из практических примеров применения этих принципов. Пусть на НПЗ в течение года, начиная с предстоящего месяца, будет поступать нефть, по которой будут представлены паспортные данные (плотность, % содержания серы и др.), но при этом детальные лабораторные данные (разгонка нефти по фракциям с оценками их показателей качества) отсутствуют, что является достаточно типичной ситуацией. Требуется осуществлять текущее планирование с горизонтом на месяц, затем на квартал и на год.

Отметим, что наличие паспортных данных по нефти позволяет сделать приближенные оценки ее детальных свойств, например, применив метод поиска аналогов [4], и затем использовать их для построения модели НПЗ с учетом детализированного качества сырья в процессах нефтепереработки. Выбор такого подхода определит необходимый уровень агрегирования модели и требуемый способ ее актуализации. Основное внимание при этом должно быть уделено адаптации пользователя к применению метода поиска аналогов и анализу возникающих проблем с взаимосвязью планов на различных временных интервалах, и расхождением прогнозных и фактических значений, в частности, из-за использования приближенных данных по нефти. Именно анализ этих проблем и должен позволить пользователю определить способ уточнения детальных свойств нефти и соответствующим способом скорректировать модель.

Из опыта применения систем APS следует, что при заданных условиях (например, с несколькими дочерними предприятиями НПЗ/НХК) решение в единой модели всех трех задач планирования нереализуемо в ходе промышленной эксплуатации при соблюдении ключевых факторов 1–3 и принципов планирования в соответствии с методологией, принятой в департаменте планирования ВИНК. Объединение моделей возможно, но в основном за счет изменения уровня агрегирования, то есть с понижением детализации описания объектов. Отметим, что при смене сезона на квартальном горизонте планирования и/или, например, при форс-мажорных обстоятельствах на дочерних производствах топлив/масел целесообразно осуществлять совместное моделирование производства и поставок, что ускорит поиск наилучшего варианта поставок в существенно изменившейся ситуации. Реализация такого подхода с использованием разработанной системы F_PRESS при агрегированном планировании ВИНК будет описана далее. Но сначала рассмотрим особенности задач планирования (рис. 1) и различные способы их совместного решения в ВИНК.

Задача планирования производства

Задача планирования производства исторически была первой благодаря исключительному высокому эффекту, получаемому от ее решения. Именно эта задача стала отправной точкой построения комплекса, охватывающего все три задачи (рис. 1). Авторы были участниками команды, реализовавшей первый боль-

шой проект по интегрированному планированию для крупной российской ВИНК.

Проект включал создание комплекса и его методическую поддержку для решения задач планирования производства на двух уровнях управления ВИНК (рис. 1). Необходимо было, используя технико-экономические исходные данные о производстве, генерировать оптимизационную модель математического программирования, находить оптимальное решение и выдавать о нем отчетную информацию. Оптимальное решение должно было определять технико-экономические параметры производства — маржинальную прибыль, потребность в сырье заданного качества, загрузку и режимы технологических установок, выработку компонент для получения требуемого ассортимента товарной продукции в рамках ограничений рынка и т. д.

Система оптимизационного производственного планирования. В качестве математического ядра комплекса, решающего оптимизационные задачи долгосрочного и текущего планирования, была выбрана система RPMS (Refinery and Petrochemical Modeling System, текущий релиз R510, разработки корпорации Honeywell, (<https://www.honeywellprocess.com>)). Система RPMS создавалась для разработки оптимизационных моделей (LP-модели) предприятий нефтепереработки и нефтехимии для эксплуатации непосредственно как в самих ДО, так и в структурах ВИНК.

Наличие такой оптимизационной системы, как RPMS позволило на предприятиях модернизировать бизнес-процесс подготовки плана и сформировать регламент совместной работы двух уровней управления в компании. Согласно регламенту, RPMS-модель проходит актуализацию технологическими данными на уровне дочернего предприятия на основе текущих данных (фактические данные из лаборатории завода, данные от систем уровня MES [5], например, Uniformance PHD/Production Balance/Production Accounting & Reconciliation компании Honeywell) и передается на уровень департамента ВИНК для актуализации экономическими данными для последующего анализа различных вариантов расчета плана.

Утвержденный вариант плана поступает на предприятие для его реализации. На предприятии проводится и последующая детализация месячного плана по суткам [3] и его корректировка на основе оперативных бизнес решений (ОБР) и/или по методике скользящего двухпериодного планирования [6].

Система имитационного производственного планирования с набором оптимизационных решающих правил. Для целей календарного планирования (рис. 1) в силу огромной размерности и сложности задачи, как правило, используются имитационные средства моделирования [1], включающие оптимизатор с набором эвристических решающих правил. В то же время зачастую на российских предприятиях расчеты календарного плана выполняются в среде Microsoft Excel, что объясняется привычкой персонала пользовательской

средой и низким уровнем автоматизации процедуры сбора, верификации и подготовки исходных данных в требуемом формате, не позволяющем за отведенное регламентом время осуществить актуализацию модели календарного планирования.

Набор программных опций для поддержки информационного окружения систем планирования. Модернизация и строительство новых установок для повышения глубины переработки, расширение ассортимента продукции, повышение требований к экологии производства и многое др. потребовало совершенствования бизнес-процессов планирования ВИНК, что привело к усложнению конфигурации RPMS-моделей. Это потребовало создания целого ряда дополнительных программных опций, предназначенных в основном для автоматизации рутинных операций по актуализации модели и интерпретации результатов расчетов. Новые программные опции впоследствии стали поставляться вместе с системой RPMS, увеличивая, тем самым, ее функциональные возможности, а также возможности систем, использующих результаты вычислений полученных с ее помощью. Программные опции, созданы российской командой разработчиков [4]:

R_FRESH — для автоматизированного расчета норм расхода энергоресурсов в зависимости от загрузки технологических установок в процессе решения задачи планирования;

R_CHECK — для анализа корректности исходных данных и результатов решения;

R_WELL — для автоматизированной настройки коэффициентов отбора в подмоделях технологических установок на основе библиотечных зависимостей;

Q_PRESS — калькулятор для вычисления недостающих данных по показателям качества потоков на основе библиотечных данных;

R_INVEST — для анализа инвестиционной деятельности и капитальных вложений;

R_COMP — для сравнительного анализа вариантов решений;

R_VIEW — для автоматизированной почтовой рассылке результатов решения подписантам;

R_GRAF — для автоматизированной генерации потоковой схемы завода (материальные и энергетические потоки) в формате Visio;

R_LINE — автоматизированный генератор линеаризованных моделей планирования;

R_MPSP — автоматизированный конвертор из многопериодных LP-моделей в однопериодные;

EXVI — автоматизированный генератор моделей оперативного планирования на основе фактических данных;

MCUT — автоматизированный генератор моделей для настройки коэффициентов отбора и показателей качества продуктов отдельных нелинейных подмоделей технологических процессов;

ASSIST — для настройки показателей качества потоков нефтяных дистиллятов по перекрытиям узких

нефтяных фракций для подмоделей установок первичной переработки нефти.

Возможность реализации подобных проектов в ВИНК предполагает, что со стороны разработчиков (или сервисной компании, внедряющей программный продукт) будет представлена профессиональная команда для технического и консалтингового сопровождения и подготовки пользователей к работе с моделями планирования. Как следствие, специалисты такой команды исполнителя должны владеть особенностями восприятия командой заказчика изменений в бизнес-процессах. Поэтому исполнителям необходимо непосредственно участвовать в разработке новых версий системы и/или дополнительных опций, тем самым постоянно совершенствуя бизнес-процесс производственного планирования. Исходя из опыта, необходимый уровень поддержки пользователей эксплуатируемой системы во временных рамках, утвержденных регламентом, может обеспечить только российская команда разработчиков и консультантов. Важнейший фактор здесь — тесный контакт и взаимодействие между разработчиками, консультантами, модельерами и всеми непосредственными пользователями систем, а также возможность оперативно вносить изменения в модели и поставляемое программное обеспечение, отлаживать бизнес-процессы планирования, быстро и корректно реагируя на обратную связь от пользователей. Соблюдение всех этих условий возможно только при совместной работе с заказчиком на площадке.

По имеющимся оценкам, использование системы RPMS R510 для автоматизации планирования работы НПЗ, например, с мощностью 17 млн. т в год по первичной переработке нефти, позволяет получить дополнительный операционный доход более 27 млн. долл. США в год [7]. Дополнительный доход от реализации плана получается за счет эффективного использования качества перерабатываемой нефти и возможностей технологических установок при получении требуемого ассортимента товарных нефтепродуктов, согласно принятым сценарным условиям [8].

Нарушение сценарных условий в ходе выполнения плана на месяц (например, не завершены в срок ремонтные работы на одной из установок, то есть возникла ситуация расхождения плана и факта) требует уточнения сценарных условий по фактическим данным, последующей актуализации RPMS-модели и оперативной корректировки плана. Подобная практика распространена повсеместно. Поэтому получение указанного выше дополнительного операционного дохода предполагает высокий профессионализм пользователей и их руководителей как на уровне ДО, так и компании, а часто и поддержки консультанта, обеспечивающего сопровождение.

Задача размещения сырья

После внедрения и успешного опыта промышленной эксплуатации моделей производственного

планирования команда приступила к решению задачи оптимального размещения сырья. Такую задачу можно сформулировать следующим образом: на горизонте планирования (месяц, квартал, год и более) требуется разместить сырье (собственное и приобретенное) на продажу (на внутренний рынок и на экспорт) и на переработку (на собственных и/или арендуемых производственных мощностях) при оптимизации ключевых экономических показателей. Проблему размещения сырья можно привести к стандартной структуре задачи ЛП, но при этом большое число коэффициентов матрицы задачи будет иметь вариативный характер из-за широкого спектра сценарных условий — изменения цен на тонну сырья в зависимости от объемов продажи, меняющихся транспортных и коммерческих условий размещения нефти, сложившейся ситуации на предприятиях переработки и экспортных направлениях и др.

При решении задачи размещения сырья требуется обеспечить необходимый уровень агрегирования LP-модели, а также регулярно осуществлять ее актуализацию для получения оптимального решения. После решения нужно предоставить пользователю возможность создавать необходимый набор отчетов для анализа плана размещения сырья и его утверждения в рамках регламента. В силу специфики задачи удовлетворить необходимым требованиям непосредственно средствами системы RPMS не удастся, что привело к созданию новой системы S_OIL с использованием технологии RSAND¹, (являющейся развитием подхода, описанного в [9–11]). Данная система представляет собой интерфейс для ввода необходимых данных и генерации пользовательских отчетов на основе решения, полученного с использованием математического ядра системы RPMS.

Система S_OIL строит в автоматизированном режиме (технология RSAND) оптимизационную потоковую модель в виде задачи ЛП размещения сырья от терминалов поставщика до терминалов потребителей. В процессе промышленной эксплуатации система S_OIL постоянно развивалась и дополнялась различными модулями и подсистемами. Текущая версия S_OIL позволяет искать максимальную маржинальную прибыль с учетом:

- реализации товарной продукции с тонны сырья («съем» с тонны);
- стоимости процессинга при поставке сырья на предприятия;
- доли компании в финансовой схеме поставки (комиссия и т. д.);
- себестоимости сырья и стоимости его транспортировки;
- контрактных цен на сырье;
- ресурсов сырья, технологически допустимых маршрутов доставки сырья и их пропускной способности;

¹ RSAND — технология построения оптимизационных систем планирования, позволяющих в автоматизированном режиме генерировать структурно-потоковые модели планирования деятельности компании и ее ДО в формате RPMS.

- экономики размещения — расходы/доходы участников по каждой отдельной заявке;
- ограничений на размещения (индивидуальных и групповых);
- возможного графика размещения сырья на экспорт и продажу на внутреннем рынке, допустимых мощностей перерабатывающих предприятий;
- схем взаимозачетов и обменных соглашений между участниками рынка;
- маршрутов размещения с экономикой транспортировки (подсистема TRAVEL);
- допустимых схем размещения сырья, каждая, из которой описывает шаблон участников отдельной поставки и экономических отношений между ними;
- базовых экономических показателей и шаблонов расчета дополнительных экономических показателей (например, НДС или возврат НДС) — подсистема EXIND.

За расчет стоимости транспортировки отвечает специально разработанная подсистема TRAVEL, где формируются коэффициенты LP-модели, соответствующие условиям транспортировки нефти на плановый период на основе данных из АК «Транснефть».

Результаты расчетов планируемой нагрузки предприятий переработки по сырью передаются непосредственно на вход RPMS-модели для планирования производств НПЗ/ХК. Пользователь имеет возможность вводить дополнительные ограничения, которые формируются исходя из возникающих сценарных условий.

После утверждения плана, в соответствии с принятым регламентом, проводятся постоптимальные расчеты и план-факт анализ с использованием специально разработанных подсистем PRICE_OIL, ACT_OIL.

Сопровождение системы S_OIL (техническая поддержка самой системы и ее интеграция с корпоративным информационным окружением) (рис. 6) также сталкивается с необходимостью модификации процедуры автоматизированной генерации LP-моделей при кардинальных изменениях в бизнес-процессах ВИНК и в правилах взаимодействия с госструктурами. Эти обстоятельства, в свою очередь, определяют направления развития системы S_OIL. Так, например, в ходе эксплуатации возникла необходимость в усилении модуля TRAVEL в части поддержки вариативности формирования транспортных затрат, отражающих различные сценарные условия. Это позволило рассчитывать разные прогнозные сценарии тарифной политики.

Задача первичного распределения продукции

Параллельно с решением задачи размещения нефти возникла потребность в решении задачи оптимального распределения продукции. Ее в общем виде можно сформулировать следующим образом: на горизонте планирования (месяц, квартал, год и более)

требуется поставить товарную продукцию централизованному потребителю/дилерам, исходя из предполагаемых ресурсов в виде производственных планов НПЗ/НХК/ГПЗ и потребностей по различным направлениям.

В изначальной постановке этой задачи компания требовала отражать в заявках плановую потребность в продуктах только по регионам, и решением было оптимальное распределение поставок продуктов с завода в регион. В процессе развития комплекса логистическая часть задачи поставок продуктов была расширена до конкретного конечного пункта — НБ. В текущей постановке решается задача первичного распределения продуктов (ППа) от завода до НБ, а потребность региона задается общим ограничением, что повышает гибкость управления поставками потребителю. Кроме того, со временем возникла потребность в модели экономической логистики, учитывающей цепочки сделок между контрагентами от завода до сбытовой организации.

Современный требуемый уровень агрегирования модели, необходимый при моделировании особенностей задачи поставки продукции (первичная логистика), не может быть реализован непосредственно средствами системы RPMS. Как следствие, потребовалась разработка специализированной системы S_PROD по технологии RSAND, которая была реализована на базе математического ядра системы RPMS.

Система S_PROD генерирует в автоматизированном режиме с использованием технологии RSAND оптимизационную потоковую модель распределения товарных продуктов по поступившим заявкам с учетом стоимости транспортировки, рассчитываемой в системе TRANS. Заявки на продукты в плановый период формируются в региональных сбытовых предприятиях (НПО). Ресурсы товарной продукции

формируются на предприятиях компании. Задача оптимизации заключается в поиске решения с минимальными затратами при распределении продукции по конечным заказчикам с учетом ограничений различного характера.

В системе S_PROD предусмотрена предварительная обработка и подготовка поступающих данных к требуемому формату. Дело в том, что на практике уровень детализации поступающих заявок является недостаточным для решения задачи и требуется ввод дополнительных параметров. Алгоритмы восстановления и контроля данных позволяют пользователям вводить недостающую информацию, а также осуществляют проверку взаимной согласованности данных, поступающих из разных источников. Это определяет одно из ключевых направлений работ по сопровождению — поддержку в актуальном состоянии алгоритмов восстановления условий поставок для заявок, цен, а также контроль корректности и согласованности поступающих данных.

В логистической части S_PROD-модели реализуются механизмы альтернативных маршрутов и подмены продуктов, если подмена одного продукта другим допустима. В подсистеме S_PRICE предусмотрены постоптимальные расчеты для анализа изменения величины прибыли в зависимости от корректировки цен на товарную продукцию.

Задача глобальной оптимизации

К решению задачи глобальной оптимизации цепочки поставок пришли после многолетней эксплуатации версии комплекса, построенной на системах S_OIL → RPMS → S_PROD. По результатам эксплуатации стал понятен уровень детализации бизнес-процессов и, следовательно, моделей. Выяснилось, что при решении глобальной задачи планирования отдельные RPMS-модели заводов

и модели поставок нефтепродуктов могут быть объединены в единую модель компании.

В [12] описан положительный опыт внедрения системы RPMS в виде ее многозаводской версии (MPLT) в компании Agip. Данный подход был взят за основу и применен при реализации в одной из ведущих российских нефтяных ВИНК.

В MPLT-модели есть возможность учитывать такие особенности задачи планирования, как производство полуфабрикатов и товарных продуктов, вырабатываемых на собственных НПЗ ВИНК из поступающего сырья (при этом существует возможность описать каждый завод не детализированной RPMS-

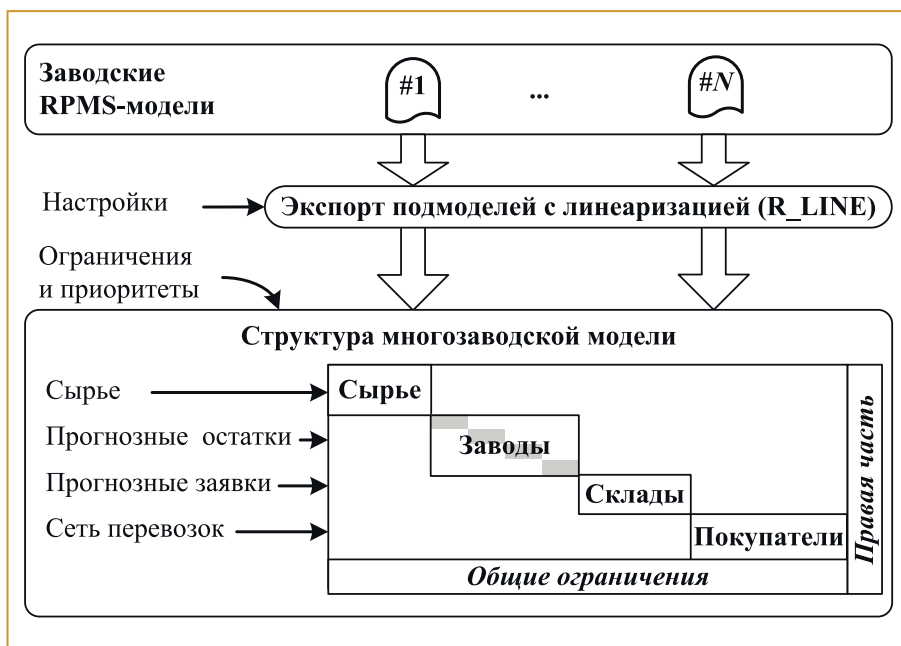


Рис. 5. Структура многозаводской RPMS-модели

моделью с полным набором технологических процессов, а «вектором», то есть фиксированным набором заданных долей производства продуктов из тонны сырья); хранение продуктов/полуфабрикатов на заводских складах и нефтебазах; транспортировка продуктов по определенным маршрутам в требуемых количествах; продажа конечным потребителям по гибкой системе тарифов; перемещение полуфабрикатов между заводами и др.

Общая оптимизационная модель при этом представляется схемой перевозок, включающей: локальные модели заводов ВИНК для определения оптимальных объемов производства; заводские склады готовой продукции наряду с обособленными региональными складами; поставщиков сырья, полуфабрикатов, продуктов; конечных потребителей товаров, дилеров.

На рис. 5 приведена структура MPLT-модели и ее основные элементы. Заводские RPMS-модели перед их включением в обобщенную модель проходят процедуру экспорта, включающую ряд преобразований. Это вызвано необходимостью привести заводские RPMS-модели к «общему знаменателю», поскольку каждая из них имеет свои особенности, так как разрабатывается и сопровождается разными пользователями на разных заводах. В процессе экспорта RPMS-модели линеаризуются (опция R_LINE), а многопериодные модели приводятся к однопериодным моделям (опция R_MPSP). В общем случае в MPLT-модель можно включать и многопериодные RPMS-модели, но число периодов разных моделей должно совпадать. Процедура выполняется автоматизировано, поэтому требуются предварительные настройки и контроль со стороны пользователя.

Спецификой задачи является огромная размерность (несколько десятков тысяч уравнений и переменных), и соответственно, возможность ручной актуализации MPLT-моделей за допустимое регламентом время отсутствует. Поэтому в процессе развития комплекса была разработана система F_PRESS для автоматизированного построения MPLT-моделей.

Система F_PRESS предназначена для агрегированного расчета производства и поставок различных видов топлива из основных нефтепродуктов. Используя RPMS-модели предприятий и информацию по сети перевозок продукции, система F_PRESS строит обобщенную оптимизационную многозаводскую MPLT-модель по схеме, приведенной на рис. 5.

Данные по логистике (сеть допустимых перевозок с экономическими показателями на каждой дуге, заявки с объемами и ценами, объемы остатков и сырья) поступают в F_PRESS из системы S_PROD. Пользователем задаются и настраиваются параметры MPLT-модели: продукты учитываемые в глобальной оптимизации, дополнительные ограничения и приоритеты.

Построение MPLT-модели идет в автоматизированном режиме с использованием генератора GENET (обобщение технологии RSAND для многозаводского планирования). В общем виде задача многозаводского планирования представляет собой нелинейную оп-

Если время, место, помощники или способ действия выбраны плохо или не той, не удивляйся, если что-то не получится.
Раздумья Ванталы

тимизационную задачу очень большой размерности, включающую полные RPMS-модели заводов и логистическую модель распределения потоков. Поэтому при генерации MPLT-модели происходит ее агрегирование с целью уменьшения размерности:

- во-первых, производится свертка направлений поставки до областей (убирается детализация по программам лояльности, по розничным каналам реализации и т. п.). Таким образом, решается задача покрытия потребности регионов в основных нефтепродуктах по нефтебазам;

- во-вторых, в MPLT-моделях для оптимизации развоза, учитываются не все продукты, а только конкретный их набор, например, бензины, дизельные топлива и балансовые нефтепродукты.

Такой подход к агрегированию MPLT-модели, с одной стороны, огрубляет модель, с другой — делает ее решаемой с использованием существующих вычислительных средств. Цель — принять общее решение по конкурентным направлениям поставки топлив/масел потребителю от разных производителей компании с учетом всей технологии производства и, как правило, на предстоящий квартал. В дальнейшем это решение должно уточниться в системах RPMS и S_PROD с требуемым уровнем детализации.

Сопровождение системы F_PRESS, помимо технической поддержки, включает консультационные услуги по интерпретации результатов расчета, дополнительное обучение пользователей, а также модификацию алгоритмов генерации MPLT-модели, связанную с изменением бизнес-процессов ВИНК.

Задача реализации продукции по конечным потребителям

Описанные выше системы, решающие задачи I–IIIa, являются оптимизационными системами класса ЛП со встроенными алгоритмами последовательного ЛП (кроме задачи календарного планирования производства, для решения которой используются системы имитационного моделирования, включающие оптимизатор с набором эвристических решающих правил). В качестве ядра для оптимизационных систем используется система RPMS (Honeywell) и оптимизатор XPRESS (компания FICO).

Исходя из полученного опыта, в процессе разработки комплекса проектная команда пришла к пониманию, что для решения задачи вторичной логистики IIIb наиболее эффективно использовать средства дискретной оптимизации с набором эвристических правил. Примером системы такого класса является система VISIT Plus фирмы VISIT System Ltd (Велико-

британия), которая может быть встроена в комплекс интегрированного планирования российскими разработчиками.

Система VISIT Plus обеспечивает решение задачи вторичного распределения продуктов, включая распределение нефтепродуктов с нефтебаз и продажу с терминалов потребителям в оперативном режиме. Система позволяет моделировать множество потоков спроса на продукты от крупных торговых/промышленных потребителей до АЗС, а также обменные соглашения с другими торгующими продуктами компаниями.

Прежде чем продукт поступит к своему потребителю после размещения или прогнозирования заказов, должно произойти несколько событий. Пополнение запасов должно быть скоординировано с динамикой спроса на станциях розничной торговли (например, АЗС), продукт должен уже быть в наличии на нефтебазах, составлен график его доставки до АЗС, заказаны автоцистерны, назначены водители транспортных средств, выполнены остальные мероприятия для осуществления перевозок. Автоматизированное формирование заявок на поставки потребителям и составление графика работы автотранспорта являются ключевыми особенностями системы Visit Plus.

Применение системы такого типа в оперативном режиме позволяет благодаря автоматизированным и оптимизационным процедурам существенно сократить затраты, связанные с транспортной логистикой, загруженностью водителей, использованием специальных емкостей для перевозки. Встроенные средства технологии GPS предоставляют информацию о перемещениях автотранспорта в реальном масштабе времени. Все это дает возможность специалистам плановых служб региональных сбытовых предприятий и НБ перейти к реальному оперативному управлению объектами в суточном цикле.

Интеграция систем комплекса в единое информационное пространство

В задачу интеграции систем комплекса входит возможность объединения исходных данных, результатов решения, полученных из различных систем, в единое информационное пространство и использования этих данных для решения задач планирования,

подготовки отчетов и в информационных системах предприятия. В комплексе функционально должны быть обеспечены:

- импорт и хранение данных из информационных систем ДО;
- импорт и хранение данных из корпоративных информационных систем компании;
- преобразование, верификация, объединение, расчет недостающих значений и обмен данными между системами комплекса;
- автоматизированная актуализация моделей планирования из БД комплекса;
- формирование отчетов в требуемом пользователем формате.

В текущей версии взаимодействие комплекса с другими информационными системами обеспечивается средствами адаптера ESCORT (рис. 6) с возможностью электронного оповещения о проблемах в передаваемых данных (по электронной почте соответствующим подписчикам, ответственным за подготовку данных) и журналированием событий в специализированной БД. Основной формат обмена данными — файлы XML, расположенные в сетевых папках общего доступа или доступные по протоколу FTP. Также поддерживается подключение к БД по технологиям OLE DB или ADO.NET. Подготовка пользовательских отчетов проводится в среде Microsoft Excel средствами генератора LINDOC, что расширяет возможности вариантных расчетов. Адаптер ESCORT может работать как самостоятельное интеграционное решение (рис. 6), непосредственно реализуя обмен данными как с корпоративными информационными системами (КИС), так и с существующими средствами интеграции (рис. 6), например, с интеграционной шиной SAP XI.

Выводы: ключевые особенности внедрения и сопровождения комплекса

Исходя из опыта, можно перечислить следующие ключевые особенности внедрения и сопровождения комплекса, без учета которых невозможна его эффективная промышленная эксплуатация.

1. Руководство компании должно обеспечивать всю необходимую поддержку исполнителя проекта, в том числе, постоянно контролировать выполнение работ по проекту своими сотрудниками, например, своевременное предоставление актуальных исходных данных исполнителю, тестирование пилотных версий моделей, своевременное составление журнала замечаний для исполнителя.
2. Компания должна сформировать проектную команду (в головном офисе и в ДО),

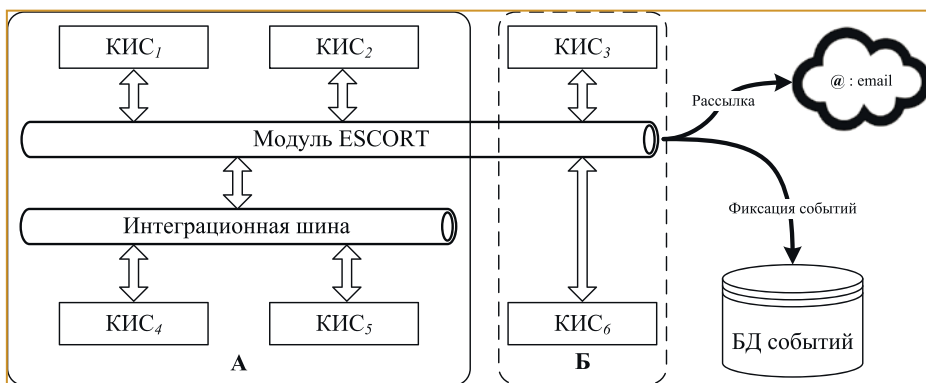


Рис. 6. Схема работы адаптера ESCORT

отвечающую за реализацию всего проекта, при этом желательно предоставить исполнителю полномочия подбора будущих членов проектной команды заказчика. Руководитель проекта от исполнителя также должен руководить и проектной командой компании. После сдачи комплекса в промышленную эксплуатацию проектная команда функционирует еще не менее года и проводит все необходимые мероприятия по отладке и совершенствованию работы комплекса.

3. После запуска комплекса в эксплуатацию исполнителю необходимо предоставить заказчику услуги по сопровождению — техническую поддержку программного обеспечения, консультации по настройке и модификации моделей, по средствам интеграции и отчетам, регулярную переподготовку специалистов.

Сопровождение комплекса в части модификации программного обеспечения и математических моделей в условиях промышленной эксплуатации имеет ряд особенностей. В частности, в связи с накоплением реального опыта работы с комплексом специалистами заказчика и анализом этого опыта специалистами исполнителя, становится возможной разработка более детального технического задания на модификацию систем комплекса от специалистов заказчика с указанием намного более точных сроков, трудозатрат и стоимости.

Важным этапом в разработке и внедрении новой версии (будь то новое программное обеспечение и/или новые математические модели) является переход на эту версию в ходе промышленной эксплуатации комплекса. Различные методики и рекомендации обычно предполагают параллельную эксплуатацию двух версий (старой и новой) в течение некоторого периода, как правило, охватывающего несколько циклов планирования. Однако на практике такой подход не работает, поскольку поддержка нескольких версий в процессе планирования требует увеличения трудозатрат в человеко-часах, поэтому специалисты заказчика сразу переходят на новую версию. При этом необходимо обязательное присутствие специалистов исполнителя на площадке заказчика для оперативной поддержки и максимально быстрой ликвидации нештатных ситуаций. Участие исполнителя сокращается вдвое после прогона двух-трех месячных периодов планирования на новой версии. В случае успешного расчета квартального плана, сопровождение и поддержка модели переходят в обычный режим промышленной эксплуатации до начала годового планирования и разработки стратегии на следующие 3...5 лет, что также потребует активного участия специалистов исполнителя. Успеш-

ное прохождение этих этапов знаменует собой полный переход на новую версию.

Таким образом, зачастую проблемы внедрения комплекса такого масштаба заключаются не в функциональности программного обеспечения, выбранного у конкретного поставщика, а в наличии локальной команды исполнителя, готовой решать поставленные задачи по адаптации совместно со специалистами заказчика и последовательно доводить системы/модели комплекса интегрированного планирования до эффективной эксплуатации на этапе опытной и промышленной эксплуатации.

Список литературы

1. *Городнова М.С., Хохлов А.С.* Имитационный подход к решению задачи календарного планирования и построения расписаний в нефтепереработке // Автоматизация в промышленности. 2018. №12.
2. *Бридж Г., Ле Бийон Ф.* Нефть. Пер. с англ. Н. Эдельмана; науч. ред. перевода Т. Дробышевская. М.: Изд. Института Гайдара. 2015. 344 с.
3. *Хохлов А.С., Коннов А.И., Шайдуллин Р.А.* Комплексный подход к планированию непрерывного производства // Автоматизация в промышленности. 2015. №4. с. 24-33.
4. *Хохлов А.С., Цодиков Ю.М., Баулин Е.С.* Оптимизационные модели НПЗ/НХК и средства их поддержки. Уч. пособие. М.: Изд. центр РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. 2015. 91 с.
5. *Ицкович Э.Л.* Методы комплексной автоматизации производства предприятий технологических отраслей. М. КРАСАНД, 2013. 232.
6. *Баулин Е.С., Боронин А.Б., Хохлов А.С.* Скользящая детализация текущего плана НПЗ/НХК и актуализация оптимизационных моделей // Автоматизация в промышленности. 2012. №10. С. 8-14.
7. *Кувыкин В.И.* Организация автоматизированных систем планирования и материального баланса // Автоматизация в промышленности. 2014. №8. С.29-33.
8. *Боронин А.Б., Петухов М.Ю., Хохлов А.С.* Подходы к ЛП-моделированию производства НПЗ для целей планирования // Автоматизация в промышленности. 2016. №2. С. 10-16.
9. *Coxhead R.E.* Integrated Planning and Scheduling Systems for the Refining Industry // Optimization in industry. 1994. №2. P.185-199.
10. Optimization in industry. Mathematical Programming and Modeling Techniques in Practice. Ed. Ciriani T.A., Leachman R. C. J. Wiley & Sons. 1994.
11. *Хохлов А.С., Коннов, А.И., Зельдин А.Е.* Системы оптимизационного планирования и опыт внедрения и эксплуатации их в ВИНК // Автоматизация в промышленности. 2009. №10.
12. *Bodington C. E., Shobrys D.E.* Optimize the Supply Chain// Hydrocarbon Processing. 1996. V. 75. P. 55-60.

Хохлов Александр Сергеевич — д-р техн. наук, проф. РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина, ведущий консультант,

Баулин Евгений Сергеевич — канд. техн. наук, генеральный директор

ООО «Центр цифровых технологий» МФТИ (ГУ).

E-mail: khokhlov.as@mipt.ru, baulin.es@mipt.ru

Коннов Александр Иванович — канд. физ.-мат. наук, старший консультант,

Мишутин Дмитрий Юрьевич — канд. техн. наук, консультант отдела систем планирования производства, снабжения и сбыта АО «Хоневелл».

E-mail: alexander.konnov@honeywell.com, dmitry.mishutin@honeywell.com