

ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ПРЕДПРИЯТИЯ

А.С. Хохлов, Е.С. Баулин (ООО «Центр цифровых технологий» МФТИ (ГУ)),
П.Е. Бородин, А.Б. Боронин (АО «Хоневелл»)

Рассматриваются вопросы, связанные с применением методик, моделей и направлений в технологиях для внедрения на нефтеперерабатывающих, нефтехимических предприятиях с целью повышения энергоэффективности их производственной деятельности. Описан опыт по внедрению оптимизационных моделей с учетом переменной энергетики в АО «ЛУКОЙЛ» и ее дочерних предприятиях. Даны рекомендации по повышению эффективности использования оптимизационных моделей планирования с переменными нормами расхода энергоресурсов для повышения энергоэффективности работы предприятий.

Ключевые слова: энергоменеджмент, оптимизационное планирование, LP-модели, повышение энергоэффективности, энергосбережение.

Введение

Согласно последней международной оценочной ведомости энергоэффективности американского совета по энергоэффективной экономике (АСЕЕЕ) для 25 крупнейших экономик мира, Россия занимает 21 место, пропустив Украину и опередив Таиланд, ЮАР, Объединенные Арабские Эмираты и Саудовскую Аравию. Экономики этих 25 стран отвечают за 78% мирового потребления энергии и более чем 80% мирового ВВП. А первое место общего рейтинга разделили Германия и Италия, ЕС в целом, Китай и Франция, Япония и Великобритания разделили шестое место (http://www.topclimat.ru/news/field/energy_efficiency_rating.html).

Для преодоления указанного отставания Министерство Энергетики РФ утвердило в 2010 г. государственную программу «Энергосбережения и повышения энергетической эффективности до 2020 г.» (<https://minenergo.gov.ru/node/441>) и затем стратегию до 2035 г., а в 2012 г. ввело ГОСТ Р ИСО 50001-2012 (аналог ISO 50001) как национальный стандарт РФ системы энергетического менеджмента. Цель стандарта — «дать возможность организациям разработать системы и процессы, необходимые для улучшения энергетической результативности, включая энергетическую эффективность, использование и потребление энергии» (<http://iso-management.com/wp-content/uploads/2018/09/ISO-50001-2011.pdf>).

В связи с этим на всех промышленных предприятиях проводятся мероприятия по повышению энергоменеджмента их производственной деятельности. Принципиальное значение задача повышения энергоэффективности имеет для таких энергоемких производств как нефтепереработка и нефтехимия, в частности, поэтому отечественные вертикально-интегрированные нефтяные компании (ВИНК) активно внедряют новые технологии на производстве, осуществляют модернизацию устаревших технологических установок и занимаются оптимизацией управления энергоменеджментом.

Для определения необходимых на конкретном предприятии мероприятий по повышению энергоэффективности, очередности их выполнения, времени

и трудозатрат на их реализацию, необходимо сделать качественную оценку эффективности этих мероприятий.

В мировой практике, а также и в России в нефтепереработке широко распространена методика бенчмаркинга перерабатывающих предприятий, которая заключается в сравнении производственных показателей предприятия и сложившихся на нем методов и практик работы с ключевыми производственными показателями и лучшими практиками, применяемыми лидерами отрасли. Предприятия сначала сравниваются между собой по различным показателям производственной деятельности, приведенным к общим условиям на основе нормирующих коэффициентов, а затем ранжируются между собой по этим показателям. Одним из мировых лидеров проведения бенчмаркинга в нефтепереработке является компания Solomon Associates (США), которая уже более 35 лет проводит свои исследования по всему миру, в том числе свыше 15 лет в России. В частности, за последние 6 лет (исследования проводятся 1 раз в 2 года) группа из 18 российских заводов, подключившаяся к исследованиям Solomon, стала регулярно (ежемесячно) отслеживать значение индекса энергоемкости (ЕП), рассчитываемого по их методике, и при этом сумела добиться заметного повышения энергоэффективности своей производственной деятельности [1].

Известны также подходы, основанные на проведении внутреннего энергоаудита с использованием только собственных экспертов и фактических данных работы предприятия [2]. Такой метод незаменим, когда необходимые данные для сравнения с другими предприятиями отсутствуют в открытом доступе, и приходится делать оценки тех или иных мероприятий, исходя только из собственных накопленных данных.

Мероприятия по повышению энергоэффективности можно условно разделить на две категории. К первой относятся такие мероприятия, как модернизация производства и внедрение современных технологий, например:

- строительство новых современных установок вместо устаревших, используемых на протяжении уже многих десятилетий; введение в эксплуатацию

менее энергоемкого оборудования ОЗХ (счетчиков, датчиков, компрессоров, насосов и т. д.);

- введение в эксплуатацию: автоматизированных информационно-измерительных систем коммерческого/технического учета энергоресурсов и систем энергетических балансов.

Такие мероприятия требуют существенных капитальных и операционных затрат, кроме того их внедрение требует много времени. При этом экономическая целесообразность строительства новых производственных процессов или реконструкция существующих требует обоснования для руководства компании, поскольку полученные за счет новых технологий преимущества могут не окупить вложенные затраты, хотя в целом именно такие решения позволяют существенно повысить энергоэффективность. Для обоснования целесообразности проведения мероприятий широко используются оптимизационные модели планирования предприятия, позволяющие наиболее точно оценить эффект от них.

К другой категории относится оптимизация бизнес-процессов по принятию управленческих решений в компании и ее дочерних предприятиях, например:

- изменение регламента производственного планирования, а именно, разработка методики и использование более точных математических моделей для вычисления расчета удельных норм потребления энергоресурсов, реагентов и прочих вспомогательных материалов;

- использование оптимизационных моделей при планировании работы предприятия с учетом затрат на энергоресурсы на заданный горизонт планирования (год, квартал, месяц, неделя и более детально);

- оптимизация бизнес-процессов обмена нужной информацией между корпоративными системами и визуализация подготовленной в требуемом формате информации, необходимой руководству для принятия более быстрых и правильных управленческих решений.

Мероприятия второй категории являются, как правило, менее дорогостоящими, но требуют наличия на предприятии квалифицированного персонала, способного разрабатывать и поддерживать математические модели, более достоверно отражающие энергопотребление. При этом энергоменеджмент сводится к административному внедрению нового регламента и научно-обоснованных моделей и методик более эффективного планирования расхода энергоресурсов. В результате удается решить ряд важных проблем.

- *Перепроизводство.* Может иметь много причин и, в частности, неэффективное использование оптимизационных систем планирования производства, где рассчитывается, например, потребность в топливно-энергетических ресурсах (ТЭР) на плановый период.

- *Простой установок не форс-мажорного характера.* Связано с низкой эффективностью текущего и календарного планирования НПЗ/НХК.

- *Завышение/занижение требований к технологическим процессам.* Как следствие, завышение/занижение планов потребления энергии на НПЗ/НХК. Это часто связано с заданием некорректных норм энергопотребления, что требует исследования и их уточнения.

- *Возникновение избыточных запасов.* Отражает низкий уровень достоверности маркетинговых прогнозов служб сбыта и, соответственно, снижает эффективность планирования выпуска продукции НПЗ/НХК.

- *Выпуск некондиционных продуктов.* Для сбалансированного производства это, как правило, связано с низкой эффективностью текущего и календарного планирования работы НПЗ/НХК.

Для реализации подобных мероприятий необходимо наладить взаимодействие между всеми службами: отделом главного энергетика, производственным отделом, планово-экономическим отделом, лабораторией, отделом маркетинга. Общей платформой их взаимодействия и обмена данными должна быть единая оптимизационная модель предприятия, учитывающая технологию и энергетический баланс всего производства.

Далее будут рассмотрены существующие подходы к использованию оптимизационных моделей и способы поддержки корректной информацией. Будут даны рекомендации по повышению эффективности использования и расширению сфер применения оптимизационных моделей.

Модели планирования — инструмент оценки производственных программ и модернизации технологии производства

В условиях современной рыночной экономики для любого промышленного предприятия основной задачей является производство товарной продукции с минимальной себестоимостью. Расход энергоре-

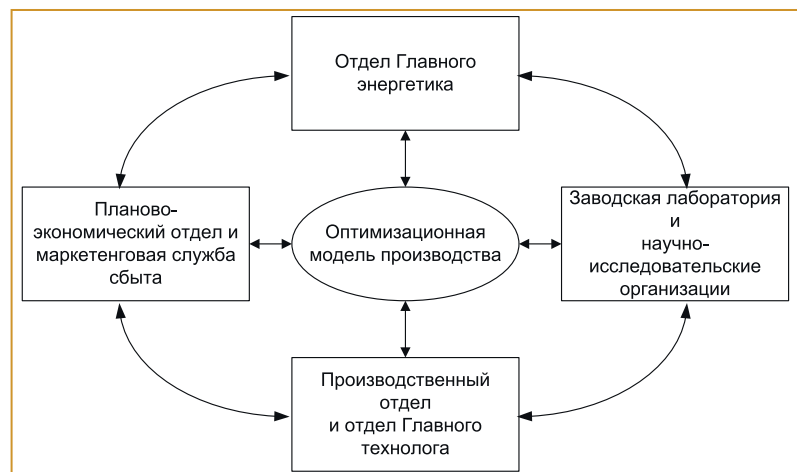


Рис. 1. Информационное окружение модели производственного планирования

сурсов и вспомогательных материалов (включая пар, газ, воздух, электроэнергию и т. д.) может составлять до 50% от общей стоимости затрат на производстве. Поэтому погрешность в планировании потребления энергоресурсов более чем на 5% может привести к значительному отклонению в абсолютном денежном выражении.

Для оценки оптимальной производственной программы предприятий в мире, и в России в частности, широкое распространение получили специализированные системы математического моделирования, позволяющие разработать единую оптимизационную модель всего производства с учетом данных, поступающих из всех внутренних служб предприятия и внешних источников (рис. 1).

Лаборатория и научно-исследовательские организации:

- усредненное качество поступающих видов нефти и свойства узких нефтяных фракций; показатели качества промежуточных потоков с технологических установок и готовых товарных нефтепродуктов;
- при отсутствии необходимых данных из лабораторного анализа в моделях планирования применяются зависимости, как правило, разработанные проектными институтами, научно-исследовательскими организациями, лицензиарами технологий, позволяющие сделать оценку свойств на основе регрессионного анализа по накопленной статистике;
- в случаях, когда установку только планируют ввести в производство или вывести на новый режим работы, используют в основном проектные данные, представленные лицензиарами технологического процесса.

Производственный отдел и отдел главного технолога:

- материальные балансы технологических установок для различных видов сырья и режимов работы;
- запасы, имеющиеся в наличии на начало периода планирования;
- ограничения по производственным мощностям и график ремонтов установок на горизонте планирования.

Отдел главного энергетика: сезонные нормы потребления энергоресурсов, вспомогательных материалов и реагентов в зависимости от загрузок установок и качества перерабатываемого сырья.

Планово-экономический отдел и маркетинговая служба поставки и сбыта:

- экономика переработки, включая стоимость всей номенклатуры потребляемого сырья, вспомогательных материалов, энергоресурсов и цены на товарные нефтепродукты;
- прогноз на поставку сырья и сбыта продуктов.

Зачастую встречается распространенная методологическая ошибка, возникающая при принятии важнейших управленческих решений, связанных с выбором развития технологии производства, когда самостоятельно рассматриваются отдельные про-

изводственные блоки. В силу междисциплинарной природы такой задачи приходится привлекать к ее решению специалистов разного профиля, и как следствие никто конкретно не чувствует себя полностью ответственным за полученные результаты.

Очевидно, что для повышения эффективности управленческих решений по таким вопросам, как выбор производственной программы и модернизация технологии целесообразно использовать единую систему, обеспечивающую согласование и оптимизацию технологических вариантов производства и финансово-экономических схем их реализации с учетом всех перечисленных данных.

Примером такой системы, позволяющей сформировать оптимизационную модель с учетом всего необходимого набора данных, является ПО RPMS (Refinery Petrochemical Modeling System) — продукт корпорации Honeywell (www.Honeywell.com). С помощью систем такого класса, как RPMS можно рассчитывать различные технологические варианты производственных программ и выбирать наиболее эффективный с точки зрения экономики, экологии [3] и энергоэффективности.

Математическую постановку задачи оптимального производственного планирования в системах такого класса в общем виде представляют следующим образом:

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

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

где c_j — цена продажи единицы x_j , $j = 1, \dots, m$ — переменные продажи потоков модели; d_j — стоимость покупки единицы x_j , $j = m+1, \dots, n$ — переменные покупки потоков модели; x_j , $j = n+1, \dots, p$ — переменные внутренних потоков модели, нагрузки установок, качество смесей и т. д.; a_{ij} — постоянные коэффициенты матрицы ограничений; $a_{ij}(x_j)$ — переменные коэффициенты матрицы ограничений, зависящие от x_j ; $\underline{b}_i, \bar{b}_i$ — левые и правые части ограничений, $i = 1, \dots, k$. Критерием решения данной задачи является максимизация маржинальной прибыли F . Данная постановка задачи представляет собой задачу нелинейного математического программирования, на практике решаемую методом последовательного линейного программирования (ПЛП). В зарубежной литературе для обозначения задачи (1)–(2), решаемой методом ПЛП, как правило, используют термин «LP-модель» [4].

Например, с применением таких систем можно с определенной точностью учесть, как изменение различных входных параметров модели повлияет на энергоэффективность работы всего завода:

- при анализе вариантов, связанных с выбором нефти для переработки, можно учесть, как изменение фракционного состава нефти повлияет на загрузку

установок вторичной переработки нефти, и на этой основе будет рассчитано соответствующее потребление энергоресурсов;

- изменение прогнозов по сбыту продукции и поставке сырья также повлияет на загрузку установок, что приведет к корректировке плана по расходу энергоресурсов;

- изменение отбора продуктов с установок и изменение их показателей качества также отразится на энергоэффективности работы предприятия;

- исходя из экономических параметров на текущем горизонте планирования, можно сделать оценку выбора — продавать мазут с завода, а энергию в виде пара и электроэнергии приобрести со стороны, или использовать этот мазут как топливо на выработку необходимой энергии для собственных нужд.

Системы энергоменеджмента — источник данных для актуализации моделей планирования

Корректное формирование удельных норм потребления энергоресурсов (УНПЭ) имеет принципиальное значение для повышения энергоэффективности работы предприятия.

Во-первых, использование научно-обоснованных УНПЭ способствует:

- улучшению организации производства и эксплуатации энергетического хозяйства;
- экономии энергии и снижению себестоимости продукции промышленных предприятий;
- освоению новых технологических режимов работы.

Во-вторых, зависимости УНПЭ от таких параметров, как сезон года, загрузка установки, качество сырья или выпускаемого продукта (как правило, нелинейные), являются исходными данными для формирования оптимизационных моделей планирования. Без корректной актуализации модели, как было

показано в предыдущем разделе, невозможно сделать адекватную оценку производственной программы.

Использование научно-обоснованных методов формирования УНПЭ, как показал опыт, позволяет сэкономить до 5% электроэнергии в год, а главное, что при этом не требуется проведения специальных технических мероприятий. В основном, конечно же, на предприятиях существуют методики и инструктивные документы по разработке УНПЭ. Но необходимо отметить, что даже при наличии подобных документов разработка корректных УНПЭ не всегда представляется возможной по разным причинам, например, организационного характера:

- недостаточное число контрольно-измерительных приборов и их нерациональное использование (на практике бывают случаи, когда один прибор учитывает расход сразу по нескольким цехам);

- одним и тем же прибором может учитываться расход энергоресурса на различные цели, например, которые зависят от загрузки производства (потребление установкой) и которые не зависят от загрузки производства (освещение, вентиляция и т. д.).

Ситуацию может усугублять еще и тот факт, что необходимая информация по потреблению энергоресурсов может быть недоступна сотруднику предприятия, которому она нужна, или он не может получить ее в нужный момент времени, или получает в формате, который невозможно использовать в работе без предварительной обработки и подготовки.

Современное решение подобного рода проблем формирования УНПЭ — использование ИТ-систем энергоменеджмента, позволяющих организовать интеграцию информации из разных участков производства, архивировать ее, преобразуя в необходимый формат, и обеспечивающих точки доступа пользователей в соответствии с их должностными ролями.

К таким решениям относятся системы типа АСКУЭ/АСКУТ (автоматизированные информационно-измерительные системы коммерческого/технического учета энергии) для учета расхода электроэнергии/теплоэнергии. Такие системы позволяют выполнять детальный анализ потребления энергоресурса на каждом участке производства и корректно выполнять коммерческие расчеты с поставщиком или потребителем данного энергоресурса.

Важной задачей, которую позволяют решать современные системы энергоменеджмента, является не только корректный учет расхода топливно-энергетических ресурсов, но и также сведение энергетических балансов (например, решение компании Honeywell Production Accounting & Reconciliation по автоматизации составления и согласования материальных и энергетических балансов). Современные решения позволяют сводить балансы не только энергоресурсов, но и таких агентов, как сжатый воздух, азот, конденсат и др. Внедрение системы энергоменеджмента направлено на решение следующих основных задач:

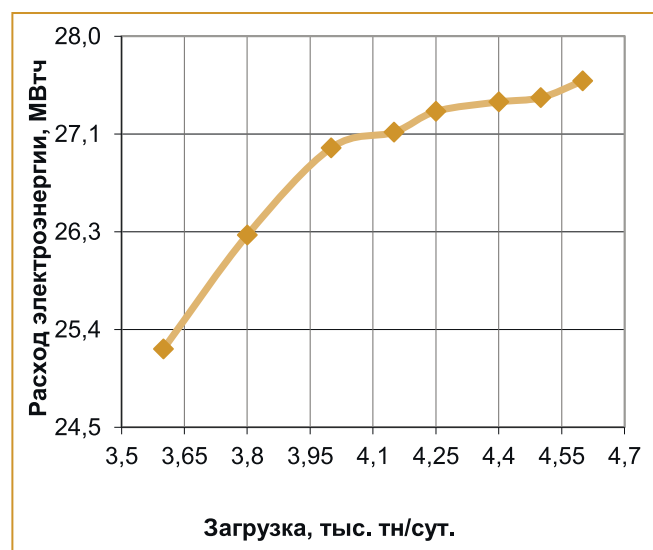


Рис. 2. Пример графика кривой расхода электроэнергии (мвт*ч) в зависимости от загрузки установки АВТ сырьем (тыс. т/сут.)

- анализ и оценка использования того или иного вида топлива на конкретном участке производства;
- корректное разделение расхода энергоресурсов по статьям затрат;
- выявление и локализация потерь энергоресурсов;
- оптимизация энергопотребления и улучшение контроля;
- повышение эффективности работы специалистов отдела главного энергетика за счет большей оперативности их действий путем предоставления им доступа к необходимой информации, например, по снабжению завода электрической энергией в удобном автоматически обработанном формате;
- бесперебойное питание установок завода топливно-энергетическими ресурсами нужного качества и в требуемом количестве для работы в оптимальном режиме;
- предотвращение внеплановых остановок или снижения загрузок на производстве, связанных с прекращением подачи энергоресурсов;
- улучшение экономических показателей работы завода;
- использование всеми сотрудниками единой информационной платформы для работы с производственными данными вместо нескольких систем, а иногда и бумажных журналов.

Обобщая все вышесказанное и, в частности, применительно к предприятиям нефтепереработки/нефтехимии, можно сделать вывод о том, что для корректного расчета УНПЭ регламентом должны быть согласованы следующие мероприятия:

- утверждение процедуры сбора данных для статистического исследования и определения наиболее важных производственных факторов, влияющих на расчет УНПЭ;
- формирование зависимостей во времени изменения затрат энергоресурсов от наиболее важных технологических факторов;
- разработка научно-обоснованной методики расчета УНПЭ с учетом специфики каждого участка производства;
- разработка прогнозных моделей УНПЭ, позволяющих адекватно планировать их расход.

Указанные мероприятия, как показал опыт, являются важной составной частью энергоменеджмента на предприятии.

Таблица 1. Энергопотребление установки АВТ в зависимости от производительности (тыс. т/сут.)

Загрузка, %	Загрузка, тыс.т/сут.	Электроэнергия, кВтч/т	Теплоэнергия, Мкал/т	Жидкое топливо, т/т
78,3	3,60	7,0	22,0	22,6
82,6	3,80	6,9	21,6	22,1
87,0	4,00	6,7	21,1	21,4
90,2	4,15	6,5	21,1	21,2
92,4	4,25	6,4	21,5	20,9
95,7	4,40	6,2	21,2	20,8
97,8	4,50	6,1	20,8	20,6
100,0	4,60	6,0	20,5	20,5

Модели планирования с учетом переменных УНПЭ

Разработка методики прогнозирования УНПЭ позволяет перейти к учету их изменений от нагрузки по основным технологическим процессам в моделях планирования работы предприятий. Большинство отечественных нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий (НПЗ/НХК) оснащены системами моделирования класса RPMS, что позволяет перейти к совершенствованию их моделей производств, в части учета потребления энергоресурсов и, соответственно, выявлять и проводить необходимые энергосберегающие мероприятия в ходе энергоменеджмента.

На многих российских предприятиях в моделях планирования НПЗ/НХК используют постоянные удельные нормативы расхода энергоресурсов и вспомогательных материалов, которые устанавливаются исходя из предполагаемых экспертных оценок. Но анализ фактического потребления энергоресурсов и вспомогательных материалов НПЗ/НХК выявил переменный характер этих затрат в зависимости от сезона года и нагрузки и качеству сырья.

В основе расчета переменных норм лежат кривые расхода (выработки) энергоресурсов в зависимости от загрузки установок. Эти данные разрабатываются отделом главного энергетика (ОГЭ) предприятий для разных сезонов работы и утверждаются в компании для целей планирования. Сезонные нормативы могут утверждаться для кварталов, сезонов и даже отдельных месяцев. На рис. 2 приведен пример кривой расхода электроэнергии на установке атмосферно-вакуумной трубчатке (АВТ) в зависимости от загрузки сырьем.

Авторами был предложен, а затем успешно внедрен на отечественных и зарубежных предприятиях способ учета переменных норм расхода (выработки) энергоресурсов в моделях планирования. Данный способ заключается в замене постоянных норм кусочно-линейными функциями, которые задаются наборами пар точек: загрузка — норма расхода. Выбор числа точек для задания кривых расхода (выработки) энергоресурсов зависит от желаемой точности приближения исходных кривых и организационных возможностей сбора данных на предприятии (табл. 1).

Для возможности учета переменных норм в RPMS-моделях дополнительно к базовой комплектации системы RPMS поставляется специализированная опция R_FRESH. Процедура поиска решения RPMS-модели с помощью опции R_FRESH осуществляется следующим способом:

- решение RPMS-модели начинается с текущих норм расхода энергоресурсов, заданных в подмоделях установок;
- после решения модели производится автоматический анализ суточных загрузок установок в решении, и при необходимости корректируются нормы расхода (выработки) энергоресурсов непосредственно

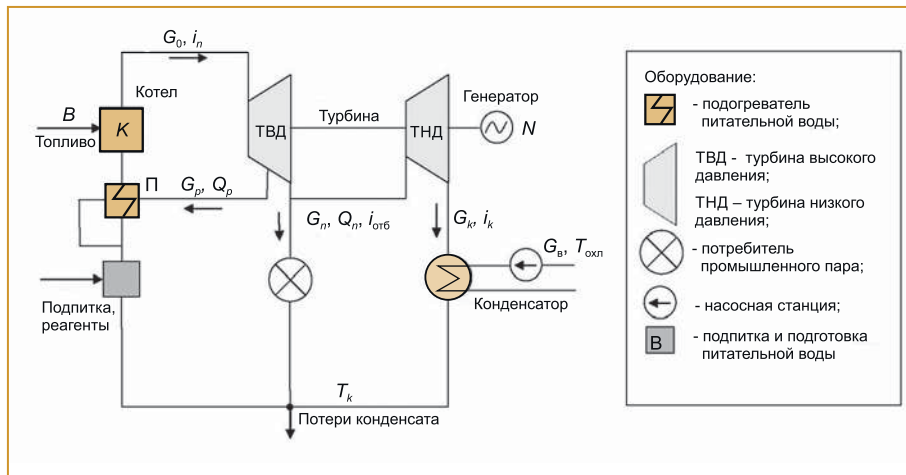


Рис. 3. Условная упрощенная технологическая схема ТЭЦ

в RPMS-модели в соответствии с таблицами переменных норм;

- процесс решения повторяется до тех пор, пока величина изменения корректируемых норм не станет допустимой.

Внедрение оптимизационной системы RPMS с расширенной функциональностью в виде дополнительной опции R_FRESH позволило:

- повысить точность расчета потребления энерго-ресурсов, вспомогательных материалов и реагентов на НПЗ/НХК и за счет этого перейти на более высокий уровень энергоменеджмента на предприятии;
- корректно оценить фактическое исполнение предприятиями сметы затрат путем формирования сметы производственных расходов на RPMS с учетом фактических параметров работы (за счет использования корректных УНПЭ, соответствующих нагрузкам по установкам): объема переработки нефти, загрузки установок и выработки продукции;
- повысить эффективность применения оптимизационной системы планирования RPMS на дочерних предприятиях и в центральном офисе нефтяной компании ПАО «ЛУКОЙЛ». Точность расчета потребления энерго-ресурсов и вспомогательных материалов удалось повысить для ряда установок на 20...30%.

Отметим, что подобный подход в построении моделей планирования обобщается и на производства дискретного типа массового характера, например, производство шин, резинотехнических изделий и др., где вполне эффективно применяются оптимизационные модели в виде математической постановки (1–2).

В частности, система SOFTYRE, реализованная с использованием ядра RPMS, успешно эксплуатируется на предприятии ПАО «Нижнекамскшина» более 20 лет [5]. Система SOFTYRE сопровождается компанией Honeywell. В системе предусмотрен учет в генерируемой оптимизационной модели переменных УНПЭ от загрузки и сезонов года. Например, в [10] показано, что по набранной статистике за несколько лет работы производства ПАО «Нижнекамскшина» возможна разработка экспоненциальных моделей рас-

чета УНПЭ. Модели могут быть получены на основе научно-обоснованных методик расчета УНПЭ, например, в виде уравнения $y = a \cdot e^{bx}$, где y — рассчитываемое значение удельного расхода, x — планируемый выпуск продукции, a, b — установленные константы, зависящие от загрузки и сезонов года.

Блок ТЭЦ в моделях планирования

Системы математического моделирования класса RPMS позволяют учитывать не только расход/выработку энерго-ресурсов, вспомогательных

материалов, реагентов на производстве, но также позволяют более детально описывать модели ТЭЦ (тепловая электростанция) и энергоблоков, паровых котельных, которые питают производство. В частности, детальные модели ТЭЦ при решении задачи производственного планирования можно учитывать с помощью математического подхода, описанного ниже. Рассмотрим укрупненную схему блока ТЭЦ (рис. 3).

В схеме ТЭЦ предусмотрен следующий состав оборудования:

- котел, работающий на природном газе/мазуте;
- турбина с промышленным отбором пара и нерегулируемым отбором пара на подогрев питательной воды;
- конденсатор;
- насосная станция для прокачки охлаждающей воды через конденсатор;
- потребитель промышленного пара, возвращающий отработанный пар в виде конденсата;
- подогреватель конденсата, использующий нерегулируемый отбор пара турбины.

Исходными данными для расчета могут быть:

- характеристики котла (зависимость КПД от тепловой мощности и других параметров);
- энергетические характеристики турбоагрегата: зависимость электрической мощности от расхода питающего пара при заданных промышленных отборах тепла и расходах пара в части низкого давления; зависимость нерегулируемого отбора тепла от расхода питающего пара (или выходной электрической мощности);
- фиксированные технологические параметры турбоагрегата: давление и температура пара на входе, давление промышленного отбора, давление на выходе турбины;
- фиксированная температура конденсата;
- температура охлаждающей воды;
- характеристики центробежного насоса (зависимость расхода электроэнергии, напора и КПД от производительности);

Таблица 2. Основные уравнения, описывающие работу котла по выработке пара

Формула уравнения, описывающего физический процесс работы ТЭЦ	Формула уравнения в модели планирования	Название уравнения
$B = \frac{G_0 \cdot (i_n - c_v \cdot T_k) - Q_p}{\eta_k \cdot Q_{ym}}, c_v \approx 1$	$B = k_1 \cdot G_0 - k_2 \cdot Q_p$	Расход условного топлива в котлоагрегате
$G_0 = G_p + G_n + G_k$	$G_0 = G_p + G_n + G_k$	Материальный баланс пара турбины
$K \cdot N = G_n \cdot (i_n - i_{отб})\eta_g + G_k \cdot (i_n - i_k)\eta_g$	$N = k_3 \cdot G_n + k_4 \cdot G_k$	Мощность турбогенератора
$Q_n = G_n \cdot (i_{отб} - c_v \cdot T_k)$	$Q_n = k_5 \cdot G_n$	Отпуск промышленного тепла
$G_v = \frac{i_k - c_v \cdot T_k}{c_v \cdot T_k - c_v \cdot T_{охл}} \cdot G_k$	$G_v = m \cdot G_k$	Расход охлаждающей воды

Здесь B — весовой расход условного топлива; G_0, i_n — весовой расход и энтальпия пара, вырабатываемого котлом; G_p — весовой расход пара на регенеративный подогрев конденсата; c_v — теплоемкость воды; T_k — температура конденсата; Q_p — расход тепла, для регенеративного подогрева конденсата (нерегулируемый отбор тепла в частях высокого и низкого давления турбины); η_k — КПД котла брутто (определяется по характеристике котла при заданной тепловой нагрузке); K — коэффициент перевода тепла в электроэнергию (860 кКал/кВт · ч); N — мощность на шинах генератора; η_g — КПД электрического генератора; Q_n — количество отпускаемого потребителю тепла; $G_n, i_{отб}$ — весовой расход и энтальпия пара промышленного отбора; G_k, i_k — весовой расход и энтальпия пара на входе в конденсатор; $G_v, T_{охл}$ — весовой расход и температура охлаждающей воды; k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 — постоянные коэффициенты, которые могут быть пересчитаны в процессе рекурсии в зависимости от переменных модели; m — кратность охлаждения, может быть пересчитана в процессе рекурсии.

- теплотворная способность условного топлива ($Q_{ym} = 7000$ кКал/кг);
- цены на покупаемое топливо, вырабатываемую электроэнергию и промышленное тепло.

Примеры технологических и экономических ограничений в моделях планирования:

- максимальные производительности котлоагрегата по теплу и турбоагрегата по входному пару;
- максимальный промышленный отбор тепла;
- минимальная производительность по пару части низкого давления турбины;
- максимальная производительность насосной станции по охлаждающей воде.
- ограничения и цены на покупку природного газа и мазута;
- ограничения и цены на продажу электроэнергии и промышленного тепла.

Постановка задачи может быть ориентирована на экономические расчеты: определить искомые параметры работы ТЭЦ, чтобы обеспечить максимум валовой прибыли на производстве при заданных технологических и экономических ограничениях. Результаты решения моделей с использованием подобных подмоделей ТЭЦ позволят определить такие производственные показатели работы ТЭЦ, как: продажа/производство электроэнергии, теплоэнергии; загрузка котла; расход природного газа, мазута, охлаждающей воды и т.д. В табл. 2 приведены примеры основных уравнений, описывающих работу котла по выработке пара, в оптимизационных моделях планирования в виде задачи (1–2).

Использование моделей планирования с детальными подмоделями ТЭЦ позволит более корректно рассчитать оптимальное количество вырабатываемой

энергии, что актуально для производств, у которых не хватает собственных мощностей, например, по выработке пара и им нужно определить количество для закупки со стороны.

Заключение

В нефтегазоперерабатывающей отрасли РФ последние 20 лет широко используются LP-модели для целей оптимального производственного планирования. Непосредственное применение возможностей LP-моделей в энергоменеджменте позволяет получить оценки эффективности мероприятий, направленных на повышение энергоэффективности предприятий, и тем самым выставить приоритеты в их реализации. Выделим наиболее актуальные мероприятия.

Увеличение глубины переработки нефти за счет применения современных технологических процессов. При этом ввод в эксплуатацию новых технологий, очевидно, положительно скажется и на экологической ситуации в мегаполисах [3].

Использование LP-моделей планирования с детальными подмоделями ТЭЦ, паровых котельных, энергоблоков позволяет точнее рассчитать расход заводского топлива на нужды ТЭЦ, собственную выработку пара и электроэнергии, минимизировать покупку энергоресурсов со стороны (топливо, пар, электроэнергия).

Разработка корректных моделей удельных норм потребления энергоресурсов для детализированных подмоделей технологических процессов, потребляющих/вырабатывающих энергоресурсы, обеспечивает более точное планирование расхода энергоресурсов. Этот подход может быть расширен на дискретные

производства массового характера типа производство шин [5, 6], резинотехнических изделий и т. п.

Использование в промышленности и, в частности, на НПЗ/НХК/ГПЗ, возобновляемых источников энергии, которые принято условно разделять на две группы:

- *традиционные*: гидравлическая энергия, преобразуемая в используемый вид энергии ГЭС мощностью более 30 МВт; геотермальная энергия;

- *нетрадиционные*: солнечная, ветровая, энергия морских волн, течений, приливов и океана, гидравлическая энергия, преобразуемая в используемый вид энергии малыми и микро-ГЭС, энергия биомассы, не используемая для получения тепла традиционными методами, низко потенциальная тепловая энергия и другие новые виды возобновляемой энергии.

Переработка отходов производства. Сегодня существуют технологии, позволяющие не только экологически безопасно переработать отходы, но и получить ликвидную продукцию — электрическую и тепловую энергию, другие виды товарных продуктов.

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),

Боронин Андрей Борисович — канд. техн. наук, старший консультант отдела систем

планирования производства, снабжения и сбыта,

Бородин Павел Евгеньевич — начальник отдела систем оперативного управления производством АО «Хоневелл».

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

ПОВЫШЕНИЕ ОПЕРАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И БЕНЧМАРКИНГ РОССИЙСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СЕКТОРА (НА ПРИМЕРЕ НПЗ)

Т. Еллерингтон, П. Пауэр (Solomon Associates), Ю.Р. Шишорин (АО «Хоневелл»),

Т.С. Аксенова (ООО «Центр цифровых технологий»)

Рассматриваются бенчмаркинг¹ исследования российских предприятий топливно-энергетического сектора (на примере НПЗ) как первый шаг на пути к совершенному производству, проводимые компанией Solomon Associates с использованием ее запатентованной методологии Comparative Performance AnalysisTM – (CPATM, исследование Solomon). Показывается активная роль и место АО «Хоневелл» и ООО «Центр цифровых технологий» в поддержке и проведении бенчмаркингTM исследований для российских клиентов.

Ключевые слова: показатели конкурентоспособности и эффективности, показатель энергоёмкости, эксплуатационная готовность, индекс эффективности ремонтных затрат, топливное производство, консалтинг, совершенствование производственных показателей, надёжность и ремонты, бенчмаркингTM исследования.

Введение

Вот уже свыше двух десятилетий предприятия российского топливно-энергетического и нефтехимического комплексов (нефтеперерабатывающая, газоперерабатывающая и нефтехимическая отрасли) при поддержке АО «Хоневелл» используют эталонные показатели Solomon для улучшения своей работы. С ростом числа участников появилась возможность существенно оценить улучшения в их работе, сделать эти улучшения существенными и устойчивыми [1].

Solomon проводит бенчмаркингTM анализ показателей всей производственно-сбытовой цепочки в нефтегазовой отрасли: от разведки и добычи сырья, до логистики, переработки и сбыта сырья и продуктов. За более чем 35 лет проведения исследований Solomon накопил и располагает данными о тенденциях изменений, так как более 95% компаний *регулярно* участвуют в исследованиях. БенчмаркингTM исследование видов топлива проводится на двухгодичной основе, и очередное исследование пройдет

¹ Бенчмаркинг (benchmarking) – конкурентный анализ эффективности работы путем сравнения с лидерами отрасли. Компания Solomon имеет свою запатентованную методологию проведения бенчмаркинга для нефтепереработки: CPATM Fuels and Lube Studies [1] (аббревиатура от Comparative Performance AnalysisTM – Сравнительный анализ эффективности нефтеперерабатывающих производств топлив и базовых масел).