



ОПТИМИЗАЦИОННОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА: ИСТОРИЯ, ПРОДВИЖЕНИЕ В РОССИИ, ЗАМЕЩЕНИЕ МИРОВЫХ ВЕНДОРОВ

Л.Р. Соркин, А.С. Хохлов (РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина), Е.С. Баулин (МФТИ),
А.А. Аносов, В.М. Дозорцев, Д.В. Агафонов (Группа Рубитех)

Прослеживается история возникновения, становления и развития систем оптимизационного планирования производств химико-технологического типа, включая их появление в конце 1950-х гг., проникновение в Россию в начале 1990-х и уход мировых вендоров с российского рынка в 2020-х. Анализируются актуальные тренды эволюции систем планирования и сложности замещения западных решений российскими.

Ключевые слова: производственное планирование, линейное программирование, LP-оптимизация, гибридное моделирование, импортозамещение, нефтепереработка, нефтехимия.

ВВЕДЕНИЕ

Начиная с середины XX века линейное программирование (LP) стало ключевым инструментом оптимизации процессов нефтепереработки, включая системы оптимизационного производственного планирования (APS, Advanced Planning & Scheduling), обеспечивающие построение производственного плана в рамках предприятия на разных горизонтах – текущих (от месяца до года) и стратегических (от года и выше). Эти системы позволяют компаниям максимизировать прибыль, оптимизировать сырьевые потоки и ассортимент товарной продукции. Эффект только от оптимизации текущих планов оценивается примерно в 2 долл. США на тонну сырой нефти [1], что в масштабах всей нефтеперерабатывающей отрасли России дает до 550 млн. долл. США в год.

Для многих современных пользователей APS – сложившееся мощное решение, без которого невозможно реализовать важные бизнес-процессы предприятия. Но история рассматриваемого направления промышленной автоматизации крайне насыщена, разнообразна и неожиданно поучительна. Последнее особенно актуально в современных российских реалиях, когда мировые вендоры перестали поддерживать установленные на рынке системы, и замещение их отечественными решениями стало жизненно важным.

Авторы настоящей работы предприняли попытку проанализировать историю производственного планирования на фоне жизненного и профессионального пути пионеров этого направления – Джо Ф. Мура (Joe F. Moore, 1929-2021), многолетнего генерального директора компании Bonner & Moore (B&M) и его институтского товарища и близкого друга Джона Боннера (John S. Bonner, 1927-2015). Именно B&M вывела на рынок первое современное решение по оптимизационному производственному планированию (систему RPMS); во многом судьба основателей компании символизирует возникновение, развитие и расцвет систем оптимизационного планирования как для отдельных предприятий нефтяной отрасли, так и для их объединений. Джо Мур любил повторять следующую, тогда революционную мысль: «мы продавали клиентам не ПО; мы продавали им прибыль». Что особенно важно, ему довелось активно участвовать в распространении этих систем в России. Некоторые из авторов на этом этапе сотрудничали с ним и с компанией B&M, участвовали в дальнейшем развитии системы RPMS. Именно 30-летний опыт участия российской команды в создании и развитии мировых систем класса APS позволил ей в сжатые сроки разработать отечественную систему производственного планирования СМ-Производство (СМПР).

К счастью (редкое исключение для профессионального сообщества тех времен), Джо Мур оставил прекрасный

текст с принципиальным названием «Создание прибыли с помощью компьютеров <...>» [2]. Разумеется, изложение ограничено периодом до ухода Мура от дел на рубеже веков. Авторы настоящей статьи проследят хронику разработки коммерческих APS-решений до текущего момента, выделяют основные проблемы промышленного внедрения систем оптимизационного планирования, остановятся на современных трендах производственного планирования, подробней рассмотрят историю разработок в России и проблемы импортозамещения решений мировых вендоров.

НАЧАЛО ПУТИ

В 1952 г. 23-х летний выпускник Массачусетского технологического института (MIT) сознательно предпочел академической карьере «живую» работу на НПЗ в Техасе. В те годы компьютеры только-только вырвались за пределы военных и атомных проектов, чем в числе первых воспользовались американские нефтяные компании, такие как Standard Oil и Esso (в будущем Exxon/Mobil).

Мур так характеризует обстановку на НПЗ тех лет: никто не озабочен рентабельностью (нефтяная компания покупала продукцию завода по эксплуатационной стоимости плюс оговоренная доходность); множество сотрудников с университетскими степенями; подход к проектам как к исследованиям; культ специалистов, не только знающих технологии, но и владеющих компьютерами. Парадоксальным образом это напоминало атмосферу советских академических институтов, и неудивительно, что первая мирового уровня система оптимизационного планирования пришла в Россию именно через академическую организацию (ИПУ РАН).

Заметим, что доступные на вторую половину 50-х годов XX века компьютеры – это вычислительные машины с программой на перфокартах, или так называемые электронные калькуляторы, закупавшиеся преимущественно для бухгалтерских целей. Чуть позже на НПЗ появились первые компьютеры IBM 650 и 705, сделавшие возможным инженерно-экономический анализ и технологические исследования.

Первой оптимизационной задачей в нефтепереработке стала порученная Муру программа расчета производственных операций на предприятиях по производству масел. Оказалось, что довольно понятная ручная процедура не преобразовывалась напрямую в компьютерную программу. Длинные циклы рекурсии превышали ограниченную память компьютера, а многочисленные исходные данные (параметры сырья, продуктов, состояний резервуаров) при переходе на новый операционный план необходимо было вводить вручную. Все это делало подобное программное обеспечение (ПО) малоприменимым для практического использования.

¹ <https://www.haverly.com/>

² Пожалуй, сейчас это можно сравнить с инвестициями корпорации NVIDIA в генеративный ИИ, требующий колоссальной вычислительной базы. Только масштаб инвестиций принципиально другой – так, капитализация NVIDIA превышает ВВП Великобритании (4 трлн. против 3 трлн. долл. США).

РОЖДЕНИЕ BONNER & MOORE

Стартовый программистский опыт не слишком вдохновил Мура, которому все интересней были технология и экономика нефтепереработки, что впоследствии превратило его в одного из ведущих отраслевых экспертов. А Джон Боннер, наоборот, был в восторге от быстро прогрессирующих компьютеров и достиг впечатляющих успехов в моделировании дистилляционных процессов. Уверовав в светлое будущее компьютерного инжиниринга, одноклассники решили выйти в самостоятельное плавание, вложив в компанию V&M по 2,5 тыс. долл. США (сегодня это порядка 30 тыс.).

Важное свидетельство Мура – тесные неформальные связи в нарождающемся компьютерном сообществе тех лет; специализация и определенное отчуждение проявились позже. В этом «бурлящем котле» постоянно пересекались сотрудники нефтяных компаний, специалисты консалтинговых фирм, университетские исследователи. Например, Clarence (Larry) Haverly, основавший в 1962 г. компанию Haverly Systems Inc.¹ (где позже родилось одно из известных APS-решений GRTMPS), как раз в те годы работал в компании Esso Petroleum, с которой активно сотрудничал Мур. Неудивительно, что обмен идеями повлиял на схожесть появившихся позднее решений по производственному планированию.

Важный для V&M контакт того периода – прикладной отдел компании IBM, нанимавший специалистов с промышленным опытом и знанием компьютеров. Отдел реализовывал стратегию IBM по продвижению продаж компьютерной техники у существующих и потенциальных клиентов в гражданских отраслях промышленности². Компания V&M, нанятая IBM, а позже и другими производителями оборудования, консультировала промышленные предприятия нефтяной отрасли по всему миру на предмет использования компьютеров в решении производственных проблем. Но это не принесло быстрых проектов; стартовый капитал V&M быстро истощался. И тогда случилось чудо.

У вычислительного центра Хьюстонского университета был контракт на разработку программы планирования одного НПЗ на Восточном побережье. После старта проекта (в начале 1957 г.) сотрудники Центра осознали, что не знают даже, что конкретно должна делать такая программа. Проект передали V&M; Боннер за пару дней адаптировал собственную программу из библиотеки IBM 650 под конкретную задачу, а весь проект был завершен за 7 мес. Он не принес прибыли, но сместил фокус компании с инжинирингового консалтинга (спрос на который падал) на оперативные коммерческие приложения, повышающие прибыль клиентов.

Информанты из Standard Oil держали V&M в курсе загадочной на тот момент темы линейного программирования. С середины 50-х гг. в этой нефтяной компании

работали над использованием ЛР для расчета состава наиболее выгодных смесей мазута, а затем и бензина; была создана программа для IBM 705, использующая для этого симплекс-метод.

Краткая история линейного программирования в нефтепереработке (ранний этап) [3]:

- 1939 г.: вышла брошюра будущего академика Л.В. Канторовича — «Математические методы организации и планирования производства» [4], заложившая основы использования ЛР в экономике. Она была переведена и стала известна в мире значительно позже;
- 1942 г.: американский экономист и математик Т.Ч. Купманс решает задачу оптимального распределения ограниченных ресурсов между конкурирующими потребителями (в интересах военных поставок США союзникам в Европе) [5] — первый практический пример применения ЛР к многомерной задаче оптимизации;
- 1947 г.: американский математик Д. Б. Данциг (на тот момент сотрудник ВВС США) разрабатывает симплекс-метод [6]. Он также считается основоположником линейного программирования, наряду с Канторовичем и Купмансом, ставшими в 1975 г. лауреатами Нобелевской премии по экономике «за вклад в теорию оптимального распределения ресурсов»;
- 1950-е: первые попытки применения ЛР в нефтепереработке для оптимизации смешения нефтепродуктов и выбора сырья.

НЕОБХОДИМОЕ ОТСТУПЛЕНИЕ: ЛР-ОПТИМИЗАЦИЯ И ЕЕ СПЕЦИФИКА В ЗАДАЧАХ ПЛАНИРОВАНИЯ НПЗ/НХК

На заре компьютерного оптимизационного планирования на НПЗ задача решалась в классической ЛР-постановке. Но позже, когда был достигнут практический прогресс в решении задачи в нелинейной постановке с применением методов последовательного линейного программирования (ПЛП), модельеры по всему миру на заводах, в управляющих и консалтинговых компаниях продолжали использовать сленговый термин «ЛР-модель». И по сей день в международных специализированных журналах и на конференциях под этим термином подразумевают оптимизационную задачу общего вида [7]:

$$\begin{aligned} \max F(x, c(x)), \\ g_1(x, a(x)) = 0, \\ \underline{b} \leq g_2(x, a(x)) \leq \bar{b}. \end{aligned}$$

Здесь x — вектор переменных, например, объем перерабатываемого углеводородного сырья и производимой продукции, расходы и качественные показатели входных/выходных потоков технологических установок. Часть переменных x может принимать только целочисленные значения, что обусловлено логическими ограничениями производства;

c — вектор цен за единицу приобретаемого сырья, продаваемой продукции, закупаемых энергоресурсов

и вспомогательных материалов, и др. В общем случае цены являются функциями переменных x . Например, стоимость тонны мазута зависит от размера, вязкости и плотности реализуемой партии;

g_1 — множество ограничений, определяющих производственные взаимосвязи — балансы материальных потоков и энергоресурсов, др.;

g_2 — множество ограничений, описывающих спецификации на качество товарной продукции, мощности технологических установок в различных режимах, пропускные способности эстакад налива и т.д. Ограничения g_1, g_2 в общем случае формируют невыпуклое множество;

a — вектор коэффициентов ограничений g_1, g_2 , в общем виде описывающих структуру производства на основе логистического распределения потоков, данных из лаборатории, отделов главного технолога и главного энергетика, экономического отдела, пр. Коэффициенты a могут быть постоянными величинами или функциями от переменных x . Наиболее частая причина, обуславливающая изменения значений коэффициентов a — колебания качества сырья, полуфабрикатов, поступающих на технологические установки, вызывающие дальнейшее изменение долей и качества отборов продукции;

F — целевая функция оптимизации в форме маржинальной прибыли производства.

Типичная размерность вектора переменных x для среднего НПЗ с мощностью переработки 10 млн. тонн нефти в год достигает нескольких десятков тысяч.

Перечисленные выше особенности задачи планирования определяют её вычислительную сложность, которую на практике преодолевают методом ПЛП в сочетании с эвристиками.

Все разработчики ЛР-систем опираются на принципиально одинаковые подходы и сталкиваются со схожими проблемами — длительное время поиска решения и риск получения локальных оптимумов. Для решения этих проблем важнейшее значение имеют знания и опыт модельера, который не только должен обладать глубокими знаниями возможностей системы, но также хорошо понимать производство, его экономику и может предугадать, как изменения параметров и структуры модели (например, начальные оценки качества потоков) могут повлиять на процесс и результаты решения.

BONNER & MOORE: ПЕРВЫЕ 10 ЛЕТ

Исторически НПЗ планировались по частям, но основатели В&М не верили в целесообразность такого подхода из-за сильной экономической связности этих частей. Идею ЛР-оптимизации всего завода они обсуждали ежедневно — по часу в дороге из дома в офис. Разница в мышлении (Боннер шел от абстрактно-формального к конкретно-экономическому, Мур — в обратном направлении) оказалась весьма плодотворной. За несколько недель удалось выработать принципы моделирования основных установок нефтепереработки в формализме линейной алгебры и в форме, удобной для ЛР. Была решена

принципиальная проблема: создан автоматизированный способ построения LP-матрицы (логическая схема символического присвоения имен строкам и столбцам матрицы). Названный «Генератором ограничений», способ стал прообразом будущих обобщенных матричных генераторов GAMMA [8].

В 1958 г. заводов в США было намного больше, чем сегодня: порядка 200 (из них 50 крупных, принадлежащих большим нефтяным компаниям). Крупные предприятия работали на процессинге и не были заинтересованы в повышении эффективности. Остальные были меньше и проще и принадлежали независимым компаниям, стремившимся повысить прибыльность нефтепереработки. Такие заводы и стали рыночной целью V&M. LP-моделирование давало таким предприятиям требуемый для этого инструмент, поскольку снижало «отдачу качества», то есть производство бензина и других товарных продуктов более высокого качества, чем того требуют коммерческие спецификации. Месседж потенциальному покупателю был простой: мы разработаем математическое представление вашего завода, покажем, как можно оптимизировать его работу с помощью компьютеров, обучим персонал использованию этой техники и экономическому анализу, необходимому для понимания результатов оптимизации.

В течение нескольких следующих лет V&M реализовывала по восемь-десять LP-проектов в год. Цена этих первых LP-систем зависела от размера завода, а ПО, как правило, продавалось вместе с учебным курсом построения моделей. За последующий 20-летний период LP-проекты были выполнены на множестве НПЗ по всему миру. В конечном итоге клиентами V&M стали как крупные нефтяные компании, так и независимые предприниматели. Этот успех помог V&M привлечь новых профессионалов, часто бывших коллег из нефтяных компаний.

Наряду с RPMS появлялись и другие программные продукты схожей функциональности. На протяжении многих лет Джо Мур слышал от руководителей других фирм-разработчиков, что те были пионерами в разработке коммерческого программного обеспечения для LP-планирования. Однако их продукты появились уже после того, как RPMS вышла на рынок и прошла ряд коммерческих внедрений.

Конкуренция 1960-х

В начале 60-х у V&M был только один сильный конкурент — RAND Corp. С целью сохранить своего ведущего эксперта Джорджа Данцига RAND предложила заводам Западного побережья разработать систему производственного планирования. Однако, взявшись за проект, Данциг столкнулся с проблемой — он все знал про LP, но совсем не понимал технологию и экономику нефтепереработки, что не позволило ему критически оценивать представляемые в проекте данные и предположения³. Несмотря на рекламу, проект RAND не принес существенной

пользы, но в ходе его реализации впервые был разработан LP-код, ориентированный на обработку больших матриц и пригодный к использованию на мэйнфреймах.

Клиентам требовались все более мощные модели, отражавшие многочисленные и сложные физико-химические и экономические взаимодействия производства. V&M последовательно дорабатывал свой LP-код по мере появления все более мощных компьютеров, переведя его на Фортран, обеспечив этим независимость от аппаратной платформы мэйнфреймов и скорость, сравнимую с ассемблером под конкретное аппаратное решение.

Позже RAND ушла из коммерческого LP-консалтинга, а несколько ключевых специалистов перешли от конкурентов к V&M. Все это подчеркивает как сложность и нестабильность LP-бизнеса, так и постоянный переток узкого круга специалистов из одной фирмы в другую.

В 1961 г. в V&M были разработаны несколько нелинейных моделей НПЗ. Нелинейность определяется, прежде всего, сложной зависимостью эффективности работы установки от производительности, а поскольку производительность НПЗ — это оптимизируемая переменная LP-задачи, то приходится прибегать к рекурсии, то есть пересчитывать LP-задачу, пока полученная оптимальная производительность не совпадет с заложенной в текущий расчет. Такой подход хотя и приводил к большей гибкости модели и получению дополнительной прибыли, требовал существенных усилий по доработке модели и повышал необходимый уровень квалификации специалистов, работавших с моделью. Сейчас метод последовательного линейного программирования — основа любого APS-решения, а тогда найти клиента, готового вложиться в такой подход, было непросто — для этого промышленности нужны были успешные практические внедрения.

К тому же времени относится первый серьезный интерес к теме со стороны крупных компаний-подрядчиков, стремившихся получить преимущества за счет LP-оптимизации на этапе конструирования и строительства новых заводов. Так, Мур выполнил пять успешных проектов для корпорации Bechtel⁴. В них впервые использовался новый обобщенный матричный генератор GAMMA III, существенно сокращающий сроки разработки моделей планирования и ставший на продолжительное время коммерчески успешным отраслевым стандартом.

V&M применила LP-оптимизацию и в отраслевых исследованиях, учитывающих географию, размеры и сложность заводов. Позже, в конце 70-х, эти результаты использовались даже для защиты нескольких нефтяных компаний-клиентов V&M в антимонопольных разбирательствах. Расширение и диверсификация бизнеса привели к выделению «софтового» подразделения V&M Computing Company (VMCC) для разработки программного обеспечения и поставки вычислительной техники.

Рынок оптимизационного планирования претерпевал постоянные изменения и — за пределами

³ Это, кстати, много позже, в 1975 г. помешало Данцигу стать Нобелевским лауреатом по экономике. Как блестящий математик он был удостоен высших наград в этой области; помимо прочего Данциг стал первым лауреатом Теоретической премии фон Неймана, получил Национальную научную медаль США. Но Альфред Нобель, как известно, решил на присуждать премию математикам.

⁴ Отметим, что широко распространённая теперь система оптимизационного планирования Aspen PIMS была разработана именно в Bechtel.

рассматриваемого Муром периода – «сошелся» к представленному ниже состоянию.

Хроника развития коммерческих LP-систем

RPMS (Refinery and Petrochemical Modeling System) [2]

- 1965 г.: Bonner & Moore выпускает RPMS – первую коммерческую LP-систему для нефтепереработки.
- Использовалась для оптимизации загрузки установок, выбора сырья и планирования производства.
- В конце 90-х продан корпорации Honeywell; дальнейшее развитие сосредоточилось в ее московском офисе.
- В начале 2020-х проект закрыт. В своем бизнесе Honeywell начала предлагать ПО *PrincersLP*⁵ своего партнера компании *Princers* (Франция).

PIMS (Process Industry Modeling System)⁶

- 1980-е: Bechtel разрабатывает систему PIMS, которая позже была приобретена AspenTech (1997).
- Меняет ситуацию на рынке – уход от мэйнфреймов, разработана под PC.

• Позволяла комбинировать линейное и нелинейное программирование для более точного моделирования.

GRTMPS (Haverly Systems)⁷

- 1980-е: GRTMPS – система, ориентированная на мультизаводское планирование и логистику.

Spiral USC (Unified Supply Chain)⁸

- В 2012 г. Invensys купил компанию *Spiral Software* (Кембридж, основана в 1998) с ее решением *Spiral VPO (Virtual Plant Optimization)*.
- *Spiral VPO* решал спектр задач – от анализа состава сырой нефти до оптимизации цепей поставок с целью оптимизации объемов переработки и продаж.
- Впоследствии (на сегодня уже в составе AVEVA как части *Schneider Electric*) *Spiral VPO* был интегрирован в решение AVEVA *Spiral USC*, обеспечивающее сбор и обработку данных о сырье, планирование и управление процессами переработки. Вместе с системой точного технологического моделирования *SimSci-Esscor* это решение позволяет повысить эффективность всей цепочки создания стоимости – от закупки сырой нефти до снабжения и дистрибуции.

BONNER & MOORE: RPMS И 8 ЛЕТ В КОРПОРАЦИИ FLUOR

В целом первые 10 лет истории V&M – коммерческий успех: доходы компании и в Северной Америке, и в Европе удовлетворительно росли. Самый важный актив, система RPMS (Refinery and Petrochemical Modeling System), первый релиз которой появился в 1965 г., позволяла автоматизированное построение LP-матрицы

и учитывала нелинейность задачи оптимизации. Первая поставка произошла в исследовательское подразделение Техасо. Далее последовал ряд других внедрений, что через начальные платежи и регулярные роялти обеспечивало стабильный и растущий доход.

Но к концу 60-х ситуация стала меняться. IBM анонсировала переход на платформу System/360 и приступила к разработке ультрасовременной LP-системы. V&M начала доработку своего ПО, включая новую версию матричного генератора GAMMA III. К сожалению, эту задачу программисты V&M не смогли решить в рамках имеющегося бюджета. Весной 1968 г., когда угроза банкротства стала реальной, от корпорации Fluor, стремившейся стать лидером в использовании компьютерных решений для строительства, поступило хорошее предложение о покупке. Оно было принято, и следующие восемь лет V&M оставалась в составе Fluor. Сделка позволила V&M избежать банкротства, но имела ряд негативных последствий.

• **Реакция клиентов.** В результате слияния V&M потеряла часть бизнеса, связанную с другими инженерно-строительными подрядчиками; некоторые нефтяные и химические компании опасались делиться конфиденциальной информацией, а другие сомневались в объективности контрактора, связанного с Fluor.

• **Экономический климат.** В конце 60-х экономический кризис настиг и строительную отрасль. Во Fluor начались увольнения, и за работы, изначально предназначенные для V&M, начали конкурировать собственные инженеринговые подразделения Fluor; разумеется, они оказались влиятельнее. Позже, после взлета цен, спровоцированного ОПЕК, Fluor получила многомиллиардные контракты, и на этом фоне V&M со своими бюджетами вообще перестала быть заметной.

• **Корпоративная культура.** Более чем через полвека после образования Fluor Дж. С. Флуором компанией все еще руководили его прямые наследники, и у наемного менеджмента было принято добиваться расположения членов семьи. Как и у других новичков, у V&M не было шансов в этой игре.

В итоге Fluor так и не поняла, как работать с таким нетипичным для нее и скромным по объему бизнесом. Это, увы, нередкая история – многие похожие поглощения заканчивались печально, но в рассматриваемом случае, к счастью, обратный выкуп произошел по выгодной для V&M цене.

Несмотря на описанные выше сложности, эти годы позволили V&M сохраниться и вновь вернуться на рынок самостоятельным игроком. Этот опыт небезынтересен не только исторически, но и для выстраивания стратегии замещения подобного бизнеса в российских условиях.

⁵ <https://www.princers.com/operations-planning/refinery/refinery-planning/>

⁶ <https://www.aspentech.com/en/products/msc/aspens-unified-pims;>

https://www.reddit.com/r/ChemicalEngineering/comments/sxxkpa/what_is_the_function_of_aspen_pims

⁷ <https://www.haverly.com/grtmps>

⁸ <https://avtprom.ru/news/2012/10/17/invensys-operations-mana?ysclid=mcna8yfusa358775430;>

Invensys Releases Integrated Spiral Crude Assay Management With SimSci Design And Optimization Software

BONNER & MOORE: ПОСЛЕДНИЙ ВЗЛЕТ И БИЗНЕС В РОССИИ

Компания V&M вновь стала независимой в благоприятных обстоятельствах — у нее появился мощный IBM 360 (в составе Fluog команде удалось завершить адаптацию кода под новую платформу); вернулись многие старые клиенты, а годы дисциплины в большой корпорации привили Муру строгую ориентацию на прибыльность. В течение нескольких следующих лет появились проекты по добыче нефти на шельфе, бизнес продолжал диверсифицироваться и географически расширяться (к европейскому добавился офис в Саудовской Аравии, 1978 г.).

В самом начале 90-х в Хьюстонский офис пришел факс из входящего в состав АН СССР Института проблем управления (ИПУ) в Москве с предложением наладить с V&M деловые отношения. В Институте много лет велись работы по оптимальному управлению непрерывными производствами; многие разработки успешно внедрялись на советских НПЗ⁹. Вообще, идеи линейного программирования были широко востребованы в СССР, как минимум, с начала 70-х гг. Активно работал один из родоначальников мировой LP-оптимизации и нобелиат акад. Л.В. Канторович [12], была переведена и напечатана большим тиражом книга Дж. Данцига [6], в ведущих вузах читался подробный курс линейного программирования [13], вышла и до сих пор не потерявшая актуальности монография по оптимизации непрерывных производств [9].

Однако Россия получила в наследство от СССР плановую экономику. Традиционно Министерство нефтяной промышленности направляло на НПЗ конкретную нефть и по содержанию в ней светлых нефтепродуктов (выход фракций до 350 °С) формировала планы заводов на год. Такой подход ограничивал возможности оптимизации, часто сводя ее к расчету балансов по всему НПЗ с последующей оптимизацией смешения производимых топлив. Наступавшие новые экономические условия требовали изменения установившихся форм хозяйствования, и положительная реакция на факс из Москвы открывал для этого большие возможности.

Ведущий сотрудник европейского представительства компании Дэвид Адамс быстро установил контакт с Москвой. Уже осенью 1991 г. V&M и ИПУ создали Совместное предприятие «Петроком». Российские проекты предполагали создание LP-моделей НПЗ и обучение сотрудников заводов экономическому анализу. Разработки велись в европейском офисе, но специалисты Петрокома, опираясь на уже имевшийся опыт и налаженные связи с НПЗ, оперативно подключились к работам.

За первым проектом на Московском НПЗ, последовало еще порядка 15 проектов. Сотрудники V&M посетили города, о которых никто из них никогда не слышал, а путешествия проходили в стиле, заметно отли-

чающемся от того, к чему они привыкли. Сам Мур побывал в Уфе, Нижнекамске, Омске, Перми и, конечно, в Москве. Специалисты на заводах активно включились в эту высокотехнологичную деятельность. Руководители плановых отделов Московского и Пермского НПЗ, разглядев огромный потенциал оптимизационного планирования, приложили огромные усилия к скорейшему внедрению системы, что обеспечило предприятиям многомиллионные эффекты. Со временем эти специалисты стали высокоуровневыми экспертами в использовании LP-систем на заводах и в компаниях. Россия не была исключением — по всему миру именно глубокое вовлечение менеджмента и предметных специалистов заказчика было важнейшим условием успеха проекта.

С начала 90-х в России начали создаваться вертикально-интегрированные нефтяные компании (ВИНК); например, Пермский НПЗ, был объединен с другими заводами, тремя нефтедобывающими компаниями и примерно 40 компаниями по сбыту нефтепродуктов. Образовавшаяся ВИНК "ЛУКОЙЛ" стала крупнейшим частным бизнесом в России, а RPMS стала корпоративной системой планирования ЛУКОЙЛа на последующие 30 лет.

Джо Мур признавался, что годы, проведенные им с российскими клиентами, были одними из самых плодотворных для него, а руководство и специалисты Петрокома показали себя высокоподготовленными, энергичными и принципиальными людьми. В стране, где на тот момент договорное право практически отсутствовало, успех американской компании был во многом обусловлен высоким взаимным доверием партнеров. В Петрокоме хорошо понимали, что распад старой советской и появление новой экономической системы потребует от российской промышленности освоения принципов менеджмента на свободном рынке. Опыт и программное обеспечение V&M стали инициатором таких изменений. Некоторым из авторов настоящего текста выпала удача стать непосредственными участниками этого важного процесса.

Подробнее о российской истории LP-оптимизации читайте ниже.

ФИНАЛ BONNER & MOORE

Известно, насколько сложны разработка ПО и консалтинг в рассматриваемой предметной области. В условиях жесткой конкуренции, необходимости постоянных изменений и расширения никто не застрахован от ошибок. Были они и у V&M. Сыграл свою роль и возраст основоположников — они приближались к семидесяти, а новых абсолютных лидеров в компании не появилось¹⁰.

Дорогостоящая попытка нарастить функциональные возможности RPMS не привела к успеху, хотя компания показывала лучшие результаты за всю историю. Годовой объем продаж приближался к 20 млн. долл. США

⁹ Отметим, в частности, систему T-PLAN для оптимизации планирования НПЗ [9], систему оптимизации структуры выхода топливных дистиллятов [10], систему оптимизации смешения нефтепродуктов [11].

¹⁰ История наукоемкого бизнеса второй половине XX века полна похожих историй. На наших глазах такие гиганты, как IBM или Ericsson, потеряли монополию, а то и закрыли ранее передовой бизнес. Формат статьи не предполагает глубокое исследование этой тенденции, но, возможно, финал V&M в чем-то закономерен.

(для сравнения – в первый год В&М он составлял порядка 300 тыс. в сопоставимых ценах). При этом ВМСС-подразделение росло по 15% в год, а консалтинг вырос до 7 млн. долл. США (на момент присоединения к Fluor было всего 2 млн.). В офисах Северной Америки и в Европе работало около 200 чел.

И все же Совет директоров решил, что продажа компании пойдет на пользу акционерам. Серия сделок прошла в конце 90-х гг. Подразделение ВМСС отошло компании Lason, а продукт RPMS перешел корпорации Honeywell, что определило его историю на следующие 30 лет в России. Возможно, Джо Мур не так хотел бы завершить профессиональную карьеру, но получилось, как получилось.

Что касается системы RPMS, то она оказалась очень успешной – с 1965 до отставки Мура с поста генерального директора в 1996 г. было установлено порядка 150 систем. Основатели В&М прожили долгую и насыщенную жизнь, отдав по полвека развитию компьютерных решений в нефтяной отрасли. Блестящие исследовательские способности Боннера, уникальные знания и визионерство Джо Мура оставили заметный след в истории рассматриваемого направления промышленной автоматизации. Их опыт особенно ценен для нового поколения разработчиков таких систем в России. Обо всем этом ниже.

СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕНДЫ LP-ПЛАНИРОВАНИЯ: ИНТЕГРАЦИЯ С ЦИФРОВЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ (2000-Е – НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ)

К началу 2000-х системы класса LP стали стандартом планирования нефтепереработки в мире; в России этот процесс произошел несколько позже, но вот уже два десятка лет все крупные предприятия не мыслят процесс планирования без применения LP-инструментов.

Коммерческие системы развивались эволюционно, постепенно в обязательный набор моделирования входил учет внедряемых экологических стандартов (Евро 2, 3, 4, 5), переменной энергетики, акцизов и других аспектов, влияющих на экономику предприятия. В то же время за последние 20 лет можно выделить явно проявляющиеся тренды применения и развития LP-систем, остающиеся актуальными и по сей день.

- Использование инженерных технологических моделей (в системах моделирования Hsys, Unisim, ДельтаМод [14]) для генерации векторов, описывающих режимы работы установок для LP-систем, с целью повышения точности подмоделей технологических установок и гибкости моделирования.

- В математический аппарат LP-решений добавляются методы борьбы с проблемой локальных оптимумов, ставшей результатом детализации моделирования и ввода нелинейных зависимостей.

- Большие компании, обладающие несколькими НПЗ, стремятся использовать модели многозаводского планирования, в которых оптимум ищется уже не для отдельных

производств, а для комплекса заводов с учетом их географии и логистики перемещения межзаводских потоков.

- В ответ на запрос расширить планирование до построения графиков/расписаний работы оборудования в непрерывном времени появляются инструменты календарного планирования, требующие специальной методологии внедрения [15]; предпринимаются попытки создать средства глобальной сквозной оптимизации производства [3].

- Прорабатываются методологические подходы к встраиванию LP-оптимизации в интегрированные автоматизированные системы управления предприятием [16], предполагающие унифицированную связь отдельных подзадач на различных уровнях управления. Это позволяет использовать единую систему хранения и передачи данных предприятия для планирования и повысит его оперативность.

- С развитием информационных технологий растет запрос на изменение архитектуры самих LP-систем для создания централизованных решений с возможностью многопользовательской работы, представления исходных данных и результатов в графическом виде, добавления аналитических инструментов.

- Для отечественного рынка на передний план выходят аспекты снижения зависимости от зарубежных санкционных компонентов (уход от западного коммерческого ПО и входящих в него компонентов, переход на российские операционные системы на базе Linux и системы управления базами данных), а также учет требований информационной безопасности с целью защиты корпоративных данных и недопущения вторжений.

Конечно, в наши дни невозможно не упомянуть такой всепроникающий фактор инноваций, как искусственный интеллект (ИИ). И хотя химико-технологические предприятия – не самый выгодный пример внедрения ИИ [17], некоторые интересные тенденции могут быть отмечены и здесь.

- Разумеется, на APS могут быть перенесены многие ИИ-подходы, общие для всех процессов производственного планирования¹¹: оптимизация анализа данных (в том числе, в реальном времени в связке с Интернетом вещей); генерация информации, полезной для принятия решений (в том числе с помощью Больших языковых моделей), и объединение ее с уникальными операционными данными производства; оптимизация рутинных процедур. Это особенно актуально для задач календарного планирования и составления расписаний.

- Как и во всех задачах высокотехнологичной автоматизации производства, в APS-системах ИИ упрощает коммуникацию и принятие решений за счет обработки данных на естественном языке и усиливает меры обеспечения кибербезопасности.

- Собственно в LP-планировании, конкретнее в задаче последовательного линейного программирования, как обсуждалось выше, при наличии существенных нелинейностей и неудачном выборе начальных условий оптимизации возникают риски застревания в локальных

¹¹ <https://www.leewayhertz.com/ai-in-production-planning/>

оптимумах, что приводит к nepoзвoлитeльнoму увеличению времени решения. Известны попытки использования генетических алгоритмов поиска для преодоления указанных трудностей [18].

- Огромное число целочисленных переменных, возникающее при попытке оптимизационного решения задачи календарного планирования, также замедляют или делают невозможным получение оптимума за реалистичное время. Для таких случаев предпринимаются попытки применения алгоритмов формирования производственных цепочек получения конечных изделий, хорошо работающих в планировании дискретных производств [19].

- В системах оптимального смешения сырья и продуктов переработки нелинейные законы смешения аппроксимируются с помощью так называемых индексов смешения и линейных бонусов, коэффициенты которых получаются путем обработки данных реального смешения. Там, где не удается определить значения этих коэффициентов традиционными регрессионными методами, могут применяться инструменты машинного обучения [20].

ПОСЛЕ В&М: РОССИЙСКАЯ ИСТОРИЯ СИСТЕМ ОПТИМИЗАЦИОННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

С 1991 г. российской командой (сначала в Петрокоме, позже в составе российского подразделения корпорации Honeywell) система RPMS была внедрена на большинстве НПЗ России, ряде газовых/нефтехимических заводов, в проектных институтах, а также на зарубежных активах российских компаний в восточной Европе (НПЗ/НХК Болгарии, Румынии и Республики Сербской). RPMS оставалась единственной доступной на отечественном рынке коммерческой системой мирового уровня и занимала лидирующее место в стране, пока в первом десятилетии века в Россию не пришел основной конкурент RPMS – система моделирования PIMS компании AspenTech. Обе системы строились на схожих принципах и мало отличались по функциональным характеристикам. Существенные различия, однако, были в стратегии их продвижения на рынок, а в тот период эффективность системы во многом стала определяться агрессивностью ее рекламы. Изменение собственников RPMS (права на систему перешли в конце 90-х от В&М к Honeywell) также негативно сказалось на темпах развития и поддержки системы. Как и в случае с Fluor тремя десятилетиями ранее, приобретенный LP-бизнес «растворился» в масштабах крупной корпорации, и RPMS стала уступать позиции под мощным маркетинговым давлением PIMS по всему миру. Началась волна миграции с RPMS на PIMS. В России дополнительным фактором такого перехода стал приход зарубежных компаний в управление российскими нефтеперерабатывающими активами. Пример – объединение British Petroleum (BP) с ТНК и внедрение

в ТНК-ВР стандартов планирования, основанных на решениях компании Aspen.

В 2005 г. российская команда Петроком вошла в состав Honeywell¹², продолжив развитие RPMS и поддержку пользователей в рамках международной корпорации. Несмотря на усиление команды разработки, доля RPMS на мировом рынке планирования к этому моменту уже сильно сократилась, а руководство Honeywell концентрировалось на других направлениях бизнеса. Как следствие, подразделения корпорации, отвечавшие за планирование в Европе и США, с 2010-х постепенно сокращались, и в итоге вся экспертиза компании по данному направлению сосредоточилась в московском офисе компании.

Несмотря на усилия российской команды и более-менее стабилизовавшуюся рыночную ситуацию (RPMS продолжала занимать заметные ниши в ряде регионов – РФ, Индия, Южная Америка и др.), в 2020 г. было принято окончательное решение о закрытии направления разработки RPMS в Honeywell и сокращении оставшейся российской команды.

Парадоксальным образом это стало новой точкой развития систем планирования в России. Команда бывших сотрудников Honeywell с более чем 30-летним опытом в этой сфере освободилась от жестких рамок большой корпорации и получила поддержку компании «Центр цифровых технологий» (ЦЦТ), которая являлась в то время одной из научных структур МФТИ [21] и с 2016 г. занималась разработкой собственного решения по оптимизационному планированию СМПР¹³. Объединенная в ЦЦТ и существенно усиленная команда разработчиков ускорила вывод на рынок готового коммерческого продукта.

Система СМПР [22] наследует базовые принципы, заложенные еще в 1960-х годах в В&М и служившие основой для систем RPMS и PIMS. В то же время СМПР обладает расширенными настройками моделирования, более устойчивой процедурой решения, мощным алгоритмом верификации исходных данных, гибкой и детализированной системой отчетности. В отличие от разработок RPMS и PIMS, зародившихся в прошлом тысячелетии, СМПР изначально создавалась на новом технологическом стеке, кроме того, была сделана ставка на использование только импортонезависимых компонентов ПО, что оказалось крайне актуальным в новых геополитических условиях.

Пройдя ряд процедур стендирования и прототипирования у заказчиков и доказав, что является системой мирового уровня, СМПР вызвала интерес у российских нефтеперерабатывающих компаний, взявших курс на импортозамещение ключевых элементов ПО для управления бизнесом. В 2024 г. система получила премию ComNews в специальной номинации «Лучшая система оптимизационного планирования производства в нефтепереработке»¹⁴, а к 2025 г. СМПР уже внедрена и успешно эксплуатируется в двух крупных ВИНК (выполнивших переход с систем RPMS и PIMS), ведутся пилотные проекты в других компаниях.

¹² <https://www.itweek.ru/industrial/article/detail.php?ID=69721>

¹³ <https://mipt-cdt.ru/smpr>

¹⁴ <https://www.cta.ru/news/cta/180484.html?ysclid=mepkgzsanq109630799>

**ВЫВОДЫ: В ЧЕМ СЛОЖНОСТЬ
ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ СИСТЕМ ПЛАНИРОВАНИЯ?**

У всех высокотехнологичных систем промышленной автоматизации свои особенности, определяющие задачу их замещения. Для систем планирования необходимо преодолеть серьезные технические трудности – создать эффективные алгоритмы построения LP-модели, обеспечить надежную сходимости решения частично-целочисленной задачи оптимизации огромной размерности и др. Без реального опыта и высокой квалификации в разнообразных предметных областях (прикладной, математической и программной) разработка отечественной системы планирования в обозримые сроки – иллюзия.

Собрать команду высококвалифицированных специалистов при наличии желания и ресурсов – задача, возможно, выполнимая (хоть и все более непростая в современных реалиях), но этого недостаточно для достижения результата в диктуемые ситуацией жестко ограниченные сроки. Необходимо четкое понимание цели и серьезный опыт в составе высокопрофессиональных команд. Такой опыт есть у ЦЦТ, и он включает в себя не только внедрение и поддержку реальных LP-систем, но и участие в разработке в команде мирового вендора.

Помимо технических трудностей во многих отношениях деликатный процесс замещения сопряжен с организационными и мотивационными проблемами. Несмотря на очевидные риски использования сохранившихся на предприятиях мировых систем, в крупных отечественных ВИНК наблюдается инерционность и неповоротливость в принятии решения по замене ПО для важнейших бизнес-процессов, интеграция между которыми выстраивалась в течение многих лет. У некоторых пользователей еще действуют лицензии на ПО (хотя системы и отключены от поддержки); в других случаях имеются технические возможности обойти лицензионные ограничения. Вряд ли такая политика дальновидна – возвращение мировых вендоров на сегодня трудно представимо. Использование же устаревшего ПО без технической поддержки чревато не только тем, что пользователь не получает доступа к новым разрабатываемым функциям систем, повышающим эффективность и удобство работы, но и подвергает собственную инфраструктуру все более возрастающим рискам с точки зрения информационной безопасности.

Как известно, любые информационные системы сильно зависят от системных компонентов компьютера: операционной системы, Excel и др., версии которых регулярно обновляются и непрерывно дополняются патчами, направленными на защиту обнаруживаемых уязвимостей. Разработчики прикладного ПО направляют существенные усилия на поддержку работоспособности и стабильности их программ с учетом этих изменений. С каждым обновлением системного ПО возрастает риск возникновения проблем в работе систем планирования устаревших версий. Как следствие, наряду с «заморозкой» версий систем планирования приходится «замораживать» и используемые версии Windows и Excel, а значит, подвергать компьютеры, работающие в корпоративной сети

предприятия, угрозам взлома или заражения вирусами. Кроме того, в таком подходе невозможно даже в отдаленной перспективе удовлетворить требования регуляторов по переводу критической инфраструктуры промышленных компаний на отечественные операционные системы и офисные пакеты.

Чрезвычайно важно, чтобы заказчики осознали очевидную и вместе с тем нетривиальную мысль: российские решения принципиально не уступают, а, будучи более современными, по определенным параметрам превосходят мировые аналоги, они могут приносить огромную прибыль предприятию, но при этом не могут быть дешевыми, поскольку их развитие и поддержка требуют колоссальных усилий от команды разработки. Системы планирования – нишевый программный продукт с относительно небольшим количеством внедрений. Полувек опыта показывает, что, пытаясь снизить затраты на этапе приобретения ПО, заказчики, с одной стороны, получают быстрый эффект за счет сэкономленных средств, но стратегически сильно проигрывают, поскольку темпы развития системы и уровень ее поддержки существенно снижаются из-за недостаточного финансирования разработок. Это, в свою очередь, приводит к тому, что компании-пользователи недополучают прибыль, которую могли бы получить за счет появления дополнительных возможностей и удобства работы с системой, своевременному и эффективному решению возникающих технических проблем при эксплуатации. Необходимо, разумеется, чтобы у заказчиков появилось доверие к разработчикам, которое нарабатывается вместе с репутацией и удачными проектами.

Путь первопроходцев из Bonner & Moore по-своему архетипичен: компания создана университетскими выпускниками, родилась в 50-х в эру первых LP-решений и первых ЭВМ, угадала потенциал компьютерной оптимизации, впервые вывела на рынок коммерческую LP-систему, пережила рыночный шторм 60-х, выжила в большой мировой корпорации, вернулась к независимости, первой проникла на огромный российский рынок, прекратила деятельность, но, не предполагая этого, способствовала возникновению российского APS-решения. Удивительно, что история команды ЦЦТ как будто повторяет эту траекторию на новом временном витке и в других обстоятельствах: выходцы из советской академической среды инициировали создание совместного предприятия с V&M, быстро вошли в оптимизационные проекты, внедрили мировую систему планирования на десятках российских предприятий, стали частью мировой технологической корпорации, в ее составе поддерживали и развивали оптимизационные решения, и, наконец, в непредвиденных обстоятельствах ухода западных решений с российского рынка в связке с университетскими исследователями в сжатые сроки предложила рынку полноценное отечественное LP-решение.

Перед российскими разработчиками систем промышленной автоматизации серьезный вызов – замещение продуктов ушедших вендоров должно быть проведено очень оперативно и качественно. От этого зависит

эффективность и, в конечном счете, выживаемость важнейших отраслей промышленности. Понимание истории создания и развития мировых APS-систем крайне важно в нынешний переходный период. В этом контексте авторы надеются, что настоящая работа может оказаться полезной для отраслевого сообщества пользователей, исследователей и разработчиков.

Список литературы

1. *Кувыкин В.И.* Организация автоматизированных систем планирования и материального баланса // Автоматизация в промышленности. 2014. № 8. С. 29-33.
2. *Moore J. F.* Creating profit with computers: my life as CEO of Bonner & Moore Associates // IEEE Annals of the History of Computing. 2003. Vol. 25. No. 3. С. 30-47.
3. *Дозорцев В.М., Баулин Е.С., Аносов А.А., Боронин А.Б.* Сквозная оптимизация производства: реальная возможность или отдаленная перспектива? // Автоматизация в промышленности. 2022. № 3. С. 3-12.
4. *Канторович Л.В.* Математические методы организации и планирования производства. — Л., Изд. ЛГУ. 1939.
5. *Коортанс Т. С.* Exchange ratios between cargoes on various routes. Scientific papers. Berlin: Springer, 1970.
6. *Даницэ Дж.* Линейное программирование, его применение и обобщения. — М., Прогресс. 1966. — 600 с.
7. *Фиакко А., Мак-Кормик Г.* Нелинейное программирование. Методы последовательной безусловной оптимизации. — М., Мир. 1972.
8. *Муртаф Б.* Современное линейное программирование. — М., Мир, 1984. — 224 с.
9. *Дудников Е.Е., Цодиков Ю.М.* Типовые задачи оперативного управления непрерывным производством. — М.: Энергия, 1979. — 272 с.
10. *Хохлов А.С., Калинин А.А., Каминский Э.Ф.* Оптимизация структуры выхода топливных дистиллятов и ее математическая модель // Экономика, организация и управление в нефтехимической промышленности. М., №8. 1984.
11. *Чинакал В.О.* Оптимизация компаундирования котельных топлив с использованием АВМ. — В кн.: Современные проблемы кибернетики. М.: Наука, 1970. С. 321-330.
12. *Канторович Л.В.* Математические методы и методы оптимального планирования. — Новосибирск: Наука, 1966. — 178 с.
13. *Вильямс Н.Н.* Математическое программирование: Учеб. пособие / М-во высш. и сред. спец. образования СССР. Моск. инж.-экон. ин-т им. Серго Орджоникидзе. Кафедра экон. кибернетики. Ч. 3 — М., 1975. — 82 с.
14. *Агафонов Д.В., Дозорцев В.М., Сластенов И.В.* Системы технологического моделирования: исторические примеры и отечественные реалии // Автоматизация в промышленности. 2025. № 4. С. 28-31.
15. *Хохлов А.С., Баулин Е.С., Садриев Д.М.* Методология моделирования нефтехимических комплексов // Автоматизация и информатизация ТЭК. 2025. № 6 (623). С. 5-13.
16. *Савельев М.Ю., Аносов А.А., Баулин Е.С., Городнова М.В.* Построение интегрированных автоматизированных систем управления НПЗ/НХК // Автоматизация в промышленности. 2024. № 6. С. 13-24.
17. *Дозорцев В.М., Аносов А.А., Баулин Е.С. и др.* Искусственный интеллект в задачах управления химико-технологическими процессами // Автоматизация в промышленности. 2024. № 10. С. 3-9.
18. *Ibn Majdoub Hassani, Z., El Barkany, A., Jabri, A. et al.* Hybrid approach for solving the integrated planning and scheduling production problem // Journal of Engineering, Design and Technology. 2020. Vol.18, No.1. 172-189.
19. *Александров В.Р., Баранов С.Е., Кузнецов М.И. и др.* Искусственный интеллект в задачах планирования производства // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2022. Т.5(2). № 2. 196-208.
20. *Kuzhagaliyeva, N., Horváth, S., Williams, J. et al.* Artificial intelligence-driven design of fuel mixtures // Chemical Communications. 2022. Vol.5. 111.
21. *Соркин Л.Р.* Современные технологии управления в нефтегазовом комплексе: Учебное пособие. — М.: МФТИ, 2003. — 104 с.
22. *Дозорцев В.М.* Высокотехнологичные решения в промышленной автоматизации: Возможна ли жизнь без западных производителей? // TADVISER 2024/06/25

Когда авторы заканчивали работу над статьей, пришла печальная весть о кончине огромного энтузиаста и пионера внедрения современных систем планирования в нефтеперерабатывающей промышленности России Дэвида Адамса. Дэвид долгие годы работал в Bonner & Moore, а затем в Hopeuwell. Его неподдельный интерес к российским заказчикам и коллегам, желание с самого начала 90-х помочь в трансформации в условиях рынка бесценны. Память об этом светлом человеке останется в наших сердцах.

Соркин Леонид Рафаилович — д-р техн. наук, консультант,

Хохлов Александр Сергеевич — д-р техн. наук, проф. кафедры автоматизации технологических процессов РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, **Баулин Евгений Сергеевич** — канд. техн. наук, доцент,

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),

Аносов Андрей Александрович — канд. техн. наук, директор по разработке программного обеспечения,

Дозорцев Виктор Михайлович — д-р техн. наук, директор по развитию бизнеса,

Агафонов Дмитрий Витальевич — генеральный директор, ООО «Центр цифровых технологий» (группа Рубитех).