



## Подходы к ЛП-моделированию производства НПЗ для целей планирования

М.Ю. Петухов (АО «ПЕТРОТЕЛ-ЛУКОЙЛ»), А.Б. Боронин (ЗАО «Хоневелл»), А.С. Хохлов (МФТИ)

Рассматривается выбор степени детализации переделов НПЗ в ЛП-модели для оптимизации производственной деятельности на плановом горизонте. Формулируется критерий выбора при условии выполнения регламента планирования, когда актуализация ЛП-модели, поиск оптимума, интерпретация решения и передача плана на исполнение должны осуществляться в принятые на НПЗ сроки. Приведены оценки эффективности детализации ЛП-модели и даны практические рекомендации их достижения.

Ключевые слова: НПЗ, оптимизационное планирование производства, ЛП-системы, модернизация ЛП-моделей.

### Введение

В настоящее время на российских и зарубежных НПЗ расчет производственных планов проводится с использованием специализированных систем класса APS (Advanced Planning and Scheduling). Данные системы (ЛП-системы) работают на основе заложенных в них методов математического программирования (МП), что позволяет пользователям строить оптимизационные модели нефтеперерабатывающих/нефтехимических производств и искать их решение (план) по критерию максимума маржинальной прибыли. В подобных моделях потоки характеризуются количеством и качеством, что приводит к появлению нелинейности в виде произведения переменных. Для поиска оптимума используют современные оптимизаторы линейного программирования (ЛП), позволяющие, как правило, решать задачи МП большой размерности с наличием в них многопериодности, нелинейности и целочисленности.

Повсеместное применение ЛП-систем на НПЗ/НХК для оптимизационного расчета планов говорит об их важности и эффективности для управления предприятием [1] и требует от пользователей понимания различных подходов к построению модели математического программирования (ЛП-модель) для отражения в ней технологических особенностей производства, рыночной конъюнктуры и качества сырья и нефтепродуктов.

Опыт работы показал, что в ходе длительной эксплуатации ЛП-систем имеет место тенденция к упрощению ЛП-моделей НПЗ. Специалисты НПЗ делают предположение, что в плановом периоде на НПЗ поступает нефтяное сырье достаточно «стабильного качества» и имеет место «узкий диапазон» изменения технологических и производственных параметров. В результате пользователи исключают из ЛП-модели сложные связи между различными параметрами и работают в узком диапазоне, где адекватность производственному процессу сохраняется. Такой подход существенно упрощает пользователям эксплуатацию ЛП-систем, снимает проблемы несходимости и несо-

вместности ЛП-модели при поиске оптимального решения и гарантирует получение производственного плана в сроки, предусмотренные регламентом планирования. Но указанные предположения редко выполняются в реальности. В результате погрешности ЛП-моделей могут быть весьма значительными, что приводит к экономическим потерям и росту недоверия служб предприятия и руководства к рекомендациям ЛП-системы и получаемым планам.

Существенное повышение степени детализации ЛП-модели, которое бы учитывало весь круг технологических и производственных особенностей НПЗ, практически не реализуется в силу возникновения нелинейной и невыпуклой задачи МП. Такая ситуация порождает проблемы сходимости и совместности в процессе поиска оптимума, что провоцирует специалистов НПЗ на упрощение ЛП-модели.

В статье рассматриваются подходы к моделированию технологических особенностей переделов основного производства НПЗ. Суть подходов заключается в выборе такой степени детализации подмоделей первичной, вторичной переработки, смешения и их потоковой взаимосвязи, которая окажет наибольшее влияние на маржинальную прибыль, и при этом возни- кающая конфигурация ЛП-модели не станет существенным препятствием в процессе поиска оптимума.

### Выбор степени детализации ЛП-модели НПЗ

Значительная часть российских НПЗ использует ЛП-модели простой конфигурации. Такие модели характеризуются ограниченным числом связей между параметрами. Основным признаком простых ЛП-моделей является использование в подмоделях установок фиксированных плановых материальных балансов, в которых коэффициенты отборов продукции не зависят от значений параметров качества входящего сырья и параметров режима работы. Исключение обычно составляют подмодели установок первичной переработки нефти, планирование выходов дистиллятов на которых моделируется путем

смешения узких фракций нефтяного сырья, с учетом вариантов работы и четкости погоноразделения, характеризующих атмосферные и вакуумные колонны. Также для ЛП-моделей часто характерно отсутствие зависимости между качеством сырья и целевого продукта установки из-за сложности подтверждения корректности этой зависимости.

При таком подходе полученное решение простой ЛП-модели может обладать достаточной адекватностью лишь в случаях переработки на НПЗ нефтяного сырья постоянного качества и неизменных режимах работы технологических установок. Очевидно, что если НПЗ оптимизирует режимы работы установок в зависимости от конъюнктуры рынка и перерабатывает нефти различного качества, то фактические выходы продуктов установок и их качество не являются постоянными.

Каким образом детализировать ЛП-модель, чтобы она наилучшим образом отражала производственные возможности НПЗ и тем самым оптимизировала его производственную деятельность? Наиболее логичный подход — внести в ЛП-модель максимум информации для повышения адекватности оптимального плана. Однако такой подход практически нереализуем. Это объясняется тем, что с ростом размерности и нелинейности часто возникнет невыпуклая ЛП-модель, и решатель не сможет найти оптимальное решение [2]. Другим следствием усложнения ЛП-моделей является сложность работы с ней для специалистов НПЗ из-за повышения требований к ее актуализации и трудности в поиске ошибок. Таким образом, чрезмерная детализация ЛП-модели повышает ее сложность и может приводить к негативным последствиям, поэтому процесс усложнения ЛП-модели должен быть постепенным с приоритетами по наиболее важным направлениям.

#### Расчет приоритетов

Здесь возникает вопрос выбора критерия, который мог бы быть использован для определения степени важности учета в ЛП-модели тех или иных зависимостей одного параметра от другого  $a_i = f_{ij}(a_j)$ . Ответ следует из постановки задачи ЛП — соответствующий критерий должен отражать степень влияния данной зависимости на значение целевой функции. Для этого предлагается оценить величину изменения целевой функции при изменении исследуемого параметра в диапазоне его значений от минимума до максимума. Если предположить, что целевая функция  $\bar{L}(a_j)$  изменяется линейно от параметра  $a_j$  в диапазоне  $[a_j^{min}, a_j^{max}]$ , то математически такая оценка для параметра  $a_j$  запишется в виде:

$$\Delta_j = \left| \bar{L}(a_j^{max}) - \bar{L}(a_j^{min}) \right|, \quad (1)$$

где  $\bar{L}(a_j^{max})$ ,  $\bar{L}(a_j^{min})$  — значения целевой функции, полученные при  $a_i = f_{ij}(a_j^{max})$  и  $a_i = f_{ij}(a_j^{min})$  соответственно. Если целевая функция  $\bar{L}(a_j)$  изменяет-

ся нелинейно от параметра  $a_j$ , то потребуется более сложный способ получения оценки  $\Delta_j$ . Очевидно, что с ростом  $\Delta_j$  увеличивается погрешность решения для простой ЛП-модели, а следовательно, требуется учет зависимости  $a_i = f_{ij}(a_j)$ .

Значения величин  $\Delta_j$  позволяют проранжировать влияние разных параметров  $a_j$  при введении их в модель НПЗ. Отметим, что для разных НПЗ влияние параметров  $a_j$  может существенно отличаться из-за различий в их конфигурациях и других специфик производственной деятельности. Кроме того, значительную роль играют масштабы вариаций качества нефтяного сырья.

Наиболее ярким примером подобных различий является учет в ЛП-модели вязкостных характеристик нефти и нефтепродуктов. Моделирование вязкости в нефтепереработке имеет ключевое значение в основном для формирования адекватных рецептур смешения темных нефтепродуктов (главным образом, топочного мазута). Прослеживание в ЛП-модели вязкости, начиная от нефтяных фракций, имеет важное значение для заводов, значительной частью товарной продукции которых является топочный мазут.

Другой пример — выработка арктических сортов зимнего дизельного топлива, которое обладает ограничениями на температуру помутнения. Производство данного продукта сопровождается значительным влиянием на отборы дизельного дистиллята на АВТ и вакуумных погонных [3]. По этой причине учет в ЛП-модели зависимости отборов нефтепродуктов на установке АВТ от температуры помутнения узких фракций нефтяного сырья играет значительную роль для НПЗ, производящих арктическое дизельное топливо.

Приведем некоторые экономические оценки, рассчитанные на основе исследования стандартных отклонений изменения качества поступающего на НПЗ нефтяного сырья. Для этого смоделируем работу установок, являющихся обязательной частью конфигурации любого НПЗ, в системе RPMS (Refinery and Petrochemical Modeling System) и рассмотрим показатели качества, которые имеют важное значение для отборов на установках.

В качестве примера выберем установки каталитического риформинга (риформинг) и гидроочистки дизельного топлива (гидроочистка). Для анализа оценки экономических эффектов воспользуемся характерными ценами на нефть и нефтепродукты за I полугодие 2015 г. Отборы целевых продуктов на установках риформинг и гидроочистка главным образом зависят от показателя N2A и содержания серы (S) в сырье, соответственно. Если рассмотреть НПЗ, который перерабатывает несколько сортов нефтей, то разброс значений по показателю N2A в сырье риформинга может составлять 15...20%. В этом случае получим, что использование усредненных (независящих от N2A) отборов по установке риформинга и рыночных цен 2015 г. предполагает ошибку  $\Delta_{N2A} \approx 0,5$  долл. США на тонну

перерабатываемой нефти. Теперь рассмотрим для установки гидроочистки зависимость отбора компонента товарного дизтоплива от количества серы во входном сырье. Рассчитаем с использованием RPMS погрешность от отсутствия в простой ЛП-модели зависимости отборов целевых продуктов для отклонения содержания серы в сырье гидроочистки  $\sim 0,5\%$ . Оценка ошибки составляет  $\Delta_s \approx 1,5$  долл. США на тонну нефти. Из вышеприведенных оценок следует, что детализация ЛП-модели по установке гидроочистки для рассматриваемого примера НПЗ носит более приоритетный характер в сравнении с установкой риформинг. Тем не менее, обе величины погрешностей нефти достаточно значительны и требуют их учета в ЛП-модели.

Достаточно очевидно, что величины ошибок  $\Delta_j$  с большей вероятностью будут более высокими для тех зависимостей  $a_i = f_{ij}(a_j)$ , которые описывают процессы на установках с большой производительностью (в силу объемного фактора). Именно поэтому для любого НПЗ первостепенным направлением совершенствования ЛП-модели является корректное конфигурирование установки АВТ. Здесь также отметим, что на АВТ моделируется качество дистиллятов, которые в свою очередь поступают в качестве сырья на установки вторичной переработки нефти. Последнее лишь повышает требования к моделированию процессов первичной переработки нефти.

#### Процессы первичной переработки

Приоритетной задачей обеспечения адекватности ЛП-модели является правильное моделирование работы установок первичной переработки. Моделирование отборов на установке АВТ необходимо проводить с учетом характеристик ее колонн, параметров перерабатываемого нефтяного сырья и его фракций. Такой подход значительно отличается от моделирования других установок, для которых в большинстве случаев достаточно учитывать в ЛП-модели зависимости отборов и качества продуктов от одного характерного показателя в сырье. Например, для установки риформинга таковым является показатель N2A в сырье, для установки замедленного коксования — показатель «кокс по Конрадсону» и т.д. Для установки АВТ указанный подход не может быть реализован в полной мере, прежде всего, из-за трудностей внесения в ЛП-модель зависимостей отборов дистиллятов. Другой минус данного подхода обусловлен тем, что при планировании отборов на первичной переработке обычно решается обратная задача, когда отборы дистиллятов на установке определяются в соответствии с требуемым качеством товарных нефтепродуктов. Кроме того, отборы различных дистиллятов на АВТ могут варьироваться. Соответственно данная вариативность также должна быть привязана к рыночной конъюнктуре и учтена в ЛП-модели.

Таким образом, подмодель АВТ в ЛП-модели должна иметь высокую степень гибкости и вариативности, отражающей ключевые возможности уста-

новки. Во многих случаях моделирование работы АВТ проводится в ЛП-модели путем внесения в нее нескольких фиксированных вариантов отборов дистиллятов, соответствующих разным режимам АВТ, например, максимум отбора бензинового дистиллята и/или дизельного летнего дистиллята, максимум отбора среднего дистиллята и т.д. Получение необходимых лабораторных данных по сырью и указанным вариантам методологически отработано [4], центральные заводские лаборатории (ЦЗЛ) НПЗ имеют большой опыт. Для средней вариативности при двух АВТ и двух товарных нефтях такой подход по числу необходимых вариантов в подмодели АВТ осложнений не вызывает. Результат решения ЛП-модели для АВТ представляется в виде суперпозиции фиксированных вариантов отборов дистиллятов, прозрачен для понимания специалистами НПЗ и лабораторного контроля.

При увеличении размерности подмодели АВТ возможен другой (альтернативный) подход к моделированию первичных установок. В подмодель установки АВТ вводятся промежуточные фракции (так называемые swing-cut). Это достаточно узкие фракции (порядка  $10 \dots 30^\circ \text{C}$ ), которые располагаются на границах между «основными» широкими фракциями-дистиллятами (бензиновый дистиллят, керосиновый дистиллят, дизельный дистиллят, дистилляты вакуумных погоннов). В зависимости от ограничений на качество и объемы товарной продукции, а также от экономической эффективности ее выработки промежуточные фракции могут быть направлены в смешения либо одного, либо другого дистиллята, исходя из четкости погоноразделения колонн АВТ. Последнее предполагает дополнительный анализ данных ходового контроля дистиллятов АВТ, поступающих из ЦЗЛ НПЗ. Использование такого приема моделирования АВТ позволяет повысить гибкость ее планирования, не увеличивая значительно числа фиксированных вариантов работы. Порядок величины экономического эффекта от внедрения промежуточных фракций, рассчитанного с использованием моделей RPMS в условиях переработки нефтяного сырья относительно постоянного качества при изменяющихся рыночных ценах, составляет до 1 долл. США на тонну нефтяного сырья. В условиях же когда НПЗ работает на сырье переменного качества, то есть в условиях оптимизации выбора нефтяного сырья, экономическая эффективность от внедрения промежуточных фракций дополнительно увеличивается.

#### Процессы вторичной переработки

Ключевые процессы вторичной переработки — риформинг, каткрекинг/гидрокрекинг, висбрекинг, замедленное коксование и т.п. Эти процессы позволяют повысить глубину переработки и выработать компоненты для получения широкой гаммы товарной продукции. Выходы целевых продуктов этих процессов определяются не только режимом работы, но и качеством входного сырья.

Подмодели этой группы, несмотря на высокие значения оценки  $\Delta_j$  для  $a_j$  параметров процессов, часто реализуют на отечественных НПЗ по первому способу, то есть в виде фиксированных вариантов работы. Причины такой практики в том, что традиционно производственные службы НПЗ указывали переработчикам, какие выходы целевых продуктов должны быть приняты на плановый период. Эту практику службы НПЗ часто переносят и на работу с оптимизационной моделью, что некорректно для модельного описания таких процессов. Применяемые в подмоделях зависимости выходов и качества продуктов от качества входного сырья воспринимаются производителями очень настороженно: «Качество неверно и зависимости сомнительны».

Адекватность ЛП-модели повысится, если ввести в подмодели установок основные зависимости отборов и качества продуктов от свойств входящего сырья. Такой подход является важной и неотъемлемой частью детализации простой ЛП-модели. Современные ЛП-системы позволяют реализовать такой подход в основном с использованием линейных или кусочно-линейных зависимостей одного параметра от другого. Данная зависимость известна в литературе как «База+Дельта». Когда фактические значения параметров процесса совпадают с базовыми, характеристика  $i$ -го продукта равна базовому значению  $k_i$ , в противном случае значение характеристики корректируется в ходе решения ЛП-модели.

Переход к широкому использованию подмоделей типа «База+Дельта» усложнит пользователю процесс актуализации ЛП-модели и может сказаться на сходимости к оптимуму. В связи с этим целесообразно ЛП-системы дополнять специализированными опциями, обеспечивающими необходимую автоматизированную поддержку. Например, система RPMS для этих целей имеет специализированные опции Q\_PRESS, R\_WELL, R\_FRESH и R\_CHECK [5, 6].

#### Процессы смешения

Следующим важным направлением совершенствования ЛП-модели является корректное моделирование смешений нефтепродуктов. Данная проблема в большей степени относится к тем показателям качества, поведение которых при смешении различных компонентов носит существенно неаддитивный (нелинейный) характер. В первую очередь к таким параметрам относятся вязкость нефтепродуктов и их температурные характеристики. Основная сложность при расчете таких параметров заключается в отсутствии точных формул расчета величины параметра смесового нефтепродукта. Существующие формулы расчета, которые, в том числе внедрены в системы оптимального планирования, обычно дают низкую погрешность лишь в определенном интервале значений свойств компонентов смешения. Например, известно [7], что основные формулы для расчета вязкости смеси нефтепродуктов обладают приемлемой

*Пределы наук походят на горизонт:  
чем ближе подходят к ним, тем более  
они отодвигаются.*

Пьер Буаст

погрешностью, когда компоненты смешения обладают достаточно близкими реологическими свойствами. В то же время погрешность определения вязкости смеси для существенно различающихся по реологическим свойствам компонентов (например, гудрон и дизельное топливо) может быть весьма значительна. Это касается также и температурных характеристик, таких как значения температуры помутнения, фильтруемости, замерзания, вспышки. В некоторых случаях НПЗ непосредственно дорабатывает существующие формулы для смешений на основе статистических данных лаборатории и вносит их в систему оптимального планирования. В частности, такую корректировку формул расчета показателей смесей позволяет проводить система RPMS.

Отметим также, что при наложении ограничений на качество смеси во многих случаях приходится решать задачу: какие отборы нефтепродукта должны быть на установке, чтобы получалось требуемое качество товарного нефтепродукта. Классической в этом случае выглядит задача определения конца кипения дизельной фракции (в процессе решения ЛП-модели) для удовлетворения максимальной температуры помутнения товарного дизельного топлива. В этом случае решается обратная задача, а именно: определяется отбор дистиллята с АВТ для соблюдения требуемого качества товарного дизельного топлива. Данная задача не всегда является тривиальной и в некоторых случаях требует внесения значительных усложнений в конфигурацию ЛП-модели.

Эффективное смешение товарных нефтепродуктов на НПЗ дает наибольший вклад в экономику производства и достигается это за счет снижения «отдачи качества» и их себестоимости. Важным аспектом является здесь дополнительное введение средств оптимизации на уровень оперативного управления смешением, то есть подключение систем off- и on-line смешения. Например, согласно [8], экономический эффект за первый год эксплуатации этих систем на НПЗ составил более 3 долл. США на тонну товарных бензинов.

#### Переменные удельные нормы

Важный этап повышения степени детализации ЛП-модели — переход к переменным удельным нормам учета затрат на предприятии. Данный подход достаточно подробно описан в литературе [9] и уже применяется на части НПЗ РФ.

Подход к использованию переменных норм расхода основан на том, что, несмотря на увеличение потребления материальных ресурсов с ростом загрузки технологических установок, их удельные нормы

расхода снижаются. Последнее в большей степени относится к энергоресурсам (топливу, электроэнергии и теплоэнергии). Эффекты, которые может получить предприятие с точки зрения оптимизационного планирования от использования переменных расходных норм, значительны. Это происходит, во-первых, за счет корректной оптимизации объема переработки нефтяного сырья на предприятии. Данный эффект достигается за счет корректного учета затрат на переработку 1 т нефти и может составлять порядка 1...2 долл. на тонну общего объема переработки нефтяного сырья. Вторым следствием корректного планирования затрат является повышение эффективности контроля (мониторинга) фактических норм расхода энергоресурсов, что также приводит к определенным экономическим эффектам. Более точный прогноз расхода электроэнергии при планировании способствует более точному предварительному заказу электроэнергии у энергосбытовых организаций и может приводить к экономии в расходах предприятия.

Моделирование переменных норм расхода обычно проводится путем внесения кусочно-линейных зависимостей норм потребления удельных норм от нагрузок технологических установок. В частности, специально для этих целей авторами [6] была разработана дополнительная опция R\_FRESH к системе RPMS.

#### Балансы

Корректность сведения балансов по водороду, содержанию серы, энергоресурсам НПЗ должно найти отражение в рассчитываемом плане и соответственно в ЛП-модели. Составление водородного баланса без учета зависимости объемов производства и потребления водородосодержащего газа от концентрации в нем водорода является распространенной ошибкой при формировании ЛП-моделей. Как известно, производство водорода на НПЗ помимо установок каталитического риформинга проводится на специализированных установках из закупаемого природного газа или из собственных газов НПЗ. Процент выхода водорода на таких установках составляет не более 30% масс., что обуславливает очень высокую себестоимость его производства. Учет этих факторов при планировании потребления и производства водорода на НПЗ входит в число приоритетных задач при модернизации ЛП-модели.

Важным индикатором корректности ЛП-модели является выполнение баланса по содержанию серы, соблюдение которого означает равенство для каждой технологической установки процента серы на «входе/выходе» установки. Невыполнение баланса по содержанию серы в ЛП-модели свидетельствует об ошибках моделирования. Поэтому необходимо своевременно выявлять причины соответствующих небалансов и вносить необходимые корректировки в ЛП-модель.

#### Учет неравномерности

На производствах типа НПЗ неравномерность внутри планового периода может затрагивать: работу установок (ремонт, пуск-останов); изменение качества полупродукта в резервуаре, например, из-за изменения режима работы установки; ограничения и цены на сырье и товарную продукцию. В ситуации явной неравномерности необходимо плановый период разбить на временные интервалы равномерности (далее интервалы) и, используя их, перейти к работе с многопериодной ЛП-моделью.

Например, с начала месяца необходимо остановить на 10-дневный ремонт установку гидроочистки с максимально допустимой мощностью  $M$  т/сут. и отразить это в плане на месяц. Поскольку расчет однопериодной ЛП-модели происходит на основе усредненных значений того или иного ограничения по периоду, то процесс решения ЛП-системой будет осуществляться с учетом «работы» гидроочистки равномерно в течение месяца (30 сут.) с максимально допустимой мощностью  $M \times (30-10)/30$  т/сут. Некорректность полученного плана на месяц с использованием однопериодной ЛП-модели очевидна, и следует формировать многопериодную ЛП-модель с двумя интервалами 10 и 20 суток. Современные ЛП-системы, в частности, система RPMS, позволяют в ЛП-модели сформировать необходимое число интервалов со спецификой каждого из них.

Преимущество многопериодной ЛП-модели перед отдельным однопериодным планированием возникающих интервалов состоит в том, что потребность предприятия в нефтепродуктах может вноситься в ЛП-модель на весь плановый период целиком. При этом ЛП-система распределит производство необходимых продуктов по интервалам, ориентируясь на максимизацию целевой функции. Попытки оптимизировать распределение нефтепродуктов по интервалам вручную, рассчитывая месячный план как сумму нескольких планов для более коротких интервалов, очень трудоемки, что в результате влияет на оперативность процесса планирования. При необходимости получения заданного количества нефтепродукта в определенный промежуток времени, такое ограничение можно ввести в модель в каждом периоде.

В многопериодной ЛП-модели предусматривается возможность накопления запасов компонентов к концу одного интервала для дальнейшего вовлечения в производство в следующем интервале внутри планового периода. Необходимо для запасов задать только минимальное и максимальное количество. ЛП-система оптимизирует загрузки установок и позволяет также зафиксировать различные загрузки установок в отдельные интервалы, если это необходимо.

Накопление запасов в резервуарах для использования в последующие интервалы можно планировать для сырья установок и для компонентов смешения. В результате решения будет определен оптимальный уровень запасов. Таким способом

можно, например, планировать накопление сырья для установки риформинг перед ее останом. В ЛП-модели можно учитывать, что качество полупродукта в резервуаре, который накоплен в предыдущем интервале, будет совпадать с качеством полупродукта с установки в текущем интервале или может отличаться от него.

В случае возникновения существенной неравномерности производства (поставка сырья разного качества, плохо прогнозируемая отгрузка нефтепродуктов и т.п.) необходимо дополнять ЛП-системы комплексами календарного планирования [10].

#### Продажи в объемах

Конечный потребитель, как известно, покупает на заправках бензин и дизельное топливо именно в литрах, а не в килограммах. Последнее позволяет утверждать, что производство соответствующих видов продукции также должно быть оптимизировано в объемах. Например, на НПЗ поступают две нефти № 1, № 2 по одной цене. Из нефти № 1 товарный бензин получается со средней плотностью 750 кг/м<sup>3</sup>, из нефти № 2 плотность товарного бензина составляет 740 кг/м<sup>3</sup>. Если предполагается продажа бензина в объемах, то эффективность продажи бензина из нефти № 2 составит дополнительно 1,4% к цене автобензина. В результате за счет данного фактора эффективность нефти № 2 будет выше нефти № 1 на ~2...3 долл. США на тонну нефти.

Подход с оптимизацией продаж нефтепродуктов в объемах может быть реализован в существующих ЛП-системах достаточно просто. Тем не менее, он практически не используется на НПЗ РФ. Последнее обусловлено двумя причинами. Во-первых, в большинстве случаев отношения между НПЗ и сбытовыми организациями выстраиваются на основании продаж физических объемов в массовых единицах. Последнее объясняется тем, что такой подход наиболее понятен и удобен в учетной политике организаций. Во-вторых, это отсутствие понимания эффективности такого подхода.

Отметим, что для оптимизации продаж в объемах необязательно менять подход к учету, а можно решить данную задачу путем введения премий на качество (плотность) товарной продукции. При этом в договорах на поставку нефтепродуктов будет указываться цена при определенном значении плотности товарного продукта. При отклонении плотности товарного продукта от данного значения предприятие получит премию (или штраф), который пропорционален снижению (увеличению) плотности.

#### Заключение

Рассмотренные в настоящей статье подходы были применены при модернизации ЛП-модели НПЗ АО «ПЕТРОТЕЛ-ЛУКОЙЛ».

При повышении степени детализации ЛП-моделей необходимо уделить внимание следующим аспектам.

1. Производственные службы НПЗ должны руководствоваться ключевыми показателями эффективности, принятыми на производстве, а не указывать специалистам служб ЛП-моделирования НПЗ, какие выходы целевых продуктов должны быть приняты на установках в плановом периоде.

2. Пройти путь модернизации ЛП-модели, повышая ее степень детализации, нельзя экспромтом: требуется время от нескольких месяцев до года. Это связано со сложностью моделирования технологических процессов в ЛП-системах и отсутствием у служб НПЗ необходимых статистических (лабораторных) данных для корректного формирования плановых зависимостей одних технологических параметров от других.

Проблему сложности моделирования и ранжирования по критерию (1) можно решить, подключив консультантов, поэтому крупные проекты модернизации ЛП-моделей в той или иной степени проходят с участием разработчика ЛП-систем.

При отсутствии данных необходимо либо проводить опытно-промышленные пробеги на технологических установках, либо ограничиваться расчетными данными, которые могут быть получены из таких систем технологического моделирования как, например, UniSim Design, Petro-SIM или HYSYS.

3. Сотрудники служб, ответственные за ЛП-моделирование, должны пройти специализированное обучение по продвинутому моделированию технологических особенностей НПЗ с использованием эксплуатируемых ЛП-систем и иметь в дальнейшем возможность получать консультационную поддержку.

ЛП-системы должны обладать необходимой поддержкой пользователей для автоматизированного контроля ЛП-моделей и анализа результатов поиска оптимального решения, как это сделано, например, с использованием дополнительных опций [5,6] в системе RPMS R510 — [http://honeywell.com/worldwide/Pages/Russia\\_rus.aspx](http://honeywell.com/worldwide/Pages/Russia_rus.aspx).

Дополнительные затраты на работы по модернизации, переподготовку и приобретение дополнительной функциональности более чем оправданы повышением эффективности использования ЛП-систем согласно приведенным в статье оценкам.

#### Список литературы

1. *Кувыкин В.И.* Организация автоматизированных систем планирования и материального баланса // Автоматизация в промышленности. 2014. №8. С.29-33.
2. *Петухов М.Ю.* Особенности параметрического анализа ЛП-модели производственного планирования для нефтеперерабатывающего завода // Нефтепереработка и нефтехимия. 2015. №4. С.3-9.
3. *Медвед В.М., Калинин А.А., Каминский Э.Ф. и др.* Применение метода оптимизации топлив в ПО «ОРСКНЕФТЕОРГСИНТЕЗ» // Химия и технология топлив и масел (ХТТМ). 1985. №3.
4. *Хохлов А.С., Демиденко К.А., Цодиков Ю.М., Гайнетдинова А.Н.* Оптимизационный расчет товарной харак-

- теристики и потребительской ценности нефти. Уч. пособие. РГУНиГ им. Губкина, 2009.
5. Хохлов А. С., Боронин А. Б., Гайнетдинова А. Н. Автоматизированная актуализация оптимизационных моделей планирования непрерывных производств//Автоматизация в промышленности. 2009. № 7. С. 58-61.
  6. Баулин Е. С., Боронин А. Б., Хохлов А. С. Актуализация моделей планирования НПЗ/НХК и учет потребления энергии//Тр. РГУНиГ им. Губкина. Сб. науч. статей. 2012. № 10. С. 8-14.
  7. Андреева Л. А. и др. Вязкость смеси жидкостей//Модерирование динамических систем. Сборник науч. тр. нижегородского филиала ИМАШ РАН. Под ред. В. И. Ерофеева. 2007. С. 11-16.
  8. Аносов А. А., Ефитов Г. Л. Оптимальное управление компаундированием топлив — задачи, решения, опыт в России//Автоматизация в промышленности. 2015. № 4. С. 1521.
  9. Кувыкин В. И. Оптимальное планирование и анализ моделей непрерывного производства//Автоматизация в промышленности. 2015. № 8. С. 13-17.
  10. Хохлов А. С. Коннов А. И. Шайдуллин Р. А., Комплексный подход к планированию непрерывного производства//Автоматизация в промышленности, Москва, 2015, № 4. С. 24-33.

**Петухов Михаил Юрьевич** — канд. физ.-мат. наук, начальник планово-экономического отдела АО «ПЕТРОТЕЛ-ЛУКОЙЛ»,

**Боронин Андрей Борисович** — канд. техн. наук, старший консультант ЗАО «Хоневелл»,

**Хохлов Александр Сергеевич** — д-р техн. наук, ведущий консультант

ООО «Центр цифровых технологий», МФТИ,

Контактный телефон (985) 761-20-70.

E-mail: MYPetukhov@yandex.ru Andrey.Boronin@honeywell.com Khokhlov.as@mipt.ru

## ОСОБЕННОСТИ ИСПЫТАНИЙ СЕПАРАЦИОННОГО МНОГОФАЗНОГО РАСХОДОМЕРА ДЛЯ ВЫСОКООБВОДНЕННОЙ НЕФТИ

**А.А. Вакулин (ГГУ), А.Н. Лищук (АО «Группа ГМС»), А.А. Кириченко (ГГУ)**

Для автоматических измерений расхода и количества компонентов продукции нефтяных скважин с долей воды  $\geq 95\%$  на АО «ГМС "НЕФТЕМАШ" (г. Тюмень) создан сепарационный многофазный расходомер ИУ МЕРА-МИГ. Его работа основана на совместной реализации двух методов измерения расхода сепарационными многофазными расходомерами: "гидростатического" и "постоянного уровня".

Приведены сведения об особенностях испытаний многофазного расходомера на базе аттестованного и утвержденного Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии в качестве рабочего эталона единицы массового расхода газожидкостных смесей Научно-испытательного стенда многофазных потоков, самого крупного в России. Приведены экспериментальные данные оценок относительных погрешностей измерения количества компонентов многофазного потока при различных значениях его обводненности, а также значения основных метрологических характеристик ИУ МЕРА-МИГ<sup>1</sup>.

Ключевые слова: многофазные расходомеры, многофазные стенды, обводненность, нефть, метрология, испытания.

В настоящее время в России сложилась такая ситуация, что многие крупные месторождения нефти характеризуются так называемой стадией завершающей разработки. Она отличается тем, что доля воды в продукции скважин может составлять  $> 95\%$ , поскольку для извлечения нефти необходимо закачивать большие объемы воды. В частности, к таким месторождениям относятся следующие: Самотлорское (Россия, ХМАО, остаточные запасы нефти составляют около 1 млрд. т.); Ромашкинское (Россия, Татарстан, около 500 млн. т.); Федоровское (Россия, ХМАО, около 400 млн. т.); Мамонтовское (Россия, ХМАО, около 350 млн. т.); Усть-Балыкское (Россия, ХМАО, около 200 млн. т.); Правдинское (Россия, ХМАО, 180 млн. т.) и т.д. Извлекаемые запасы углеводородов по месторождениям такого типа в России оцениваются в несколько миллиардов тонн. Этот факт и наличие развитой промысловой инфраструк-

туры обеспечивают целесообразность эксплуатации таких месторождений в течение, по меньшей мере, 15...20 лет.

Согласно требованиям закона РФ «О недрах» № 2395-1 от 21.02.1992 и Налогового кодекса РФ добыча нефти и газ подлежат обязательному учету. Основанием для прямого учета количества добываемой нефти на конкретном участке недр согласно ГОСТ Р 8.615-2005 ГСИ "Измерения количества извлекаемых из недр нефти и нефтяного газа. Общие метрологические и технические требования" являются результаты прямых и косвенных измерений массы сырой нефти. В частности, в соответствии с п. 6.1 указанного ГОСТа, пределы допускаемой относительной погрешности измерений: а) массы сырой нефти:  $\pm 2,5\%$ ; б) массы сырой нефти без учета воды при содержании воды в сырой нефти (в объемных долях): до 70%  $\pm 6\%$ ; от 70% до 95% —  $\pm 15\%$ ; свыше 95% —

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации проекта по Постановлению Правительства № 218 от 9 апреля 2010 г., по договору № 02. G 25.31.0020 ОАО «ГМС Нефтемаш» совместно с ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный университет».