

БИЗНЕС РЕИНЖИНИРИНГ

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ВЕРТИКАЛЬНО- ИНТЕГРИРОВАННЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

Баев В.А., ведущий специалист

ОАО «НК ЛУКОЙЛ»

1. Изменения организационной структуры управления: появление новых хозяйствующих субъектов в нефтяной отрасли России

Организационно управление нефтяной и газовой промышленностью в СССР осуществлялось через систему группы министерств — Министерства геологии СССР, Министерства нефтяной промышленности, Министерства газовой промышленности, Министерства нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности СССР, а также Главного управления по транспорту, хранению и распределению нефти и нефтепродуктов при Совете Министров РСФСР и союзных республик. Большую роль в обеспечении развития отраслей играло Министерство строительства предприятий нефтяной и газовой промышленности. Основными низовыми звеньями в нефтяной и газовой промышленности занимавшихся производственной деятельностью являлись геолого-поисковая контора, нефтегазодобывающее управление, управление буровых работ, нефтеперерабатывающий завод и т.д.

Огромное значение для реализации хозяйственной самостоятельности предприятий имел Закон СССР о государственном предприятии (объединении), который был введен в действие с 1 января 1988г., по которому они становились во многом самостоятельными и ответственными субъектами экономики. Это было первым шагом реформирования централизованной системы хозяйствования. К концу 80-х годов вся практика хозяйствования подводилась к тому, что необходима радикальная перестройка добывающего комплекса, превращение монопродуктовой отрасли в конкурентоспособную отрасль по всему спектру продукции — от сырья до продуктов глубокой переработки и сбыта продукции. В переходный период началась и долгое время продолжалась борьба между самыми различными тенденциями и направлениями развития — от ультралиберальных предложений до схем, предполагающих восстановление прежней относительно более централизованной организационной структуры. Программы экономических реформ затронули, главным образом, вопрос собственности на природные ресурсы и не были основаны на четких экономических принципах, таких как конкуренция и демополизация. Летом 1991г. было достигнуто соглашение о передаче собственности республикам, входившим в состав бывшего СССР. Структура нефтяной промышленности также претерпела упрощение за счет ликвидации территориальных производственных подразделений. Однако,

эти изменения не затронули монополистические интересы местных производственных объединений и самой основы финансовой структуры отрасли. Но даже новшества и реформы, проведенные в 1992-1993гг. (выделение в отдельные концерны ряда крупнейших подразделений Государственного предприятия 'Роснефть', а затем акционирование этих концернов), не были основаны на упорядоченном наборе важнейших принципов рыночной экономики — например, создания конкурентной среды с определенным уровнем государственного регулирования. В конечном счете все вышеперечисленные замечания отражают недостаток твердости и последовательности в проведении политики реформ, в то время как все осуществляемые на практике меры по сути являются лишь попытками видоизменить только отдельные части отраслевой структуры. Это лишь является неупорядоченным процессом преобразования отдельных кусочков и частей государственной по своей сущности отрасли промышленности в новые формы собственности.

Наиболее существенным недостатком централизованной организационной структуры производственно-транспортной системы было наличие огромного административного аппарата вместо одного предприятия, которое заботилось бы в первую очередь о том, как повысить эффективность своей работы для увеличения прибыли. Кроме того, другие виды деятельности, в частности, разведка новых месторождений и переработка, находились под контролем других министерств, имеющих свои собственные управленческие структуры. Координация их работы была затруднена, поскольку отдельные звенья между этими пирамидами управлялись с самого верхнего уровня, в то время как попытки налаживания сотрудничества между различными низшими уровнями всякий раз наталкивались на сопротивление. Даже внутри отдельного министерства в основном решения принимались на самом верху, а затем 'спускались' вниз через всю структуру, что часто приводило к принятию неэффективных решений вследствие недостаточной или несвоевременной информированности высшего руководства о реальных потребностях низших звеньев. С другой стороны, масштабность проблемы также иллюстрируется огромным объемом капиталовложений, которые необходимы для модернизации мощностей производственных, транспортных и нефтеперерабатывающих предприятий. Объем инвестиций, необходимых для ремонта существующих скважин, оценивается в 12 млрд. долларов США (для 32000 скважин), в то время как еще около 10 млрд. долларов США необходимо для повышения нефтеотдачи на уже разрабатываемых месторождениях.

Одним из результатов реформ 1988-1991гг. стало, что нефтедобывающие объединения получили значительную свободу в виде переданных им полномочий союзного Министерства, сохранив в тоже время прерогативы в своих взаимоотношениях с производственными участками, находящимися под их управлением, а также мощную защиту против попыток проникновения 'чужих' на их территорию. Это означает, что основная цель этих 'либерализованных' предприятий — сохранить контроль над своей территорией и своими ресурсами, используя свое положение в старой систе-

ме, однако такое положение объединений не обязательно должно быть выгодно для нефтяной промышленности в целом. Наблюдается еще один процесс — попытки геологоразведочных организаций самостоятельно заниматься нефтедобычей для того, чтобы обеспечить себе необходимые средства существования. С макроэкономической точки зрения эта тенденция может помешать созданию эффективной геологоразведочной службы, призванной обслуживать нефтедобывающую промышленность страны. Все эти процессы представляют собой попытки использовать старую структуру отрасли.

Отправной точкой реформ является ситуация, характеризующаяся тем, что нефтяная промышленность страны полностью находилась под контролем государства, а в настоящее время еще и тем, что достигнутый уровень частного предпринимательства и доля его недостаточны для того, чтобы частные компании могли в ближайшее время взять на себя организующую роль государства, кроме того совершенно не подготовлена законодательная и нормативная база для такого перехода. Почему считается недостаточным достигнутый уровень частного предпринимательства: во-первых, частные компании, как осколки старой министерской пирамиды, имеют такое территориальное разделение, что компании мало конкурируют между собой; во-вторых, система управления и организационная структура таких компаний остается в основном пока еще старой, «министерской». Поэтому, хотя большинство существующих сегодня компаний по форме частные, по содержанию в значительной части остаются полугосударственными.

Упрощенно можно считать, что в отношении роли государства существуют два крайних альтернативных подхода — либо система, находящаяся под полным контролем государства, аналогичная старой министерской пирамиде, либо полное устранение государства от управления отраслью. Главными целями реформ должны быть конкуренция и демонополизация, которые на примере других стран уже доказали, что являются наилучшим способом обеспечения эффективного развития нефтяной промышленности. Создание акционерных обществ, возможно, является правильным шагом в направлении структурной перестройки отрасли, открывая реальную возможность для образования в относительно короткий срок предприятий различных форм собственности — полностью государственных, смешанных (государственно-частных), иностранных, а также частных (с нулевым участием государства). В условиях смешанной экономики с существующими в ней разными типами предприятий государственные компании, находящиеся в окружении частных фирм, ведут себя совершенно иначе, чем в условиях экономики социалистического типа, когда государство является единственным владельцем всех предприятий и организаций нефтяной промышленности. Следует подчеркнуть огромную важность роли государства, как регулятора, особенно применительно к тем случаям, когда существует реальная угроза, что вертикально-интегрированные компании создадут региональные монополии. Теоретический подход к решению проблемы структурной перестройки нефтяной отрасли России приводит к необходимости рассмотрения четырех основных параметров, которые должны быть зафиксированы на соответствующих уровнях так,

чтобы комбинации этих параметров определяли различные варианты проведения структурной перестройки. Результаты такого анализа представлены в прилагаемой ниже 'матрице решений', которая показывает различные возможные варианты для каждого из выбранных параметров. К таким возможным вариантам относятся следующие:

- структура нефтяных компаний

этот параметр является определяющим, поскольку он контролирует все виды деятельности нефтяных компаний и оказывает очень значительное влияние на другие параметры, имеющие отношение к организации работы нефтяной промышленности. Возможны следующие три варианта структуры нефтяных компаний:

- все компании являются неинтегрированными: такой подход представляет собой воплощение еще одной крайней концепции организации нефтяной промышленности, которая предусматривает создание наиболее благоприятных условий для развития свободной конкуренции, но при этом, возможно, не решает проблемы развития предприятий некоторых подотраслей нефтяной промышленности (нефтехимия и нефтепереработка) и может привести к некоторой нестабильности всей организационной системы в целом.
- все компании являются вертикально-интегрированными (ВИК). Одним из возможных вариантов является организация всех компаний и предприятий нефтяной промышленности страны, за исключением некоторых научно-исследовательских институтов, машиностроительных предприятий и сервисных компаний, в виде ВИК. Главная особенность такого подхода состоит в создании благоприятных условий для создания и развития региональных монополий, особенно в сфере сбыта нефти и нефтепродуктов.
- сосуществование вертикально-интегрированных компаний и неинтегрированных компаний. В настоящее время уже существуют ВИК, которые представляют собой самую современную форму организации крупных нефтяных компаний, которую более подробно рассмотрим позднее.

- форма собственности

как показывают результаты анализа организационных моделей в других странах, этот вопрос является спорным, и даже несмотря на то, что в настоящее время имеет место сильная тенденция к приватизации, государственные компании по-прежнему пользуются некоторыми преимуществами, особенно в странах, осуществляющих экспортные поставки сырой нефти. Форма собственности может принимать различные виды:

- все компании являются государственными для лучшей организации надзора за работой нефтяной промышленности во время проведения основных мероприятий по структурной перестройке
- одновременное присутствие частных и государственных компаний позволяет обеспечить развитие конкуренции для повышения эффективности функционирования всей системы
- приватизация всех предприятий — наиболее радикальное решение с целью создать рыночную систему с абсолютной свободой конкуренции.

- характер государственного регулирования

государственное регулирование включает две составляющие: законодательную систему (с помощью которой устанавливаются и контролируются 'общие правила игры' — закон о недрах, кодексы стандартов, налоговое законодательство и т.д.) и ряд дополнительных законодательных и нормативных актов (так называемые 'исключения из общих правил'), которые призваны обеспечить защиту прав потребителей, защиту честной конкуренции, привлекательность нефтяной промышленности для частных инвесторов и т.п.

- *высокая степень государственного регулирования* особенно необходима для защиты конкуренции в системе где доминируют крупные вертикально-интегрированные компании.
- *ограниченная 'общими правилами' степень государственного регулирования* будет достаточна, если организационная структура нефтяной промышленности будет поддерживать развитие свободной конкуренции.

При рассмотрении всей совокупности возможных вариантов решений (см. табл. 1) некоторые из них могут показаться вполне целесообразными и очень привлекательными, однако уже пройденные этапы реформирования и поставленные цели новых преобразований отсеивают большую часть возможных вариантов решений. В столбцах матрицы — А, В, С — представлены три основных, наиболее вероятных, варианта решения, какой будет организационная структура нефтяной отрасли России, но можно рассмотреть и некоторые другие.

Таблица 1

Матрица вероятных решений

	Варианты решения		
	А	В	С
Структура нефтяных компаний	большинство компаний являются вертикально-интегрированными	отдельные компании являются вертикально-интегрированными	все компании являются вертикально-интегрированными
Форма собственности компаний	смешанная государственно-частная	частная	частная
Характер государственного регулирования	ограниченное регулирование	общие правила	жесткое государственное регулирование

Вариант А: Минимальные изменения

Этот вариант является отражением концепции закрепления нынешней организационной структуры нефтяной промышленности с одновременным усовершенствованием законодательной базы. При таком варианте существует потребность в некоем минимальном уровне регулирования отрасли, чтобы ограничить регионально монополистические тенденции ВИК.

Преимущества

- минимально необходимый уровень конкуренции обеспечивается присутствием определенного числа независимых друг от друга компаний.
- высокая эффективность работы нефтяной промышленности обеспечивается за счет ограниченного числа мощных вертикально-интегрированных компаний.

- нефтеперерабатывающие предприятия в рамках ВИК, обеспечены надежной защитой от основных финансовых трудностей и недостатка сырья.

Недостатки

- опасность злоупотреблений монопольным правом со стороны ВИК, особенно в области сбыта нефти и нефтепродуктов.
- опасность финансовых ограничений на развитие нефтяных компаний, особенно не интегрированных компаний.
- помимо общих правил, потребуется проведение конкретных мероприятий по поддержанию ограниченного государственного регулирования с целью контроля монополий и розничных цен.

Вариант В: Ограниченная интеграция

Данный вариант является продолжением варианта А. Отличие состоит в том, что в нефтяной промышленности больше присутствуют неинтегрированные компании и отдельные предприятия, а число ВИК и/или их размеры каким-либо образом ограничены. При этом государство максимально устраняется от регулирования и ограничивается только установлением общих правил.

Преимущества

- создание благоприятных условий для развития свободной конкуренции, что должно привести к повышению эффективности и снижению цен.
- этот вариант является привлекательным для потенциальных частных инвесторов и будет способствовать более быстрому развитию отрасли
- это решение наиболее благоприятно для потребителей, поскольку именно при нем у них появится максимальная свобода выбора.
- рассматриваемый подход обеспечивает возможность сравнения показателей эффективности предприятий на всех стадиях (разведки, добычи, и т.д.)
- не требует государственного установления цен.

Недостатки

- существуют элементы естественного монополизма, что требует дополнительного контроля со стороны государства.
- большое число компаний потребует наличия дополнительного государственного аппарата для осуществления контроля.
- возникновение финансовых ограничений для отдельной компании на выполнение капиталоемких проектов.

Вариант С: Максимальная интеграция

Этот вариант является крайней формой варианта А. При нем вся нефтяная отрасль состоит исключительно из частных вертикально-интегрированных компаний. Причем для обеспечения конкуренции, защиты интересов потребителей и привлечения иностранных инвестиций необходима очень высокая степень государственного регулирования.

Преимущества

- высокая эффективность работы нефтяной промышленности обеспечивается за счет ограниченного числа мощных вертикально-интегрированных компаний.

- промежуточные звенья (переработка, нефтехимия, транспорт) обеспечены хорошей защитой от основных финансовых трудностей и имеют хорошие возможности для реконструкции и развития
- относительно небольшое число организаций, что облегчает контроль и регулирование.

Недостатки

- наибольшая опасность монополизации региональных рынков со стороны ВИК
- этот вариант менее привлекателен для привлечения иностранного капитала и компаний из-за жесткого государственного регулирования и трудностями конкурентирования с монополистами – ВИК
- наименее привлекательный для потребителя вариант из-за уменьшения конкуренции, отсутствия рыночных механизмов регулирования цен.
- необходимость установления и поддержания жесткого государственного регулирования и контроля за розничными ценами.

Как показывает анализ наиболее вероятных сценариев развития нефтяной отрасли в России, одну из главных ролей в нефтяной отрасли играют в настоящее время и будут играть в обозримом будущем вертикально-интегрированные компании — новая форма структурной организации производства для России.

В современных условиях важнейшее, можно сказать, ключевое значение приобретает факт наличия у таких компаний собственной стратегии развития. А в условиях быстро меняющейся бизнес-среды необходимо иметь надежный инструментарий, позволяющий определять и формировать стратегии развития, отвечающие новым внешним условиям и позволяющие использовать и преумножить потенциал компании, как производственный, так и финансовый. Формирование собственной стратегии развития неразрывно связано с необходимостью применения новых подходов в управлении, научно-технической политике и др. Целесообразно обобщить и использовать рациональное зерно из зарубежного опыта создания, становления, разработки стратегий и функционирования ВИК в странах с развитой рыночной экономикой.

За годы структурной реформы экономики отечественные нефтяные компании, государственные и частные предприятия накопили определенный опыт работы на российском нефтяном рынке, в маркетинге, финансах и т.д. Анализ имеющейся информации, личный опыт работы в этой сфере подтверждает наличие некоторого информационного и научно-методического вакуума в рациональной организации стратегического планирования.

Продолжающиеся реформы нефтегазового сектора в России приведут к значительным изменениям на предприятиях всего спектра нефтяного и газового бизнеса у нас в стране — от гигантов до небольших компаний, что требует постоянного научного поиска и обоснованных методологических подходов и применения современных методов при разработке стратегий развития компаний, их эффективном управлении в уже существующих условиях конкурентной бизнес-среды. Поэтому представляет большой практический интерес задача моделирования, выявления и усиления преимуществ вертикально-интегрированной компании.

2. Принципы моделирования

Под сложными вертикально-интегрированными производственными системами (ВИПС) понимается устойчивое сочетание производственных объектов, сосредоточенных на локализованной (одной или нескольких) территории и объединяемых существенными производственно-экономическими связями, определяемыми главным образом технологической необходимостью.

Важнейшими чертами, позволяющими идентифицировать ВИПС, являются: наличие взаимосвязанной системы производств, имеющих определенную специализацию в рамках всего народного хозяйства, общность и ограниченность территории, возможность комплексного использования местных ресурсов (природных, трудовых и производственных), единство производственной и обслуживающей инфраструктуры.

При рассмотрении конкретных проблем функционирования и развития сложных систем, подготовке соответствующих решений может быть применена более или менее типовая схема системного анализа [17], включающая следующие этапы:

- выявление и постановка проблемы, ее формулировка и структуризация;
- изучение специфики объекта, его внешних и внутренних связей во временном, пространственном, структурном и других аспектах;
- анализ основных структурных элементов проблемы на качественном уровне;
- формирование целей решения проблемы, критериев, установление их иерархических взаимосвязей, возможностей ранжирования и количественной оценки;
- определения альтернативных путей достижения целей, важнейших ограничений;
- сбор исходной информации, оценка полноты и достоверности информации, возможностей ее пополнения и повышения точности;
- построение различного рода моделей, количественный анализ основных структурных элементов, определение связанных с альтернативами затрат и результатов;
- проведение расчетов по моделям, синтез результатов качественного и количественного анализа, внесение экспертных поправок и подготовка решений, в случае необходимости — корректировка моделей, исходной информации, повторное проведение расчетов и синтез результатов.

Применение принципов системного анализа к вертикально интегрированной системе предполагает необходимость соблюдения ряда требований. Отметим следующие из них:

1. Учет сложности системы в целом и отдельных ее подсистем: все они состоят из большого числа взаимосвязанных элементов, причем число типов этих элементов тоже достаточно велико. Взаимодействие отдельных подсистем между собой, наличие у них собственных 'интересов', целей и критериев оценки, экономического механизма функционирования и т.д. обуславливают появление системных (синергических) эффектов¹. При анализе сложных многоуровневых си-

¹ Системными называют обычно эффекты, которые не могут быть непосредственно выведены из свойств

стем учет синергических эффектов очень важен потому, что в таких системах ориентация на локальные выгоды подсистем может приводить к решениям, не выгодным для системы в целом. Наличие таких эффектов приводит к тому, что эффект по системе в целом может не совпадать с суммой эффектов по отдельным составляющим ее частям; в этом непосредственно проявляется свойство целостности (эмерджентности) сложных систем. Существенной составляющей синергических эффектов являются также эффекты концентрации, специализации производства и др. [14].

2. Учет иерархической (многоуровневой) структуры вертикально интегрированной производственной системы. При этом надо иметь в виду многогранность свойства иерархичности, проявление его в разных аспектах, и прежде всего во временном, отраслевом и территориальном.

3. Учет свойства управляемости элементов производственной системы всех уровней иерархии, ориентация управления на выбор путей наиболее эффективного достижения поставленных целей. Это осуществляется с помощью одновременного системного анализа декриптивного и нормативного аспектов функционирования производственной системы, выбора таких включаемых в программу развития мероприятий, которые обеспечивают движение по наивыгоднейшей траектории перехода от того, что есть, к тому, что должно быть.

4. Необходимость комплексного изучения всесторонних последствий принимаемых решений экономического характера. Последствия, вызываемые решениями, надо анализировать не только во взаимодействующих подсистемах, но и у потребителей, а также во всех смежных сферах: социальной, экологической, политической и др.

5. Двойственный подход к изучению вертикально интегрированной производственной системы: как относительно обособленной сложной динамической системы, развивающейся по присущим таким системам закономерностям, и как неотъемлемой части народного хозяйства, подчиняющей при своем функционировании и развитии требованиям взаимодействующих с этой производственной системой других отраслей и сфер народного хозяйства. Из принципа двойственности вытекает наличие внутренних и внешних аспектов функционирования и развития ВИПС и двух взаимосвязанных систем основных понятий и показателей его деятельности.

6. Использование моделей как внутреннего (когда непосредственно изучаются и моделируются процессы, целенаправленно происходящие в системах, определяются динамические характеристики этих процессов), так и внешнего описания систем (когда в соответствии с принятым в кибернетике подходом они представляются в виде 'черного ящика' и изучаются причинно-следственные регрессионные зависимости типа 'ход-выход').

3. Стандартные подходы к оптимизации развития и размещения

Рассмотрим процесс моделирования простейшей ВИПС, под которой понимается совокупность пред-

приятий разных отраслей, сосредоточенных в одном или нескольких пунктах, объединенных совместным использованием производственной инфраструктуры, природных, трудовых и других ресурсов, углубляющих и расширяющих производственно-экономические связи на последовательных стадиях развития.

Под оптимизацией развития и размещения ВИПС понимается определение наилучшего варианта использования природных и прочих ресурсов, его внешних и внутренних связей с позиции критерия максимизации чистого приведенного дохода (или другого критерия) при возможных условиях обеспечения заданного уровня производства, некоторых экономических показателей и других ограничений.

3.1. Структура ВИПС

Современные ВИПС обладают сложной хозяйственной структурой. Одним из основных естественных элементов этой системы могут являться природные ресурсы. Трудовые ресурсы представляют главный активный элемент вертикально-интегрированной производственной системы. Существующий производственный аппарат, состоящий из производственных и транспортных объектов, инфраструктуры [18] и других воспроизводимых элементов, составляет наиболее динамичную часть общей структуры таких систем.

Ядро ВИПС – совокупность производственных предприятий различных отраслей, которые разделяются на отрасли специализации, связанных между собой технологически необходимыми производственными связями, и комплексирующие производства, в свою очередь разделяющиеся на вспомогательные и обслуживающие.

Первая группа отраслей — отрасли специализации, которые непосредственно участвуют в производственно-технологическом обмене продукцией. Это могут быть отрасли как промышленности (добывающей или обрабатывающей), так и сельского хозяйства.

Набор отраслей специализации, место, время и темпы развития определяются составом ресурсов ВИПС, потребностью в них, затратами на производство и доставку продукции потребителям. По своей значимости и 'мощности' отрасли специализации можно разделить на внутренние и внешние. К внешним относятся обычно те, продукция которых предназначена для потребления вне ВИПС. Продукция внутренних отраслей потребляется главным образом в пределах ВИПС. Как правило набор внешних отраслей более ограничен, чем набор внутренних. В процессе развития системы отрасли специализации могут переходить как из внешних во внутренние, так и обратно.

Вторую группу отраслей, обеспечивающих развитие отраслей специализации и отчасти собственные нужды, условно можно назвать вспомогательными. Структура, время и масштабы развития, связи и размещение вспомогательных производств определяются требованиями отраслей специализации, величиной местных ресурсов и эффективностью создания таких производств в составе системы по сравнению с затратами на ввоз аналогичной продукции из-за пределов ВИПС.

Третья группа отраслей – это отрасли, обслуживающие непосредственные потребности населения. Они призваны обеспечивать потребителя конечными продуктами производства и разными видами услуг.

отдельных подсистем, а определяются их взаимодействием. □

3.2. Взаимосвязи ВИПС

Внутренние взаимоотношения между этими группами отраслей промышленности, а также взаимодействия их как с другими элементами внутри самой производственной системы, так и объектами, находящимися за ее пределами, в совокупности образуют основные внешние и внутренние взаимосвязи [1].

Внешние связи определяют место данной производственной системы в хозяйстве страны и его специализацию в масштабе страны и региона. Как правило, внешние связи бывают двусторонние: от экономики страны и импорт к ВИПС и от ВИПС к экономике страны и экспорт. Первые отображают потребность экономики в ресурсах или конечной продукции ВИПС (проявляется в виде спроса), состав и количество ресурсов (продуктов), которые экономика может выделить данной производственной системе (формируется предложение продуктов). Вторые содержат информацию о ресурсах и возможностях ВИПС, перечень ресурсов (продуктов) других производственных систем, которые необходимы для осуществления деятельности.

Очень многообразны и сложны внутренние связи. Они осуществляются по линии производственного процесса (вертикальные и горизонтальные), материально-технического снабжения, совместного использования природных и трудовых ресурсов и элементов производственной инфраструктуры комплекса.

По функциональному признаку внутренние связи ВИПС можно разделить на следующие группы:

- производственно-экономические;
- материально-технические (снабженческо-сбытовые), которые охватывают сырье, топливо, вспомогательные материалы, оборудование и готовую продукцию;
- обусловленные территориальным расположением, т.е. единством транспортно-географического положения предприятий, и возникающие при использовании разными предприятиями одних и тех же обслуживающих устройств (электро-, газо-, водо-снабжение, транспорт, и т.п.).

Уровень развития этих связей, их характер, рациональность и полнота во многом определяют степень оптимизации и эффективность деятельности ВИПС.

Важнейшую роль в формировании ВИПС играют внутренние производственно-экономические связи:

- по взаимодействию между предприятиями, совместно участвующими в производстве одного готового продукта из разных видов сырья, полуфабрикатов и деталей (горизонтальные связи);
- по взаимодействию между предприятиями, последовательно участвующими в производстве одного готового продукта на разных стадиях одного технологического процесса (вертикальные связи);
- по комбинированию – взаимодействию производств (или технологических процессов), при котором из одного и того же сырья можно получить одновременно разные продукты путем последовательной переработки исходного сырья и, комплексного его использования и утилизации отходов.

Совокупность внешних и внутренних связей производственной системы необходимо рассматривать в развитии. Причем развитие должно обеспечивать создание оптимальных пропорций в системе. Оптимальная пропорциональность должна существовать как

между основными структурными компонентами территориально-производственных систем, так внутри их.

Производственная сфера ВИПС дополняется производственной инфраструктурой. Производственная инфраструктура представляет собой совокупность инженерно-технических сооружений, включающих строительную и энергетическую базы, транспорт, инженерные коммуникации и т.п.

Развитие всех элементов, формирующих структуру ВИПС во взаимной связи и обусловленности, подчиненное единому критерию оптимальности является предметом оптимального планирования и развития ВИПС.

3.3. Современное моделирование ВИПС

Как правило до настоящего времени представления о возможности оптимизации ВИПС были связаны с построением либо глобальной модели ВИПС, либо системы взаимосвязанных отдельных моделей [2-4]. Модель ВИПС, того или иного типа, в свою очередь может являться подмоделью более общей модели планирования развития отрасли, региона или экономики страны в целом.

В рамках глобальной модели ВИПС должны последовательно и во взаимной увязке решаться следующие задачи: определение специализации, установление основных параметров структуры и очередности создания основных объектов ВИПС, определение схемы пространственной организации ВИПС.

В систему взаимосвязанных моделей оптимизации формирования ВИПС могут входить: модель размещения производства (промышленности и сельского хозяйства), модель производственных циклов, модель формирования сети магистрального транспорта, модель прогнозирования отдельных параметров ВИПС, модели развития отдельных элементов инфраструктуры, внутрисистемных единиц и воспроизводства некоторых видов ресурсов ВИПС (модель формирования строительной базы, модель воспроизводства и миграции трудовых ресурсов, модель формирования сферы обслуживания и т.п.).

Перечисленные модели связаны единством цели их использования, определенной последовательностью ввода их в процесс исследования и взаимным обменом информацией. Это является основой объединения их в систему. Использование такой системы дает большое преимущество по сравнению с применением отдельных разрозненных моделей, что выражается в появлении возможности контроля за соблюдением конечного критерия оптимальности в процессе всего исследования, формирования значительной части исходной информации в результате решения оптимизационных задач, осуществления более детальных исследований при тех же параметрах программ в ЭВМ. Использование системы моделей соответствует принятому подходу к определению оптимального варианта формирования ВИПС. В основу его положен принцип постепенного углубления анализа, последовательного перехода от решения общих вопросов к решению частных, от проблем формирования всей системы к проблемам развития и размещения отдельных элементов производственной системы. Этим объясняется наличие в составе системы укрупненных, средних и детализированных моделей.

Для системы моделей оптимизации приняты поэтапный (последовательный) учет параметров свободы решений

и неформализованный переход от одного этапа решения к другому (от одной модели к другой).

В качестве основного критерия оптимальности часто принимается максимизация чистого приведенного дохода (NPV) или минимизация общих затрат на функционирование и развитие. Принятие указанных критериев в качестве основного не исключает возможности использования других критериев при решении некоторых вопросов, связанных с формированием и функционированием ВИПС.

С помощью системы моделей определяются основные вопросы, связанные непосредственно с функционированием и развитием отдельных частей ВИПС:

- масштабы и направления использования всех видов ресурсов и распределение их между элементами ВИПС;
- специализация и производственная структура ВИПС в целом и отдельных его частей – сочетание и пропорции развития отраслей специализации, внешние и внутренние связи;
- размещение, масштабы основных производственных элементов.

Предполагаемое поэтапное решение соответствует последовательности предварительных проработок, позволяет выявить возможность сокращения затрат на формирование и функционирование ВИПС. Количество необходимых этапов и набор используемых моделей определяются целью исследования, продолжительностью рассматриваемого перспективного периода, специфическими условиями изучаемой системы и уровнем обеспеченности исходной информацией.

К числу основных этапов относятся:

1 этап – определение основных параметров отдельного элемента: масштабов развития, потребности ресурсов и их источников, темпов и последовательности создания основных объектов специализации.

2 этап – определение схемы размещения производств и пространственной организации ВИПС. Соответственно предполагаемая схема оптимизации развития и размещения ВИПС включает две взаимосвязанные модели: оптимизации производственной структуры ВИПС и оптимизации пространственной организации ВИПС (рис 1).

Первая модель предназначена для определения возможных объемов производства предприятий исходя из ограниченности ресурсов, целесообразности их использования и условий развития производства. В модели могут использоваться критерии максимума NPV, максимума чистого дохода на вложенный капитал и т.п.

В результате проведения расчетов по модели определяется ряд вариантов производственной структуры ВИПС, которые корректируются в соответствии с производственным заданием, поступающим из моделей верхнего уровня (если они используются). Кроме того, определяются показатели использования ресурсов и их оценки. Вся эта информация поступает в модель пространственной организации ВИПС.

В модели пространственной организации промышленного узла определяются схема размещения новых предприятий и расширение мощности старых в соответствии с наличием промышленных площадок, транспортных условий, водных ресурсов и т.п. Проводится корректировка объемов производства комплексирующих производств в соответствии с объемами производства предприятий отраслей специализации, мощностями строи-

тельной базы и потребностями населения и конечных потребителей. Уточняются объемы промышленного строительства, внешние связи (ввоз и вывоз продукции и ресурсов), внутренние связи между производственными элементами ВИПС. Задача может решаться на максимум суммарной прибыли или на минимум суммарных приведенных затрат на создание и функционирование ВИПС или по другому критерию.

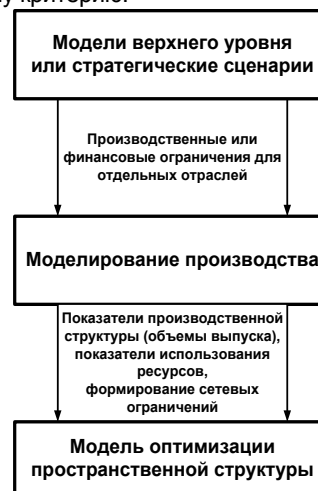


Рис 1. Схема оптимизации развития и размещения ВИПС

3.4. Общий вид модели оптимизации производственной структуры ВИПС

Приведем одну из общих форм модели оптимизации производственной структуры в статическом виде [4]. В задаче оптимизации производственной структуры требуется определить такие пропорции развития между производствами разных отраслей, при котором осуществляется комплексное использование имеющихся ресурсов и достигается максимальный чистый приведенный доход. (Для упрощения рассмотрения задача приводится в статическом виде).

Требуется максимизировать функционал

$$\sum_j p_j x_j \rightarrow \max$$

при соблюдении баланса по природным ресурсам

$$\sum_i b_{ij} x_j \leq B_i, \quad i \in I, j \in J;$$

баланса по капитальным вложениям

$$\sum_j k_j \Delta x_j \leq K, \quad j \in J;$$

баланса по трудовым ресурсам

$$\sum_j t_{mj} x_j \leq T_m, \quad m \in Q, j \in J;$$

ограничения на мощности некоторых видов производств

$$x_j \leq M, (x_j \geq M) j \in J; \quad (1)$$

и условий не отрицательности переменных

$$x_j \geq 0 j \in J,$$

где

i — индекс природных ресурсов;

j — индекс видов продукции;

m — индекс видов трудовых ресурсов;

I — множество видов природных ресурсов;

Q — множество видов трудовых ресурсов;
 J — множество видов продукции;
 p_j — чистый доход, получаемый при производстве единицы продукции j ;
 b_{ij} — затраты ресурса i на единицу продукции j ;
 k_j — затраты капитальных вложений на увеличение производства единицы продукции j ;
 t_{mj} — затраты трудовых ресурсов вида m на единицу продукции j ;
 B_i — объемы ресурса вида i ;
 K — общий объем капитальных вложений;
 T_m — общая численность трудовых ресурсов вида m ;
 M — ограничения на мощности некоторых производств;
 x_j — объем производства продукта j ;
 Δx_j — прирост объема производства продукта j .

Данная модель содержит ограничения на природные, финансовые и трудовые ресурсы ВИПС. Специфическим в модели является наличие условия баланса распределения продукции. Оно фиксирует существующие или возможные технологические, экономические, сбытовые и другие связи между предприятиями системы. Поэтому развитие одного из производств влечет за собой одновременно развитие связанных с ним производств [6, 7, 9, 10].

3.5. Общий вид модели оптимизации размещения и развития

При постановке задачи на максимум чистого дохода значение целевой функции представляет собой разность между поступлениями от реализации выпускаемой продукции и затратами на ее выпуск, транспортировку и использование. Важная особенность этой задачи состоит в том, что могут сравниваться варианты деятельности системы, различающиеся как по затратам, так и по результатам — объему, структуре и динамике выпуска продукции. Постановка задачи на максимум чистого дохода (а не на минимум суммарных затрат) особенно целесообразна, когда размеры спроса на продукцию существенно зависят от цен ее реализации, а также когда необходимо определить ассортиментную структуру производства, причем прогнозы цен считаются более надежными, чем прогнозы спроса [7, 8, 10, 15, 16].

Если предположить, что цены на реализуемые продукты не зависят от объема реализации и при заданной цене реализации емкость рынка ограничена, то математическая модель будет иметь следующий вид:

Найти x, y , максимизирующие значение суммарного чистого дохода

$$L(x, y) = \sum_{j=1}^R c_j y_j - \sum_{r=1}^m \sum_{q=1}^{Q_r} z_r^q x_r^q \rightarrow \max$$

при условиях:
 сбалансированности производственных мощностей с возможностями реализации

$$\sum_{r=1}^m \sum_{q=1}^{Q_r} M_r^q x_r^q \geq y_j \quad j=1, \dots, R;$$

границ допустимых значений уровней реализации каждого продукта

$$0 \leq D_j \leq y_j \leq D^{\wedge}_j \quad j=1, \dots, R;$$

ограничения по используемым в отрасли ресурсам

$$\sum_{r=1}^m \sum_{q=1}^{Q_r} G_r^q x_r^q \leq G_k \quad k=1, \dots, N;$$

требования выбора только одного варианта в каждом возможном пункте строительства

$$\sum_{r=1}^m \sum_{q=1}^{Q_r} x_r^q \leq 1, \quad r=1, \dots, m$$

$$x_r^q \in \{0; 1\} \quad r=1, \dots, m; \quad q=1, \dots, Q_r$$

где

D_j — потребность в продукте j , подлежащая обязательному удовлетворению;

$D^{\wedge}_j$ — максимально возможный объем реализации продукта j ;

c_j — цена реализации продукта j ;

y_j — объем реализации продукта j ;

G_r^q — норма расхода ресурсов вида k в пункте r при варианте развития q ;

G_k — наличие ресурсов вида k ;

M_r^q — выпуск продукта j в пункте r при варианте развития q ;

z_r^q — затраты на строительство в пункте r при варианте развития q и выпуск на нем M_r^q единиц продукции;

x_r^q — целочисленная переменная, показывающая, входит ли в план строительство q -ой типовой мощности в пункте r и выпуск продукции, соответствующей этой мощности.

Рассмотренные модели представляют собой общую задачу линейного программирования, решать которую можно симплекс-методом или его модификациями. Однако, некоторые особенности описания ВИПС подобные постановки не учитывают, поэтому возникла необходимость более детального изучения объекта моделирования.

4. Вертикальная интеграция нефтяных компаний

Рассмотрим подробнее ВИПС на примере компаний в нефтяной отрасли. Цель формирования крупно-агрегированной модели устойчивого развития вертикально-интегрированной нефтяной компании заключается в создании экономико-математического инструментария оптимизации деятельности компании в целом и отдельных ее секторов, прогнозировании динамики важнейших финансовых и экономических показателей.

Основным критерием оптимизации в модели выступает принцип, основанный на **максимизации чистого дисконтированного дохода (NPV)**.

Экономико-математическая модель такого плана формулируется для определенного временного отрезка — периода планирования, длительность которого колеблется от 5 до 15 лет. Экономические показатели, используемые при расчетах, учитывают изменение во времени оценок ресурсов и продукции, вызываемое неравнозначностью финансовых поступлений и затрат в различные моменты времени. Экономические показатели соизмеряются во времени путем использования коэффициентов дисконтирования. Год приведения един для всех экономических показателей, используемых в расчетах.

В рамках создания корпоративной экономико-математической модели основной задачей является учет и исследование в создаваемой модели совокупности внешних и внутренних факторов, определяющих стратегии разви-

тия, инвестиционную программу, ресурсно-производственный потенциал и финансовые результаты.

Основная цель — задача планирования — получить ответ на вопрос «какие необходимы значения управляемых факторов для достижения по финансовым показателям определенного или максимального уровня с производственной эффективностью не ниже определенной и при некоторых фиксированных значениях внешних факторов».

В случае нефтяной компании вертикальную интеграцию можно определить как комбинацию нескольких видов деятельности внутри предприятия или группы предприятий (разведка, добыча, переработка, распределение). Более узко вертикальную интеграцию можно определить как комбинацию деятельности верхнего сектора (разведка и добыча) и нижнего сектора (переработка и сбыт) [5]. Рассматриваемое понятие может использоваться в двух случаях:

- **физическая интеграция**, которая отражает географические связи между видами деятельности: нефть, добываемая компанией, перерабатывается в том же регионе на предприятии, принадлежащем той же компании. Произведенные нефтепродукты транспортируются и распределяются в пределах сферы деятельности той же компании. Такая форма 'тотальной' интеграции возникла в самом начале нефтяной эры после создания компании 'Стандарт Ойл'.
- **экономическая интеграция**, при которой деятельность верхнего и нижнего секторов контролируется в рамках одной компании, но без образования физической связи между разными видами деятельности. Нефть, добытая в определенном месте, затем продается нефтеперерабатывающей компании, которая может принадлежать совсем другому владельцу, в то время как производителей нефтепродуктов данной компании могут снабжать нефтью другие компании. Такое разнообразие обусловлено разными факторами такими как географическую целесообразность, качество нефти, гибкость поставок и т.д. Следует отметить, что концепция экономической интеграции дополняет концепцию физической интеграции и не противоречит ей.

4.1. Преимущества и недостатки интеграции

Основные преимущества физической интеграции состоят в снижении себестоимости (до определенных размеров интеграции), повышении надежности поставок и работы всей технологической цепочки, усиления контроля над рынком.

Снижение себестоимости происходит в результате ликвидации или ограничении рыночных отношений между верхним и нижним секторами и замены их отношениями внутри компании. Такой тип позволяет

сэкономить часть средств на сделках и за счет налоговых льгот в результате манипулирования трансфертными (внутренними) ценами. Техническая экономия может достигаться за счет сокращения товарных запасов и снижения транспортных расходов.

Вертикальная интеграция способствует получению информации, касающейся цен и стоимости услуг по всей цепочке деловой активности. Это позволяет защитить специфические 'ноу-хау' компании, касающиеся, например, качества продукции, до тех пор, пока ее продажа осуществляется только в рамках внутренних структур. Кроме того, вертикальная интеграция дает возможность расширить контролируемую зону в пределах, не ущемляющих прав ее конкурентов: если ограничен рост в исходной сфере деятельности, интеграция предоставляет новые возможности расширения (особенно характерно для компаний стран-экспортеров нефти в нижнем секторе) [5,11].

Однако ряд существенных недостатков, сопровождающих физическую интеграцию, может свести на нет все ее преимущества. Первый и главный недостаток — отсутствие гибкости, проистекает из существования более высокой доли фиксированных издержек, что увеличивает экономический риск в результате воздействия этих издержек на конечную цену продукции. Отсутствие гибкости усугубляется сложностью внутренней структуры и многообразием деятельности. Кроме того, по мнению зарубежных экспертов из ряда аналитических фирм (JP Morgan, CS First Boston), рост вертикальной интеграции не ведет к значительному увеличению прибылей. Между вертикальной интеграцией и прибылями обнаружена только незначительная корреляция, не позволяющая сделать вывод о существовании линейной зависимости между ними.

Экономическая интеграция позволяет в значительной степени избежать недостатков физической интеграции, являясь по существу некоторым промежуточным состоянием между группой независимых предприятий (действующих на базе рыночных отношений) и группой предприятий, объединенных в единую технологическую вертикаль. В зависимости от степени (уровня) экономической интеграции, это состояние может меняться вплоть до достижения крайних форм (группа независимых или физически интегрированных предприятий). Существует несколько теорий, в соответствии с которыми предполагается существование некоторой 'оптимальной' (по определенному критерию) степени интеграции.

Таким образом, исходя из начального предположения о существовании 'оптимальной' степени интеграции и расширения области допустимых состояний экономической интеграции крайними состояниями, определим, что задача моделирования состоит в описании и исследовании режимов функционирования экономически вертикально-интегрированной нефтяной компании.

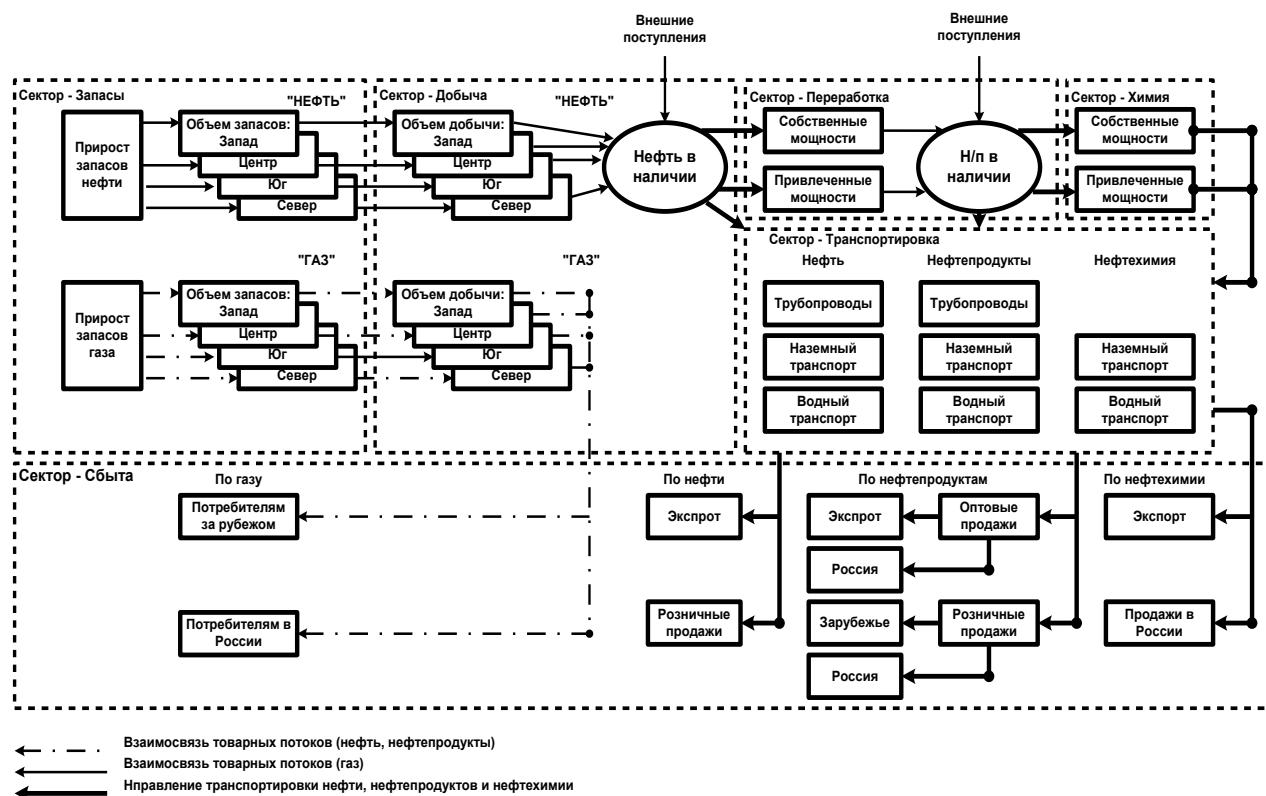


Рис. 2. Секторная структура вертикально-интегрированной нефтяной компании

4.2. Строение ВИНК

Мы не будем рассматривать политические, общественные, социальные и прочие аспекты деятельности нефтяной компании, которая как функционирующий хозяйственный субъект допускает следующее понимание:

ВИНК объединяет нескольких взаимосвязанных секторов (отраслей), имеющих деление по видам деятельности без привязки к существующему организационно-правовому делению и взаимосвязанным друг с другом товарными (рис.2) и соответствующими продуктовыми и финансовыми потоками. Выбор секторов и их описание определяется требованиями к степени агрегированности и структуре выходных результатов.

Современные крупные вертикально-интегрированные нефтяные компании имеют довольно сложную хозяйственную структуру и много видов деятельности [5]. Основной естественный элемент этой структуры – природные ресурсы. Производственно-хозяйственная вертикаль нефтяной компании состоит главным образом из шести секторов, определяющих полный производственный цикл: запасы, добыча, переработка, нефтехимия, транспортировка, сбыт. В свою очередь сектора имеют множественное деление по нескольким признакам:

- региональное деление (определяется требованиями задачи к фиксации существенных различий значений производственных и удельных финансовых показателей. Например, добывающий сектор имеет деление на регионы Запад, Юг, Центр и Север, по которым значения показателей продуктивности скважин, удельной стоимости добычи и др. имеют значительные отличия, кроме того, укрупненное региональное деление позволяет считать регион как

локализованную территориальную единицу при решении транспортной задачи и задачи размещения, что уменьшает размерность и громоздкость модели в целом) [19];

- продуктовое деление (для учета многопродуктовой структуры конечного выпуска вертикально-интегрированной нефтяной компании – газ, нефть, нефтепродукты, нефтехимия);
- деление по производственным мощностям (учет различий технологических цепочек и научно-технических новшеств, а также возможность роста производства за счет контрактных (арендуемых) мощностей).

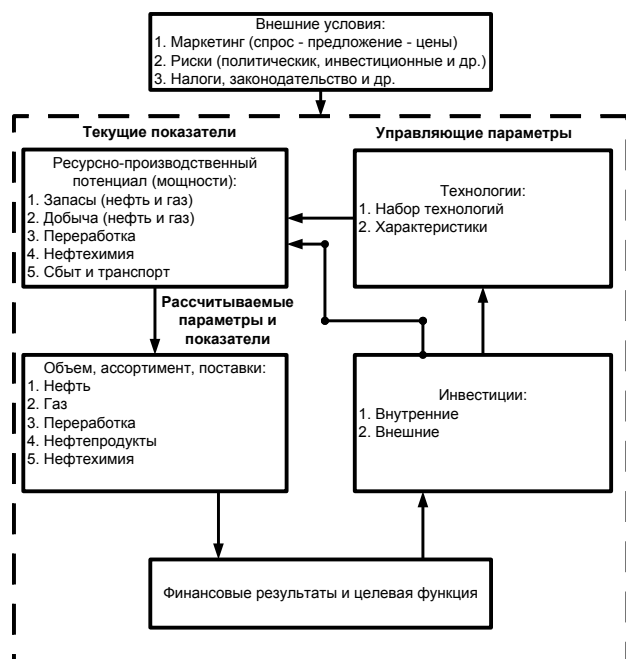


Рис. 3. Общая схема взаимосвязей в модели стратегического развития ВИНК

Непосредственно производящих продукцию в ВИНК существует три сектора – добыча, переработка и нефтехимия. Сектора транспортировки и сбыта можно отнести к обслуживающим отраслям.

Внешние связи от окружения к ВИНК касаются отображения потребности рынка (состав и количество) в производимых ВИНК видов продуктов и сырья, а также существующих возможностях расширения, приобретения ресурсов или строительства новых предприятий. Внешние связи, направленные от ВИНК к ее окружения содержат информацию о производственных возможностях ВИНК и перечень ресурсов (продуктов) других производителей, которые необходимы ВИНК для выполнения текущей деятельности.

Внутренние производственно-экономические связи ВИНК интегрируют отдельные сектора в единую технологическую вертикаль: от запасов к добыче, от добычи к переработке. Далее идет комбинирование – взаимодействие производств нефтехимии и нефтепродуктов из одного сырья (промежуточного продукта переработки нефти на нефтеперерабатывающем заводе). Сбытовые внутренние связи охватывают взаимодействие секторов добычи, переработки, нефтехимии и сбыта (см. рис. 3).

4.3. Структура и агрегированность модели ВИНК

Модель предполагает два раздела описания: материальный и финансовый.

Материальный раздел описания составляют балансы продуктов, производственных мощностей, трудовых и природных ресурсов, новые проекты и правила преобразования входных потоков в выходные. В экономической модели для организации регуляторов (обратных связей) в качестве основного используется финансово-денежный механизм.

Финансовый раздел помимо ввода денежных единиц измерения должен включать описания балансов де-

нежных потоков, правила формирования и использования инвестиционных ресурсов и возможно, финансовый сектор деятельности компании (см. рис. 4).

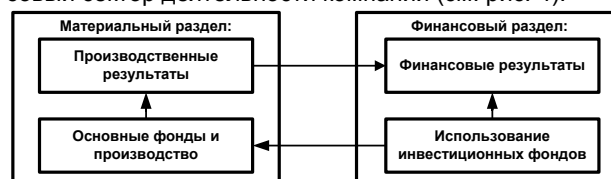


Рис. 4. Разделы экономико-математической модели ВИНК

Понятно, что чем полнее в этих описаниях отражены реальные экономические черты и управляющие воздействия, тем ближе реальная траектория развития к прогнозной или плановой. На пути подробного описания препятствиями служат недостаток знания технологических и природных процессов, большая трудоемкость аналитического решения задачи, необходимость большого массива статистических финансовых данных и данных, характеризующих технологические процессы. Поэтому, *моделирование будет проводиться в предположении, что существует конечное число технологических процессов и эти процессы стационарны или квазистационарны во времени.*

Степень глубины и агрегированности элемента описания определяется совокупностью параметров технологических процессов и выходных показателей, учет которых в моделировании обязателен.

Под элементом описания понимается конечная секторно-производственная единица, полученная в результате регионального деления сектора, и которая фигурирует как самостоятельная в рамках сектора при моделировании хозяйственной деятельности Компании. Во-первых, элементом может быть как существующее структурное подразделение компании, например, 'Запад' или Северный НПЗ, если принимается предположение, эти структурные подразделения моносекторные (по профилирующему виду деятельности), а если существует многосекторность структурных подразделений, то в этом случае элементом описания является один из производственных процессов (по секторному делению) в рамках структурного подразделения.

На множестве этих элементов описания определяется порядок их объединения: чтобы выходные результаты имели разрез по секторам, то сначала элементы объединяются в рамках секторов, а консолидированные результаты получаем объединением по секторам.

В модели рассматривается следующая совокупность факторов, которые можно разделить на два типа: управляемые (фактор применения новых технологий, темпы прироста мощностей по секторам, фактор освоения новых проектов, величина необходимых трудовых и финансовых ресурсов, фактор распределения выпуска по продуктам) и внешние (цены, налоговая система, фактор экономического риска, система амортизации) [12-13].

4.4. Методические направления моделирования ВИНК

В качестве основного методологического направления моделирования ВИНК выбрана динамическая производственно-транспортная модель в сетевой поста-

новке с элементами управляемых моделей (наличие блока обратных связей, целевых функций и др.).

Первый уровень включает описание всех действующих производственных однотипных единиц — элементов. На втором уровне определяются выпуски продукции и происходит оптимизация распределения товарных потоков и размещения предприятий в соответствии с выбранным критерием.

В проектируемой модели (см. рис.4) можно выделить три группы переменных:

1. Текущие координаты — переменные, которые характеризуют текущее состояние объекта (производственные мощности, трудовые и финансовые ресурсы и т.д., которыми описывается блок 'ресурсно-производственный потенциал компании')
2. Управляющие воздействия — переменные, влияющие на изменение этого состояния и поддающиеся целенаправленному выбору (прирост мощностей, выпуски и перевозки продуктов и т.п., блоки 'технологии', 'инвестиции')
3. Исходные данные и внешние факторы — начальные значения текущих переменных и значения других параметров (налоговая система, внешние цены, уровень спроса и т.п., описываемые блоком 'внешние условия'). В общем случае экономическая интеграция подразумевает значительную географическую диверсификацию.

При моделировании должны быть учтены как существующие взаиморасположение предприятий или подразделений, так возможные варианты развития, причем в случае физической интеграции именно существующее взаиморасположение и транспортные связи играют определяющую роль. Для учета этих особенностей представляется необходимым использовать динамическую управляемую модель регионально-отраслевого типа. В ее основе лежит система линейных уравнений и неравенств, описывающих взаимосвязь выпусков производственных элементов, внутреннего и внешнего потребления, перевозок, мощностей элементов и ограничения на них.

Для моделирования функционирования отдельных производственных элементов будет использоваться операторный подход. Наличие в модели блока целевых функций 'финансовые результаты' и блока обратных связей 'инвестиции', позволяют использовать модель как в режиме прогнозирования так и в режиме планирования, помогая ответить на второй вопрос задачи: 'как управлять, чтобы достичь желаемых результатов'.

5. Описание производственных элементов

Экономическое описание ВИНК будем производить поэлементно, затем объединим эти описания в рамках секторов.

5.1. Стандартное описание элемента

Функционирование элемента предполагает присутствие трех компонентов: основных фондов, сырья и труда. В процессе функционирования элемент производит продукты; те из них которые всегда полностью потребляются внутри элемента назовем внутренними (промежуточными), те которые отдаются полностью или частично вовне элемента — выходными. Продук-

ты, поставляемые данному элементу, назовем входными. Интенсивности потоков продуктов измеряются единицами количества продуктов в единицу времени и обозначаются буквой v (см. табл. 2).

Зададим основные параметры, характеризующие оператор планирования для e -го элемента. Под оператором планирования будем понимать правило, согласно которому по планируемым потокам выходных продуктов v^p определяются входные потоки продуктов v^+ и трудовые затраты L^+ .

v_i — выпуск i -го продукта.

V_i — мощность основных фондов, показатель максимального выпуска:

$$v_i \leq V_i$$

$v_i^s = \{v_{1i}^s, v_{2i}^s, v_{3i}^s, \dots\}$ — вектор сырьевых затрат, компоненты v_{ki}^s указывают количество сырьевого продукта k , затраченного на выпуск v_i .

a_i^s — вектор удельных сырьевых затрат с компонентами $a_{ki}^s = v_{ki}^s / v_i$, $k=1,2,3,\dots$

l_i — удельные трудовые затраты;

u_i — скорость роста мощности V_i : $u_i \geq 0$;

μ_i — норма выбытия мощности V_i : $0 < \mu_i < 1$;

$v_i^p = \{v_{1i}^p, v_{2i}^p, v_{3i}^p, \dots\}$ — вектор фондообразующих затрат, компоненты v_{ki}^p указывают количество сырьевого продукта k , затраченного на прирост мощности V_i .

b_i — вектор удельных фондообразующих затрат с компонентами

$$b_{ki} = v_{ki}^p / u_i, k=1,2,3,\dots$$

Получаем, $v_i^s = a_i^s * v_i$ и $L_i^s = l_i^s * v_i$ прямые сырьевые и трудовые затраты, прямо зависящие от объема производимого продукта.

Таблица 2

Виды продуктов

Наименование вида	Обозначение интенсивности потока	Множество наименований продуктов	Поясняющие соотношения
Производимые продукты	v_i	$i \in I$	
Выходные продукты	v_i^p	$i \in I^p, I^p \subseteq I$	$v_i^p = v_i - \underline{v}_i$
Производимые продукты, используемые на собственные нужды	$\underline{v}_i$	$i \in I, I \subseteq I$	$\underline{v}_i \leq v_i$
Внутренние продукты	v_i^b	$i \in I^b, I^b \subseteq I$	$v_i^b \leq \underline{v}_i \leq v_i$
Входные продукты	v_k^+	$k \in I^+$	
Сырьевые потребляемые продукты	v_k^s	$k \in I^s$	
Фондообразующие потребляемые продукты	v_k^p	$k \in I^p$	

Существуют еще другие компоненты материальных и трудовых затрат.

Постоянные затраты: v_i^o , L_i^o — требуются на протяжении всего времени жизни элемента и не зависят от величины выпуска.

Затраты на мощность: v_i^r , L_i^r — пропорциональны мощности элемента

$$v_i^r = a_i^r * V_i \text{ и } L_i^r = l_i^r * V_i$$

Чтобы построить оператор планирования, нужно подсчитать выходной и входной потоки продуктов. Для этого из потока производимого продукта и из суммарного потока потребляемых продуктов исключим поток u производимого продукта, расходуемого на собственные нужды. Суммарная потребность в производимом им самим продукте i равна:

$$a_i^s \cdot v_i + b_{ii} \cdot u_i + v_i^0 + a_i^y \cdot V_i$$

Эта потребность может удовлетворяться как за счет собственного выпуска в объеме $u \leq v_i$, так и за счет выпусков других элементов производящих тот же продукт i :

$$(a_i^s \cdot v_i + b_{ii} \cdot u_i + v_i^0 + a_i^y \cdot V_i - \underline{v}_i) \geq 0.$$

Оператор планирования имеет вид:

$$v_i - \underline{v}_i = v_i^0, \quad i \in I; \quad (1.1)$$

$$v_k^+ = a_k^s \cdot v_i + b_{ki} \cdot u_i + v_i^0 + a_k^y \cdot V_i \text{ для } k \neq i, \quad i \in I;$$

$$v_i^+ = a_i^s \cdot v_i + b_{ii} \cdot u_i + v_i^0 + a_i^y \cdot V_i - \underline{v}_i, \quad i \in I;$$

$$L_i^+ = l_i^0 \cdot v_i + L_i^0 + l_i^y \cdot V_i;$$

$$V_i = V_{0i} + (u_i - \mu_i^* V_i) \cdot dt \geq v_i, \quad u_i \geq 0;$$

$$0 \leq \underline{v}_i \leq \min\{[a_i^s \cdot v_i + b_{ii} \cdot u_i + v_i^0 + a_i^y \cdot V_i]; v_i\}, \quad i \in I.$$

Описание элемента из режима планирования легко переводится в форму оператора функционирования:

$$v_i - \underline{v}_i = v_i^0, \quad i \in I, \quad v_i = 1/a_k^s \cdot (v_k^+ - b_{ki} \cdot u_i - v_i^0 - a_k^y \cdot V_i) \text{ для } k \neq i, \quad i \in I; \quad (1.1a)$$

$$v_i = 1/a_i^s \cdot (v_i^+ + \underline{v}_i - b_{ii} \cdot u_i - v_i^0 - a_i^y \cdot V_i), \quad i \in I;$$

$$v_i = 1/l_i^0 \cdot (L_i^0 - l_i^y \cdot V_i)$$

$$V_i = V_{0i} + (u_i - \mu_i^* V_i) \cdot dt \geq v_i, \quad u_i \geq 0$$

$$0 \leq \underline{v}_i \leq \min\{[a_i^s \cdot v_i + b_{ii} \cdot u_i + v_i^0 + a_i^y \cdot V_i]; v_i\}, \quad i \in I$$

где все коэффициенты сохраняют свое первоначальное определение.

В общем случае, оператор функционирования элемента можно записать в виде некоторой производственной функции $F()$, зависящей не только (или не столько) от описанных выше показателей $(v_k^+, b_{ki}, u_i, a_k^y, a_k^s, V_i, L_i^+)$, а и от ряда других показателей. В этом случае для объема выпускаемого продукта элементом i можно записать:

$$v_i = F_i(v_k^+, u_i, V_i, L_i^+, \dots), \quad i \in I$$

$$V_i = V_{0i} + (u_i - \mu_i^* V_i) \cdot dt \geq v_i, \quad u_i \geq 0$$

Формализованные в результате описания продуктовые потоки (входные и выходные) объединяются в рамках соответствующих секторов. В результате суммирования получаем для каждого сектора оператор (1.1). (В записи оператора планирования просто опущены операции суммирования по множеству элементов описания, относящихся к данному сектору).

Пусть R — множество секторов, $r \in R$ любой элемент этого множества (какой-либо сектор). Каждый сектор r характеризуется потоками входных продуктов $r \cdot v_k^+$ и выходных продуктов $r \cdot v_i^0$, те же потоки продуктов, которые являются внешними, т.е. поступают из внешней среды или направляются туда, не имеют индекса r . Чтобы отразить вертикальную интеграцию производственного процесса, запишем балансовые уравнения для каждого сектора:

$$r \cdot v_k^0 = \sum_{x \in R, x \neq r} \sum_{i \in I} x \cdot v_k^+ + v_k^0, \text{ для любого } k \in I;$$

$$\sum_{i \in I} r \cdot v_k^+ = \sum_{x \in R, x \neq r} (x \cdot v_k^0 \cdot r \cdot \alpha_k) + \sum_{i \in I} (v_k^+ \cdot r \cdot \beta_k), \text{ для любого } k \in I,$$

где $r \cdot \alpha_k, r \cdot \beta_k$ — потребляемые сектором r доли потока выходного продукта v_k^0 и потока внешнего входного продукта v_k^+ соответственно, причем

$$\sum_{r \in R} r \cdot \beta_k = 1,$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{x \in R, x \neq r} (x \cdot v_k^0 \cdot r \cdot \alpha_k) = \sum_{r \in R} r \cdot v_k^0 - v_k^0.$$

В стандартном описании элемента предполагается, что коэффициенты $a_i^s, b_i, a_i^y, l_i^0, l_i^y$ характеризующие качество технологического процесса, задаются извне и считаются постоянными, и новые вводимые мощности имеют такие же характеристики по сырьевым и трудовым затратам. Определим технологию n производства продукта i , как производственный процесс, которому соответствуют свои основные фонды $n \cdot V_i$ с характерными значениями коэффициентов $n \cdot a_i^s, n \cdot b_i, n \cdot a_i^y, n \cdot l_i^0, n \cdot l_i^y$. Поток продукта i , произведенного по технологии n обозначим $n \cdot v_i$. Тогда, оператор (1.1), учитывающий множество технологий N , можно записать в следующем виде:

$$\sum n \cdot v_i - \underline{v}_i = v_i^0, \quad i \in I; \quad (1.2)$$

$$v_k^+ = \sum (n \cdot a_k^s \cdot n \cdot v_i + n \cdot b_{ki} \cdot n \cdot u_i + n \cdot a_k^y \cdot n \cdot V_i) + v_i^0 \text{ для } k \neq i, \quad i \in I;$$

$$v_i^+ = \sum (n \cdot a_i^s \cdot n \cdot v_i + n \cdot b_{ii} \cdot n \cdot u_i + n \cdot a_i^y \cdot n \cdot V_i) + v_i^0 - \underline{v}_i, \quad i \in I;$$

$$L_i^+ = l_i^0 \cdot \sum n \cdot v_i + \sum (n \cdot l_i^y \cdot n \cdot V_i);$$

$$n \cdot V_i = n \cdot V_{0i} + (n \cdot u_i - n \cdot \mu_i^* \cdot n \cdot V_i) \cdot dt \geq n \cdot v_i, \quad n \cdot u_i \geq 0, \quad n \in N;$$

$$0 \leq \underline{v}_i \leq \min\{[\sum (n \cdot a_i^s \cdot n \cdot v_i + n \cdot b_{ii} \cdot n \cdot u_i + n \cdot a_i^y \cdot n \cdot V_i) + v_i^0];$$

$$\sum n \cdot v_i\}, \quad i \in I;$$

N — технологическое множество.

5.2. Особенности описания отдельных элементов

В модели в секторе запасов принята западная классификация запасов: недоказанные, доказанные неразрабатываемые и доказанные разрабатываемые, в совокупности эти категории запасов составляют общие запасы. Геологическая разведка содержит две фазы: предварительную разведку и промышленную разведку. Продуктом первой фазы являются предварительные сведения об общих запасах и запасах полезных ископаемых по категории недоказанных, а также сведения о переоценках запасов. Поскольку процесс открытия месторождения и его размеры носят стохастический характер, то затраты на предварительную разведку можно отнести на непроизводственное потребление и определять их экспертным путем. Начальные размеры запасов также вводятся на основе экспертных оценок. Преобразование категории недоказанных запасов в промышленные (доказанные), есть функция промышленной разведки. Выходом элемента «запасы» является объем подготовленных к промышленной добыче запасов полезных ископаемых; входом — сырье и первоначально разведанные (недоказанные) запасы полезного ископаемого. Прирост недоказанных запасов осуществляется за счет сейсморазведки и лицензий на недоказанные запасы. Прирост доказанных неразрабатываемых происходит либо

за счет лицензий на такой тип запасов, либо за счет перевода недоказанных запасов в доказанные при помощи разведочного бурения. Наконец, доказанные разрабатываемые запасы прирастают за счет освоения неразрабатываемых запасов и истощаются за счет добычи.

В модели помимо абсолютных значений прироста и истощения запасов необходимо учесть качественные характеристики этих запасов и функцию извлекаемости запасов (Доля доказанных разрабатываемых запасов, которая может быть извлечена по данной технологии в процессе добычи). Вводится функция извлекаемости запасов, зависящую от следующих параметров: интенсивность добычи, географический район, тип технологии, величина оставшихся запасов.

В модели принят метод «полных затрат» по учету затрат на приобретение, разведку и разработку запасов, т.е. все эти затраты капитализируются в виде основных фондов или нематериальных активов и амортизируются в течении нормативного срока. Исключением являются затраты по сейсморазведке, которые финансируются за счет собственных средств (чистой прибыли, части ВМСБ).

Пусть месторождение δ предусматривает M_δ очередей ввода в эксплуатацию (например, для сохранения линейности в элементе «добыча» из-за изменения условий добычи по мере истощения запасов). Каждый этап содержит оценки $x_{i^*m\delta}$, $t_{m\delta}$ — объема полезного ископаемого i в очереди m месторождения δ и длительности разведочных работ. Объем полезного ископаемого i на территории q , подготовленный к промышленной эксплуатации за время t_0 до t , определяется по формуле:

$$x_{iq}^p(t) = \sum_{\delta} \sum_m x_{i^*m\delta} \Theta(t - t_{m\delta} - t_{m\delta}), \quad (1.3)$$

$t_{m\delta} \geq t_{(m-1)\delta} - t_{(m-1)\delta}$, условие неопережения очереди разработки;

$\delta \in D_{iq}$ — множество месторождений i -го продукта в месте q .

Тогда баланс полезного ископаемого в месте q имеет вид:

$$x_{iq}(t) = x_{iq}(t_0) + x_{iq}^p(t) - \int_{t_0}^t \sum_n n_{iq}(t) dt \geq 0. \quad (1.4)$$

где n — число технологий добычи полезного ископаемого.

В секторе добычи помимо учета региональных особенностей применимости и эффективности различных технологий добычи, особенностью сектора добычи является учет деятельности совместных предприятий. Что касается совместных предприятий, то возможны три варианта учета:

- в первом варианте учитывается та доля товарно-финансовых показателей, которая соответствует доле ВИНК в уставном капитале (СП 1-го рода);
- во втором — учитывается только доля чистой прибыли, соответствующая доли ВИНК в уставном капитале (СП 2-го рода);
- в третьем — совместное предприятие приравнивается к дочернему предприятию и полностью входит в элемент описания (т.е. все показатели хозяйственной деятельности консолидируются в составе Компании).

В первом случае необходимой исходной информацией являются поток чистой прибыли и величина доли Компании в СП, во втором и третьем случаях необходимая исходная информация по производственным и финансовым показателям и описание элемента аналогичны как по дочерним предприятиям.

Ухудшение условий добычи описывается разбиением месторождения на несколько однородных частей, отличающихся друг от друга удельными затратами на добычу. Для простоты будем отождествлять эти части с очередями ввода месторождения δ в эксплуатацию. Разведка частей месторождения идет последовательно в порядке возрастания номера m , добыча так же, но без опережения разведки, т.е.

$$t_{m\delta} \geq t_{m\delta} - t_{m\delta},$$

где $t_{m\delta}$ — начало добычи на m -ой очереди месторождения δ . Т.к в разных очередях месторождения разные удельные затраты, то (1.3) записывается для каждой части отдельно, соответственно объем добычи ограничен промышленными запасами для каждой очереди месторождения.

Сектор переработки и нефтехимии — это производственный элемент с сопутствующими продуктами, т.е. на одном оборудовании и в одном производственном процессе получаются несколько продуктов. Для их описания по неймановской схеме введем обозначения:

w — интенсивность производства и измеряется в потоках основного сырья-нефти;

f_i — количество i -го продукта, вырабатываемого при единичной интенсивности. Тогда выпуски продуктов имеют вид:

$$i = \sum_n n_i = \sum (f_i * n_w), i \in I.$$

Необходимое количество сырьевых и трудовых затрат на производство равно:

$$v_k^* = \sum_n n_k a_k^* n_w, L^* = \sum_n n_l^* n_w, i \in I.$$

Ограничение по мощности:

$$n_{gi}^* n_w \leq n_{vi}$$

Аналогично по нефтехимии, которая по сути является более глубокой переработкой, отличие только в наименовании продуктов и основного сырья.

6. Задача размещения

Полагаем, что задано множество пунктов H (производства, переработки и потребления), в которых производится или потребляется множество продуктов I . Множество E_h всех предприятий в пункте $h \in H$ разбивается на два непересекающихся подмножества: действующих E_h^0 и новых, которые можно построить в пункте h , E_h^1 . К числу проектов новых предприятий будем относить и проекты реконструкции действующих мощностей. Тогда такой проект реконструкции соответствует некоторому действующему предприятию, хотя в формальной записи такое соответствие и не указывается.

Пункт h может оказаться пунктом, в котором осуществляются внешние поставки $v_i^*(t)$ продукта i_1 , транзитным пунктом для продукта i_2 , пунктом производства продукта i_3 (в h имеется предприятие, выпускающее этот продукт), пунктом конечного потребления продукта i_4 в количестве v_i в момент времени t . Потоки продуктов между пунктами h, h' ограничены про-

пускной способностью коммуникации (h, h') , которая может наращиваться в соответствии с проектами развития пропускной способности $e \in E^{1hh'}$.

Система ограничений в момент времени $t \in [0, T]$ (плановый интервал) записываются следующим образом:

- ограничения по производственным мощностям для реализованных проектов развития производства

$$\sum_{n \in N_{je}} d_{jne} v_{ne}(t) \leq V_{je} \theta(t - \tau_e), j \in J_e, e \in E^1_h, h \in H^1;$$

где $V_{je} > 0$ – величина мощности вида j для проектируемого предприятия e (прирост мощности j после реализации проекта реконструкции e);

$\theta(t)$ – тэта-функция;

τ_e – момент реализации проекта развития e (ввод мощностей для него происходит скачком в момент τ_e);

$H^1 = \{h/h \in H, E^1_h \neq \emptyset\}$ – множество пунктов предполагаемого нового производства и реконструкции действующего;

- неравенства для производимых продуктов в пунктах:

$$v^{*ih}(t) + \sum_{e \in E_{ih}} \sum_{n \in N_{ie}} k_{ine} v_{ne}(t) - \sum_{e \in E^1_{ih}} \sum_{n \in N_{ie}} a_{ine} v_{ne}(t) \geq \sum_{h' \in H^1_{ih}} f_{ihh'}(t) - \sum_{h' \in H^1_{ih}} f_{ih'h}(t) + v^{p_{ih}}(t),$$

при $i \in I_h, h \in H$,

где $v^{*ih}(t) \geq 0$ – заданная величина внешних поставок продукта i в пункт h в момент t (определяется из уравнений описания элементов);

$k_{ine} > 0$ – выпуск продукта i при единичной интенсивности способа n на предприятии e (после реализации проекта e);

N_{ie} – множество способов на предприятии e , в которых выпускается продукт i ;

$E_{ih} = \{e/e \in E_h, N_{ie} \neq \emptyset\}$; $a_{ine} > 0$ – затраты продукта i при единичной интенсивности способа n на предприятии e ;

N'_{ie} – множество способов производства на предприятии e , при которых затрачивается продукт i ;

$E^1_{ih} = \{e/e \in E_h, N'_{ie} \neq \emptyset\}$;

H^1_{ih} – множество пунктов, в которые может вывозиться продукт i из пункта h ;

$f_{ihh'}$ – поток продукта i из h в h' в момент t ;

H^1_{ih} – множество пунктов, из которых может ввозиться продукт i в h ;

$v^{p_{ih}}(t)$ – заданная величина конечного потребления продукта i в пункте h в момент времени t ;

I_h – множество продуктов, связанных с пунктом h ;

- ограничения по пропускным способностям для потоков перевозок:

$$\sum_{i \in I_{hh'}} d_{ihh'} f_{ihh'}(t) \leq F^{0_{hh'}}(t) + \sum_{e \in E^1_{hh'}} F_e \theta(t - \tau_e), (h, h') \in Net,$$

где $d_{ihh'} > 0$ – величина используемой пропускной способности коммуникации (h, h') для единичного потока продукта i ;

Net – множество коммуникаций транспортной сети;

$I_{hh'} = \{i/i \in I_h, h' \in H^1_{ih}\}$ – множество продуктов, перевозимых по коммуникации (h, h') ;

$F^{0_{hh'}}(t)$ – действующая пропускная способность (h, h') в момент t ;

F_e – прирост пропускной способности в результате реализации проекта развития пропускной способности происходит скачком в момент τ_e);

- ограничения по ресурсам, дополнительная потребность в которых возникает с момента реализации проектов развития:

$$\sum_{e \in E^1_{ge}} b_{ge} \theta(t - \tau_e) \leq v^{*g}_{gh}(t), h \in H^1_g, g \in G^+_{h'}$$

где $b_{ge} > 0$ – величина требуемого ресурса вида g после реализации проекта развития e ;

E^1_{gh} – множество проектов развития, которые обеспечиваются ресурсом g из пункта h (проекты развития мощностей могут осуществляться в h , расширение пропускных способностей некоторых коммуникаций (h, h') , исходящих из h , обеспечивается ресурсом g из h);

$v^{*g}_{gh}(t)$ – объем ресурса g выделенного для реализации проектов развития в h к моменту t ;

H^1_g – множество пунктов для которых выделен ресурс g ;

$G^+_{h'}$ – множество видов ресурсов, выделяемых для пунктов региона;

- ограничения по ресурсам, заданным для всего региона:

$$\sum_{h \in H^1_g} \sum_{e \in E^1_{ge}} b_{ge} \theta(t - \tau_e) \leq v^{*g}(t), g \in G^+,$$

где $v^{*g}(t)$ – объем ресурса g , выделенного к моменту t для всех проектов развития;

G^+ – множество видов ресурсов, выделяемых для всего региона.

Помимо перечисленных ограничений следует упомянуть ограничения по действующим мощностям, которые записаны в описаниях действующих элементов. Кроме того, надо записать ограничение для моментов реализации проектов развития:

$$\tau_e \in [\Delta_e, T], +\infty, e \in E^1,$$

где

$E^1 = \{e/e \in E^1_h, h \in H\} \cup \{e/e \in E^1_{hh'}, (h, h') \in Net\}$ – множество всех проектов развития,

$\Delta_e \geq 0$ – длительность реализации проекта развития e (если проект не реализуется в плановом периоде $[0, T]$, то полагаем $\tau_e = +\infty$).

Запишем теперь показатель качества плана. Обычно используют наиболее распространенный критерий оптимальности – минимум дисконтированного объема производственных, транспортных и капитальных затрат за плановый период. В нашем случае, критерий оптимальности – максимум дисконтированной прибыли за плановый период:

$$\Phi = \int_0^T r(t) \sum_{h \in H} \left\{ \sum_{e \in E_h} \sum_{i \in I_h} c^{v_{ie}}(t) v^{p_{ie}}(t) - \sum_{e \in E_h} \sum_{i \in I_h} c^{v_{ie}}(t) [v^{*ie}(t) + v_{ie}] - \sum_{e \in E_h} \sum_{i \in I_h} c^{l_{ie}}(t) L^{*ie}(t) - \sum_{h \in H^1_{hh'}} \sum_{i \in I_{hh'}} c^{ihh'}(t) f_{ihh'}(t) dt \right\} \Rightarrow \max,$$

где $r(t)$ – функция дисконтирования ($r(t) > 0, r'(t) \leq 0$);

$c^{ihh'}(t)$ – удельная стоимость перевозки продукта i из h в h' в момент t ;

$c_{ie}^*(t)$ — удельная стоимость затрачиваемых продуктов на предприятии e при производстве продукта i ;

$c_{ie}^*(t)$ — удельная стоимость затрачиваемых трудовых ресурсов.

Максимизация производится по $\{v_{ie}^*(t)\}$, $\{f_{ih}^*(t) \geq 0\}$ при выполнении ранее описанных ограничений.

Объединение двух выше сформулированных задач в одну проводится через исключение промежуточных переменных и приводит нас к задаче чрезвычайно большой размерности, что создает определенные трудности при ее решении. Основным подходом к решению таких задач, имеющих значительную размерность, является поиск возможности использования идей и методов блочного программирования. Для решения могут быть использованы либо методы декомпозиции, либо итеративные алгоритмы.

7. Описание общего решения задачи

7.1. Разделение задачи

Путем некоторых преобразований, агрегации и замен переменных, исходная задача может быть представлена в виде, для которого применимы существующие методы декомпозиции решения подобных задач. Напомним общий алгоритм решения задачи методами прямой декомпозиции. Методы декомпозиции основаны на идеи разделения исходной сложной задачи по некоторым правилам на ряд задач, решение которых легче исходной задачи [16, 38, 44].

Сформулированная задача относится к классу задач следующего вида :

$$\Phi = \int_0^T r(t) y(t) c(t) dt + K(\tau) \Theta(T-\tau) \Rightarrow \min (= \Phi^*) (2.1)$$

по $y(t)$, τ при

$$Ay(t) \leq a(t) + D \Theta(t-\tau);$$

$$B\Theta(t-\tau) \leq b(t), y(t) \in \mathbb{R}_+^m, \tau = (\tau_i) \in \mathbb{R}_+^n;$$

$$\tau_i \in [\Delta_i, T], i=1, 2, \dots, n,$$

где $c(t)$ — вектор функции (строка) размерностью m ;

$r(t)$ — скалярная функция;

$K(\tau)$ — вектор-строка, каждая компонента которой является функцией соответствующей компоненты вектора τ ,

$a(t)$, $b(t)$ — вектор функции (столбцы);

A, B, D — постоянные матрицы.

Для заданных функций, векторов и матриц будем считать выполненными следующие предположения:

1. Все функции заданы на $[0; T]$, при этом $a(t)=a(T)$, $b(t)=b(T)$ при $t>T$;
2. $r(t) > 0$ и непрерывная;
3. $c(t) \geq 0$ и непрерывная;
4. $K_i(\tau) > 0$, производные $Kr_i'(\tau) \leq 0$ и непрерывные ($i=1, 2, \dots, n$);
5. $a(t)$ — непрерывная;
6. $b(t)$ — непрерывная справа, неотрицательная и неубывающая;
7. $A, B, D \geq 0$ и не имеют нулевых столбцов;
8. $\Delta_i \in [0; T]$ ($i=1, 2, \dots, n$).

Данная задача относится к классу нелинейных невыпуклых многоэкстремальных задач.

Исключаем из (2.1) вектор-функцию $y(t)$. Рассмотрим функцию

$$\Psi(t, \tau) = \min_y [c(t)y \mid Ay(t) \leq a(t) + D \Theta(t-\tau), y \geq 0]. \quad (2.2)$$

Функция $\Psi(t, \tau)$ — оптимальное значение целевой функции для задачи параметрического линейного программирования с параметрами t, τ . В соответствии с леммой Минковского-Фаркаша, необходимым и достаточным условием существования неотрицательного вектора y , удовлетворяющего ограничениям в (2.2), является выполнение неравенства

$$u[a(t) + D \Theta(t-\tau)] \geq 0, \quad (2.3)$$

для всех вектор-строк u , принадлежащих выпуклому многогранному конусу

$$U = \{u \mid uA \geq 0, u \geq 0\}. \quad (2.4)$$

Конус U не зависит от времени t . Поэтому, вводя обобщающие векторы конуса u^v , $v \in N$ (конечное множество индексов образующих векторов), представляем (2.3) в эквивалентной форме:

$$u^v a(t) + u^v D \Theta(t-\tau) \geq 0, v \in N.$$

Определим следующие множества в пространстве векторов τ :

$$\Omega^0 = \{\tau \mid B\Theta(t-\tau) \leq b(t), t \in [0; T], \tau_i \in [\Delta_i, T], i=1, 2, \dots, n\} \quad (2.5)$$

$$\Omega^1 = \{\tau \mid u^v a(t) + u^v D \Theta(t-\tau) \geq 0, v \in N, t \in [0; T]\}.$$

Множество Ω^0 включает в себя все векторы τ , для которых удовлетворяются условия задачи (2.1), накладываемые только на τ . Множество Ω^1 включает в себя все векторы τ , для которых параметрическая задача линейного программирования (2.2) имеет решение при всех $t \in [0; T]$. Обозначим $\Omega = \Omega^0 \cap \Omega^1$. Очевидно, что исходная задача (2.1) имеет решение тогда и только тогда, когда $\Omega \neq \emptyset$. При этом, в силу положительности $r(t)$ оптимальное решение определяется следующими формулами:

$$\tau^* = \arg \min_{\tau} \int_0^T r(t) \Psi(t, \tau) dt + K(\tau) \Theta(T-\tau) \mid \tau \in \Omega \quad (2.6)$$

$$y^*(t) = \arg \min_y [c(t)y \mid Ay(t) \leq a(t) + D \Theta(t-\tau^*), y \geq 0], t \in [0; T] \quad (2.7)$$

Таким образом, решение задачи (2.1) сводится к решению задачи нелинейного программирования (2.6) и решению задачи параметрического линейного программирования (2.7) с одним скалярным параметром t .

Для решения параметрической задачи имеется ряд разработанных численных методов [52, 53]. При этом потребуются аппроксимация вектор-функций $c(t)$, $a(t)$ кусочно-линейными.

Сложность решения нелинейной задачи (2.6) связана с ее невыпуклостью и многоэкстремальностью. Существует достаточное условие неразрешимости задачи (2.6):

Если существует $t' \in [0; T]$, для которого задача линейного программирования

$$\min_y [c(t')y \mid Ay \leq a(t') + De, y \geq 0] \quad (2.8)$$

(e — единичный вектор)

не имеет решения, то задача (2.6) не имеет решения.

Рассмотрим задачу (2.6) подробнее:

$$\int_0^T r(t) \Psi(t, \tau) dt + K(\tau) \Theta(T - \tau) \Rightarrow \min \text{ по } \tau \in \Omega. (2.9)$$

Область допустимости Ω имеет достаточно сложный вид и непосредственный анализ ее затруднителен. Разобьем это множество на отдельные подмножества, соответствующие добавлению в условия цепочки неравенств $\tau^1 \leq \tau^2 \leq \dots \leq \tau^n$, где $\pi = \{i^1, i^2, \dots, i^n\}$ — некоторая перестановка индексов $i \in \{1, 2, \dots, n\}$.

Обозначим

$$\Omega(\pi) = \{\tau \mid \tau \in \Omega, \tau^k \leq \tau^{k+1}, k=1, 2, \dots, n-1\}.$$

Тогда

$$\Omega = \bigcup_{\pi \in \Pi} \Omega(\pi),$$

где Π — множество всех перестановок элементов $\{1, 2, \dots, n\}$.

Поставим в соответствие элементам i^k перестановки $\pi = \{i^1, i^2, \dots, i^n\}$ следующие числа:

$$\underline{\tau}^k(\pi) = \max_{j=1, \dots, h} \min_t [t \mid \sum_{i=1}^k b_{ji} l \leq b_j(t), T \geq t \geq \max_{i \in I_j} a_i], (2.10)$$

$$\bar{\tau}^k(\pi) = \min_{v \in N} \max_t [t \mid \sum_{i=1}^{k-1} (u^v D)_{il} \geq \alpha_v(t), t \geq 0]. (2.11)$$

где

$$\alpha_v(t) = \max_{t \in [0, T]} [-u^v a(t') \mid 0 \leq t' \leq t], v \in N, t \in [0; T],$$

b_{ji} — элементы матрицы B .

Для динамической задачи размещения $\underline{\tau}^k(\pi)$ является наиболее ранним моментом реализации проекта i^k , который обеспечен ресурсами, а $\bar{\tau}^k(\pi)$ — наиболее поздний момент реализации этого проекта, к которому иссякают производственные мощности по какому-либо проекту или пропускные способности не позволяют получить необходимые потоки перевозок (при этом считаются реализованными проекты $i^1, i^2, \dots, i^{k-1}$). Нахождение сводится к решению h одномерных задач минимизации (для каждого j). Будем считать, что функции $b_j(t)$ таковы, что решение каждой задачи не вызывает затруднений (например, $b_j(t)$ — кусочно-линейные).

Определение $\bar{\tau}^k(\pi)$ эквивалентно поиску максимальной длительности интервала $[0, t]$, для которого разрешима параметрическая задача линейного программирования

$$\min_y [c(t')y \mid Ay \leq a(t') + \sum_{i=1}^{k-1} D_i l, y \geq 0], t' \in [0; t],$$

где $D_i l$ — i -й столбец матрицы D . При разрешимости этой задачи для всех $t' \in [0; T]$ она разрешима для всех $t' \geq 0$ (т.к. $a(t') = a(T)$ при $t' > T$) и следует положить $\bar{\tau}^k(\pi) = +\infty$.

Для сформулированных правил определения $\bar{\tau}^k(\pi)$ и $\underline{\tau}^k(\pi)$ доказано утверждение, что выполняются следующие неравенства:

$$0 \leq \underline{\tau}^k(\pi) \leq \underline{\tau}^{k+1}(\pi), k=1, 2, \dots, n-1 (2.12)$$

$$0 \leq \bar{\tau}^k(\pi) \leq \bar{\tau}^{k+1}(\pi), k=1, 2, \dots, n-1 (2.13)$$

При этом, если задача (2.8) разрешима при любом $t' \in [0; T]$, то множество $\Omega(\pi)$ представимо в виде:

$$\Omega(\pi) = \{\tau \mid \tau^k \leq \tau^{k+1}, (k=1, 2, \dots, n-1);$$

$$\underline{\tau}^k(\pi) \leq \tau^k \leq \bar{\tau}^k(\pi), \tau^k \in \{[0; T], +\infty\} (k=1, 2, \dots, n)\} (2.14)$$

Из этих утверждений вытекает достаточное условие, что $\Omega(\pi) = \emptyset$, тогда и только тогда, когда существует такое k , при котором $\underline{\tau}^k(\pi) > \bar{\tau}^k(\pi)$.

Рассмотрим вместо задачи (2.9) задачу P_π , отличающуюся от (2.9) тем, что множество допустимости Ω заменено на $\Omega(\pi)$:

$$\int_0^T r(t) \Psi(t, \tau) dt + K(\tau) \Theta(T - \tau) \Rightarrow \min (2.15)$$

по τ при

$$\tau^k \leq \tau^{k+1}, (k=1, 2, \dots, n-1);$$

$$\underline{\tau}^k(\pi) \leq \tau^k \leq \bar{\tau}^k(\pi), \tau^k \in \{[0; T], +\infty\} (k=1, 2, \dots, n)$$

Пусть $\Phi^*(\pi)$ оптимальное значение целевой функции в (2.15), а $\tau^*(\pi)$ — соответствующее оптимальное решение. При $\Omega(\pi) = \emptyset$ будем считать $\Phi^*(\pi) = +\infty$.

Из равенства $\Omega = \bigcup_{\pi \in \Pi} \Omega(\pi)$ следует, что при выполнении условий

разрешимости задачи (2.9), то ее решение сводится к решению всех задач P_π при $\pi \in \Pi$. При этом, если $\min \Phi^*(\pi) = +\infty$ (по $\pi \in \Pi$), то задача (2.9) не имеет решения.

7.2. Решение подзадачи нелинейного программирования P_π

Полагаем, что

$$\Omega(\pi) \neq \emptyset, \text{ т.е. } \underline{\tau}^k(\pi) \leq \bar{\tau}^k(\pi), (k=1, 2, \dots, n).$$

Обозначаем через $I_k(\pi)$ — множество, содержащее начальные k элементов перестановки π , т.е. $I_k(\pi) = \{i^1, i^2, \dots, i^k\}$. Введем в рассмотрение функцию

$$P_k(t; \pi) = \min_y \left[c(t)y \mid Ay \leq a(t) + \sum_{i \in I_k(\pi)} D_i l, y \geq 0 \right] (2.21)$$

где, D_i — i -й столбец матрицы D .

При этом, если $k=0$, то под суммой по пустому множеству $I_0(\pi)$ будем понимать нулевой вектор соответствующей размерности. По начальным предположениям $c(t)$ и $a(t)$ непрерывны, $c(t) \geq 0$, поэтому $P_k(t; \pi)$ определена и непрерывна, если $t \in [0, \tau_{k+1}(\pi)]$ (при $t = \tau_{k+1}(\pi)$ — непрерывна справа). Определенность $P_k(t; \pi)$ в указанном интервале следует из выполнения условия разрешимости задачи линейного программирования и ограниченности целевой функции снизу ($c(t)y \geq 0$). Непрерывность следует из теоремы о непрерывной зависимости оптимального значения целевой функции задачи линейного программирования от параметра.

Если $t \in [0, \tau_1(\pi)]$, то выполняется цепочка неравенств $\tau^1 \leq \tau^2 \leq \dots \leq \tau^n$. Поэтому, используя (2.2) и (2.21), получаем

$$\Psi(t, \tau) = \begin{cases} P_0(t; \pi) & \text{при } t \in [0, \tau_1^1], \\ P_k(t; \pi) & \text{при } t \in [\tau_k^k, \tau_{k+1}^{k+1}], k = 1, \dots, n-1, \\ P_n(t; \pi) & \text{при } t \geq \tau_n^n. \end{cases} \quad (2.22)$$

Введем в рассмотрение индексы

$$q(\pi) = \max_k [k | \bar{\tau}_k(\pi) \leq T, k = 1, \dots, n], \quad (2.23)$$

$$n(\pi) = \max_k [k | \underline{\tau}_k(\pi) \leq T, k = 1, \dots, n].$$

Из (2.14) следует $q(\pi) \leq n(\pi)$, так как $\Omega(\pi) \neq \emptyset$. Если $n(\pi) < n$, то

$$\tau_k^k = \underline{\tau}_k(\pi) = \bar{\tau}_k(\pi) = +\infty, \quad k = n(\pi) + 1, \dots, n; \quad (2.24)$$

если $q(\pi) < n(\pi)$, то

$$\bar{\tau}_k(\pi) = +\infty, \quad k = q(\pi) + 1, \dots, n(\pi). \quad (2.25)$$

Вводя постоянную $\tau^0 = 0$ и используя (2.22), (2.24), (2.25), представим задачу P_π в следующем виде:

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^{q(\pi)} \int_{\tau_{k-1}^{k-1}}^{\tau_k^k} r(t) P_{k-1}(t; \pi) dt + \\ & + \int_{\tau_{q(\pi)}^{q(\pi)}}^{\min(\tau_{q(\pi)+1}^{q(\pi)+1}, T)} r(t) P_{q(\pi)}(t; \pi) dt + \sum_{k=1}^{q(\pi)} K_{i,k}(\tau_i^k) + \\ & + \sum_{k=q(\pi)+1}^{n(\pi)} K_{i,k}(\tau_i^k) \theta(T - \tau_i^k) + \\ & + \sum_{k=q(\pi)+2}^{n(\pi)} \int_{\min(\tau_{k-1}^{k-1}, T)}^{\min(\tau_k^k, T)} r(t) P_{k-1}(t; \pi) dt + \\ & + \int_{\min(\tau_{n(\pi)}^{n(\pi)}, T)}^T r(t) P_{n(\pi)}(t; \pi) dt \Rightarrow \min \end{aligned} \quad (2.26)$$

по π при выполнении условий

$$\tau_i^k \in [\underline{\tau}_k(\pi), \bar{\tau}_k(\pi)], \quad k = 1, \dots, q(\pi),$$

$$\tau_i^k \in \{[\underline{\tau}_k(\pi), T] + \infty\}, \quad k = q(\pi) + 1, \dots, n(\pi),$$

$$\tau_i^k \leq \tau_i^{k+1}, \quad k = 1, \dots, n(\pi) - 1.$$

Отметим, что по определению (2.23) $\tau_i^k = +\infty$ при $k > n(\pi)$ и поэтому такие τ_i^k не входят в (2.26).

Разделим множество допустимости в (2.26) на два непересекающихся подмножества: для первого — выполняется условие $\tau_i^{n(\pi)} \in [\underline{\tau}_{n(\pi)}(\pi), T]$, для второго —

$$\tau_i^{n(\pi)} = +\infty.$$

При этом для первого подмножества $\tau_i^k \in [\underline{\tau}_k(\pi), T]$, если $k = q(\pi) + 1, \dots, n(\pi)$, поскольку значение $+\infty$ при $k < n(\pi)$ запрещается конечным значением $\tau_i^{n(\pi)}$ и неравенствами

$$\tau_i^k \leq \tau_i^{k+1}, \quad k = 1, \dots, n(\pi) - 1.$$

Аналогичным образом разделим второе подмножество, выбирая в качестве индекса «переменной разделения» последний элемент в перестановке π , для которого значение переменной не фиксировано на $+\infty$, а область допустимости для нее содержит $+\infty$ и т.д. Такое последовательное разбиение на подмножества заканчивается на «переменной разделения» $\tau_i^{q(\pi)+1}$. В результате множество допустимости в (2.26) разделяется на $n(\pi) - q(\pi) + 1$ непересекающихся подмножеств и

решение (2.26) сводится к решению $n(\pi) - q(\pi) + 1$ задач следующего вида:

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^q \int_{\tau_{k-1}^{k-1}}^{\tau_k^k} r(t) P_{k-1}(t; \pi) dt + \int_{\tau_q^q}^T r(t) P_q(t; \pi) dt + \sum_{k=1}^q K_{i,k}(\tau_i^k) \Rightarrow \\ & \Rightarrow \min_{\tau} (\Phi^*(\pi, q)) \end{aligned} \quad (2.27)$$

$$\text{при } \tau_i^k \in [\underline{\tau}_k(\pi), \bar{\tau}_k(\pi)], \quad k = 1, \dots, q;$$

$$\tau_i^k \leq \tau_i^{k+1}, \quad k = 1, \dots, q-1.$$

где значения параметра q последовательно принимают значения от $q(\pi)$ до $n(\pi)$, $\bar{\tau}_k(\pi) = T$ (вместо $+\infty$) при $k = q(\pi) + 1, \dots, q$. При этом остальные переменные $\tau_i^k = +\infty$ ($k = q+1, \dots, n$).

Решение задачи P_π вида (2.26) соответствует решению (2.27) при значении параметра

$$q^*(\pi) = \arg \min_q [\Phi^*(\pi, q) | q = q(\pi), q(\pi) + 1, \dots, n(\pi)] \quad (2.28)$$

Рассмотрим задачу (2.27) при некотором значении параметра q . Удобно при выявлении локальных минимумов этой задачи рассматривать вместо (2.27) последовательность вспомогательных задач.

Первая вспомогательная задача формируется из (2.27) при отбрасывании неравенств $\tau_i^k \leq \tau_i^{k+1}$, $k = 1, \dots, q-1$. Для нахождения ее решения следует вычислить частные производные целевой функции в (2.27) по τ_i^k , которые обозначим через $\Phi_i^k(\tau_i^k)$:

$$\Phi_i^k(\tau_i^k) = r(\tau_i^k) \{P_{k-1}(\tau_i^k; \pi) - P_k(\tau_i^k; \pi)\} - [K_{i,k}(\tau_i^k) / r(\tau_i^k)] \quad (2.29)$$

и исследовать поведение каждой $\Phi_i^k(\tau_i^k)$ в соответствующем интервале $[\underline{\tau}_k(\pi), \bar{\tau}_k(\pi)]$. Отметим, что $\Phi_i^k(\tau_i^k)$ непрерывна в силу свойств функций $P_k(t; \pi)$ и предположений о функциях $K_i(\pi)$.

Решение сформированной вспомогательной задачи для переменной τ_i^k легко находится в следующих случаях:

1. $\Phi_i^k(\tau_i^k) \geq 0$ при $\tau_i^k \in [\underline{\tau}_k(\pi), \bar{\tau}_k(\pi)]$, тогда $\hat{\tau}_i^k = \underline{\tau}_k(\pi)$;
2. $\Phi_i^k(\tau_i^k) \leq 0$ при $\tau_i^k \in [\underline{\tau}_k(\pi), \bar{\tau}_k(\pi)]$, тогда $\hat{\tau}_i^k = \bar{\tau}_k(\pi)$.

При этом мы полагаем, что случай $\Phi_i^k(\tau_i^k) \equiv 0$ при $\tau_i^k \in [\underline{\tau}_k(\pi), \bar{\tau}_k(\pi)]$ не встречается, тогда $\hat{\tau}_i^k$ — любое число из указанного интервала.

Если эти случаи не имеют места, то следует найти стационарные точки целевой функции для переменной τ_i^k в $[\underline{\tau}_k(\pi), \bar{\tau}_k(\pi)]$ из уравнения

$$\Phi_i^k(\tau_i^k) = 0 \quad (2.30)$$

и выделить среди них точки локальных минимумов. Кроме того к точкам локальных минимумов следует отнести $\underline{\tau}_k(\pi)$, если $\Phi_i^k[\underline{\tau}_k(\pi)] > 0$, и $\bar{\tau}_k(\pi)$, если $\Phi_i^k[\bar{\tau}_k(\pi)] < 0$. Будем предполагать, что точки локальных минимумов по переменной τ_i^k образуют конечное множество $\{\hat{\tau}_i^{(l)} | l \in L_{i,k}(\pi)\}$. Среди найденных точек локальных минимумов вспомогательной задачи надо

отобрать такие, для которых выполняются условия $\tau_i^k \leq \tau_i^{k+1}$, $k = 1, \dots, q-1$. Если при этом пришлось отсеять некоторую последовательность локальных минимумов, так как $\exists s: \tau_i^{(s)} > \tau_i^{(s+1)}$, то следует рассмотреть другую вспомогательную задачу, добавив условие $\tau_i^s = \tau_i^{s+1}$.

Таким образом можно найти решение задачи нелинейного программирования (2.6). Однако для этого требуется решить задачу P_* для всех перестановок индексов переменных $1, 2, \dots, n$. Число таких перестановок $n!$ обычно велико, поэтому полный перебор нецелесообразен. Следует организовать ограниченный перебор с отсечением множества перестановок, используя схему последовательной декомпозиции. Применим эту схему для решения исходной задачи (2.6). С точки зрения последовательной декомпозиции, разделение исходной задачи на задачи P_* ($\pi \in \Pi$) вида (2.15) представляет собой разделение на концевые задачи, так как для каждой задачи можно организовать процесс решения. Понятно, что такое конечное разделение не следует делать сразу.

В качестве задач, получающихся при разделении исходной задачи вида (2.6) будем рассматривать более широкий класс задач P_S , где $S = (i_1, i_2, \dots, i_l)$ представляет собой последовательность различных индексов переменных и символ S указывает на объединение всех перестановок $\pi \in \Pi$, первые l элементов которых образуют последовательность S . Если $S = \emptyset$, то такой символ указывает на объединение всех перестановок $\pi \in \Pi$, т.е. $P_\emptyset$ – исходная задача (2.6). Если $l=n$, то S – некоторая перестановка индексов переменных.

Задача P_S имеет вид (при $l \geq 1$)

$$\Phi = \int_0^T r(t) \Psi(t, \tau) dt + K(\tau) \Theta(T-\tau) \Rightarrow \min (= \Phi^*(S)) \quad (2.31)$$

по τ при

$$\tau \in \Omega_S$$

$$\tau^1 \leq \tau^2 \leq \dots \leq \tau^l, \tau^l \leq \tau \quad (i \notin \{i^1, i^2, \dots, i^l\}).$$

Множество допустимости задачи P_S является объединением всех множеств допустимости $\Omega(\pi)$ для перестановок π , первые l элементов которых образуют последовательность S .

Поэтому можно представить в следующем эквивалентном виде:

$$\Phi = \int_0^T r(t) \Psi(t, \tau) dt + K(\tau) \Theta(T-\tau) \Rightarrow \min (= \Phi^*(S)) \quad (2.31')$$

по $\tau \in \Omega$ при

$$\tau^k \in [\tau_k(\pi_S), \bar{\tau}_k(\pi_S)] \cap \{[0, T], +\infty\}, k = 1, \dots, l,$$

$$\tau^1 \leq \tau^2 \leq \dots \leq \tau^l, \tau^l \leq \tau \quad (i \notin \{i^1, i^2, \dots, i^l\}).$$

Правило разделения задачи P_S при $l \neq n$ формулируется следующим образом: P_S разделяется на $n-l$ задач $P_{S \circ i}$, где $i \notin \{i^1, i^2, \dots, i^l\}$, $S \circ i = (i^1, i^2, \dots, i^l, i)$.

При $l = n-2$ разделяется на две концевые задачи: $P_{S \circ i}$ и $P_{(S \circ i) \circ i'}$, где $\{i', i''\} = \Pi \setminus \{i^1, i^2, \dots, i^l\}$.

При разделении P_S в соответствии (2.14) и следствием из него, можно выявить неразрешимость задачи $P_{(S \circ i)}$, если выполняется неравенство:

$$\tau_{i+1}(\pi_{S \circ i}) > \bar{\tau}_{i+1}(\pi_{S \circ i}). \quad (2.32)$$

Такие задачи следует сразу отсеять, не помещая их в список задач.

Может оказаться, что все непосредственные потомки задачи P_S неразрешимы. Тогда P_S является концевой задачей, причем она тоже неразрешима и должна быть отсеяна из списка. Следует считать концевой и задачу P_S , если $\tau_i(\pi_S) = \bar{\tau}_i(\pi_S) = +\infty$ (т.к. ее оптимальное решение находится прямым методом, описанным выше), а также если $l=n$.

Задача P_S является полуконцевой, если $\tau_i(\pi_S) \leq T$, $\bar{\tau}_i(\pi_S) = +\infty$. Ее допустимое решение можно найти, положив $\bar{\tau}_i(\pi_S) = T$, $\tau_i = +\infty$ при $i \notin \{i^1, i^2, \dots, i^l\}$ и используя прямой метод решения.

Чтобы перейти к построению оценочной задачи $\tilde{P}_S$ для неконцевой задачи P_S представим (2.31) как задачу с явным фигурированием нецелочисленной переменной $y(t)$. Для этого в (2.1) добавим условия

$$\tau^k \in [\tau_k(\pi_S), \bar{\tau}_k(\pi_S)] \cap \{[0, T], +\infty\}, k = 1, \dots, l, \quad (2.33)$$

$$\tau^1 \leq \tau^2 \leq \dots \leq \tau^l, \tau^l \leq \tau \quad (i \notin \{i^1, i^2, \dots, i^l\}).$$

Если переписать в виде целочисленной динамической задачи оптимизации используя новые переменные, условия (2.33) принимают вид:

$$\theta[t - \bar{\tau}_k(\pi_S)] \leq x^k(t) \leq \theta[t - \tau_k(\pi_S)], k = 1, \dots, l, \quad (2.34)$$

$$x^1(t) \geq x^2(t) \geq \dots \geq x^l(t), x^l(t) \geq x_i(t) \quad (i \notin \{i^1, i^2, \dots, i^l\}).$$

Тогда задача P_S примет вид:

$$\Phi = \int_0^T r(t) [y(t) c(t) dt - \dot{\kappa}(t) x(t)/r(t)] + K(T) x(T) \Rightarrow \min (= \Phi^*)$$

по $y(t), x(t)$ при (2.35)

$$Ay(t) \leq a(t) + Dx(t), y(t) \geq 0,$$

$$Bx(t) \leq b(t), x(t) \leq \Theta[t - \Delta],$$

$$\theta[t - \bar{\tau}_k(\pi_S)] \leq x^k(t) \leq \theta[t - \tau_k(\pi_S)], k = 1, \dots, l,$$

$$x^1(t) \geq x^2(t) \geq \dots \geq x^l(t), x^l(t) \geq x_i(t) \quad (i \notin \{i^1, i^2, \dots, i^l\}).$$

$$x_i(t) \in \{0, 1\} \text{ неубывающая } i = 1, \dots, n.$$

Используя (2.35), можно построить оценочную задачу $\tilde{P}_S$. Расширив область допустимости, можно получить задачу существенно проще в вычислительном отношении, чем (2.35). Сделаем замену ограничения:

$$x_i(t) \in \{0, 1\} \text{ неубывающая, } i = 1, \dots, n$$

на

$$0 \leq x_i(t) \leq 1, i = 1, \dots, n,$$

и используем тождество:

$$\kappa_i(\tau_i) \theta(T - \tau_i) = \int_0^T [-\dot{\kappa}_i(t)] \theta(t - \tau_i) dt + \kappa_i(T) \theta(T - \tau_i)$$

$$\text{при } (\tau_i \geq 0)$$

Оценочная задача $\tilde{P}_S$ принимает вид:

$$\Phi = \int_0^T r(t) [y(t) c(t) dt - \dot{\kappa}(t) x(t)/r(t)] + K(T) x(T) \Rightarrow \min (= \Phi^*)$$

по $y(t)$, $x(t)$ при (2.36)

$$Ay(t) \leq a(t) + Dx(t), y(t) \geq 0,$$

$$Bx(t) \leq b(t), x(t) \leq \Theta[t-\Delta],$$

$$\theta[t-\tau_k(\pi_s)] \leq x^k(t) \leq \theta[t-\tau_k(\pi_s)], k = 1, \dots, l,$$

$$x^1(t) \geq x^2(t) \geq \dots \geq x^l(t),$$

$$x^i(t) \geq x_i(t) \quad (i \in \{i^1, i^2, \dots, i^l\}).$$

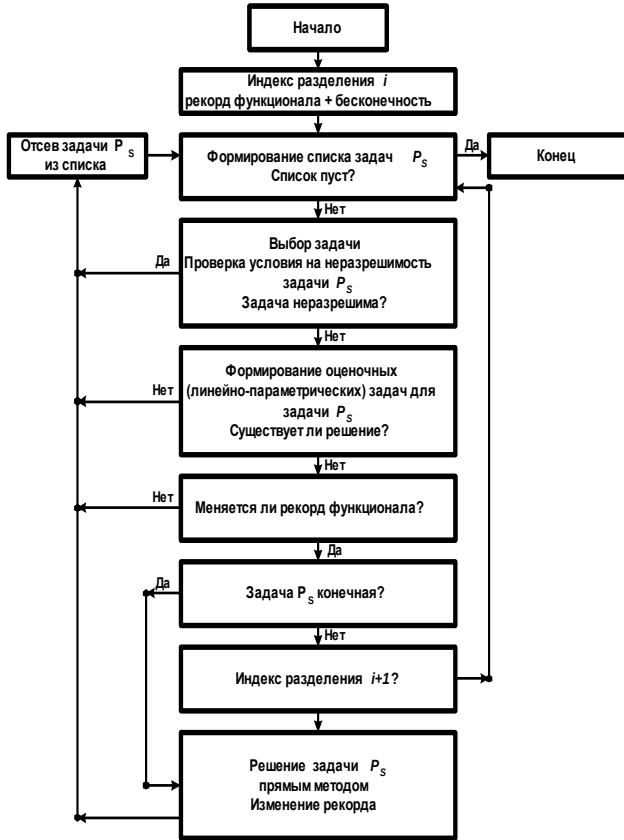


Рис. 5. Общая схема поиска решения исходной задачи при прямой декомпозиции

Если полагать $r(t) > 0$, то решение (2.36) сводится к решению следующей параметрической задачи линейного программирования (параметр $0 \leq t \leq T$):

$$\varphi = y(t) c(t) dt - \int_0^T x(t) r(t) dt \Rightarrow \min (= \tilde{\varphi}^*(t; S)) \quad (2.37)$$

по $y(t)$, $x(t)$ при

$$Ay(t) \leq a(t) + Dx(t), y(t) \geq 0,$$

$$Bx(t) \leq b(t), x(t) \leq \Theta[t-\Delta],$$

$$\theta[t-\tau_k(\pi_s)] \leq x^k(t) \leq \theta[t-\tau_k(\pi_s)], k = 1, \dots, l,$$

$$x^1(t) \geq x^2(t) \geq \dots \geq x^l(t), x^i(t) \geq x_i(t) \quad (i \in \{i^1, i^2, \dots, i^l\}).$$

и обычной задачи линейного программирования:

$$\eta = K(T) x(T) \Rightarrow \min (= \tilde{\eta}^*(S)) \quad (2.38)$$

по y , x при

$$Ay \leq a(T) + Dx, y \geq 0, x \geq 0;$$

$$Bx \leq b(T), x_i \leq 1, (i = 1, \dots, n);$$

$$\theta[t-\tau_k(\pi_s)] \leq x^k(t), (k = 1, \dots, l);$$

$$x^1 \geq x^2 \geq \dots \geq x^l, x^i \geq x_i \quad (i \in \{i^1, i^2, \dots, i^l\}).$$

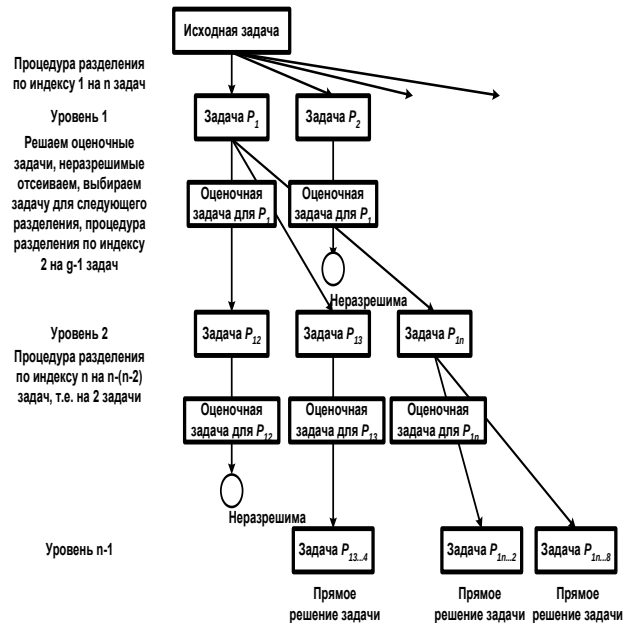


Рис. 6. Дерево поиска решения

При неразрешимости задачи (2.37) хотя бы при одном t ($0 \leq t \leq T$) задача $\tilde{P}_s$ неразрешима и следовательно неразрешима задача P_s . При разрешимости (2.37) при всех t имеем оценку снизу для функционала:

$$\tilde{\varphi}^*(S) = \int_0^T r(t) \tilde{\varphi}^*(t; S) dt + \tilde{\eta}^*(S).$$

Схематично алгоритм поиска оптимального решения представлен на рис. 5.

Основная схема поиска оптимального решения для общей динамической задачи (2.1), основанная на базе последовательной декомпозиции исходной задачи, представлена на рис. 6.

7.3. Особенности реализации алгоритма поиска решения

Правило выбора задачи из списка носит эвристический характер и жестко не определено.

При формировании функции приоритета $h(P_{s,i})$ для задач списка Z можно использовать приоритеты w_i для индексов переменных τ_i , которые определяются следующим образом. Пусть в результате решения оценочной задачи $\tilde{P}_s$, $s = (i_1, \dots, i_l)$, найдена оптимальная для (2.36) вектор-функция $\hat{x}(t; s)$. Тогда под значением приоритета w_i для $i \in \{i_1, \dots, i_l\}$ можно понимать

$$w_i(s) = \begin{cases} +\infty, & \text{если } \hat{x}_i(t; s) \equiv 0, \text{ при } t \in [0, T]; \\ T - \int_0^T \hat{x}_i(t; s) dt & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (3.1)$$

Отметим, что $\hat{x}_i(t; s) = \theta[t - \tau_i(s)]$ и $w_i(s) = \tau_i(s)$, если функция $\hat{x}_i(t; s)$ оказалась целочисленной и неубывающей. Поэтому приоритет имеет смысл оценки момента скачка функции $x_i(t)$ на основании решения оценочной задачи.

После разделения P_s на задачи $P_{s,i}$, $i \in \{i_1, \dots, i_l\}$, в список попадают лишь те задачи, для которых не выполняется неравенство (2.32). Обозначим соответствующее множество индексов i через $\bar{i}(s)$. Функцию приоритета определим так:

$$h(P_{s,i}) = w_i(s), \quad i \in \bar{i}(s).$$

Если основное значение в алгоритме имеет оценивание, то выбор происходит среди задач-потомков P_s , т.е. множество альтернатив $A(Z) = \{P_{s,i} | i \in \bar{i}(s)\}$. Выбирается задача с минимальным значением функции приоритета. При отсеивании P_s выбор происходит среди задач, имеющих того же непосредственного предка, что и P_s .

Если предусматривается алгоритмом активное использование доминирования при отсеивании, то выбор происходит среди всех задач списка Z , т.е. $A(Z) = Z$. При разделении задачи P_s без решения оценочной задачи $\tilde{P}_s$ в качестве приоритетов следует брать те же самые величины, что и для непосредственного предка P_s . Для задания системы приоритетов в общем случае достаточно решить оценочную задачу $\tilde{P}_s$.

8. Пример численного моделирования ВИНК

В основу численного моделирования ВИНК была положена реально существующая нефтяная компания. В тоже время, по определенным соображениям состав этой компании несколько изменен, а отдельные исходные данные для расчетов специально искажены, в связи с чем результаты не могут служить основой для практических рекомендаций, по этой же причине не приводим полных результатов расчетов.

Для каждого региона определены пункты H (производства, переработки и потребления), в которых рас-

положены соответствующие предприятия. Определено некоторое множество агрегированных продуктов, производимых и/или потребляемых на данных предприятиях и в данных регионах. Расчеты проводились при числе таких продуктов равном 7. Множество E_h всех предприятий в каждом регионе разбивается на два непересекающихся подмножества: действующих E_h^0 и новых, которые можно построить, E_h^1 . На множестве E_h подготовлена транспортная сеть, в которую добавлены также пункты конечного потребления. Сеть содержит 28 вершин и 392 дуги. Большое количество дуг связано со спецификой задачи, т.к. в ее основе лежит трубопроводная транспортная сеть, отдельная для каждого вида продукта. Отметим, что она включает в себя 77 дуг возможной транспортировки нефти, 144 дуги возможной транспортировки газа, а остальные предназначены для транспортировки светлых и темных нефтепродуктов. Следует заметить также, что сеть уже включает в себя 8 новых вершин, предполагаемых к строительству, и 206 новых дуг возможных направлений транспортировок. Полная сеть состоит как бы из нескольких слоев, каждый из которых соответствует своему типу продукта, либо транспорта. Отдельные слои связаны между собой в местах расположения НПЗ, перевалочных пунктов, нефтебаз. По виду функций затрат транспортировки продукта по дуге $f_{ihh'}(t, v_i)$ все дуги могут быть разбиты на три группы.

Функции затрат первой из них аппроксимируются непрерывной кусочно-линейной зависимостью. В простом случае можно ограничиться формулой $f(t, v_i) = p(t) + s(t) \cdot v_i$. В более сложных случаях, кусочно-линейная зависимость от объема транспортируемого продукта (выпуклая вниз) определяется следующим образом: по аналогичной формуле, но не для всего диапазона возможных объемов транспортировки продукта, а для только для части этого диапазона (некоторый интервал). Для разных интервалов определены разные коэффициенты $s(t)$ постоянного наклона функции затрат, кроме того они имеют одинаковую постоянную составляющую $p(t)$. Дуги этой группы соответствуют существующим нефтепроводам, перевалочным нефтебазам и существующим крупным звеньям нефтепродуктопроводов. Примерно похожим образом формируются затраты и на производящих элементах.

Функции затрат дуг второй группы аппроксимируются линейной с разрывом в нулевой точке зависимостью:

$$f(t, v_i) = s \cdot v_i + p \cdot \text{sign } v_i.$$

Дуги этой группы хорошо соответствуют будущим, возможным звеньям единой транспортной сети – нефтепроводам, крупным нефтепродуктопроводам.

Функции затрат третьей группы прямопропорциональны объемам перекачки продуктов: $f(t, v_i) = s \cdot v_i$.

Эта группа соответствует операциям железнодорожного, автомобильного и морского видов транспорта.

Задача была сформулирована для достаточно большой сети. Однако, практическое решение ее связано со значительными трудностями, связанными прежде всего, с большой размерностью сети, значительным объемом необходимой исходной информации. Практически, подобную задачу целесообразно решать на двух уровнях: первый – укрупненная существующая транспортная сеть с необходимым числом альтернативных видов транспорта и направлений (существующих и возможных) транс-

портировки, второй – детальное моделирование локальных сетей на уровне отдельных регионов или элементов розничного сбыта типа НПО (нефтепродуктообеспечения). В качестве потребителей на укрупненной сети могут рассматриваться область или небольшая республика. После решения на укрупненной сети можно перейти к определению оптимальной сети отдельных регионов. Здесь входные потоки выступают в виде фиктивных источников.

Решение задачи позволяет ответить на вопрос выбора целесообразных проектов и моментов их ввода, направлений транспортировки в перспективе, оптимального взаимодействия производства и инфраструктуры (рис. 7)

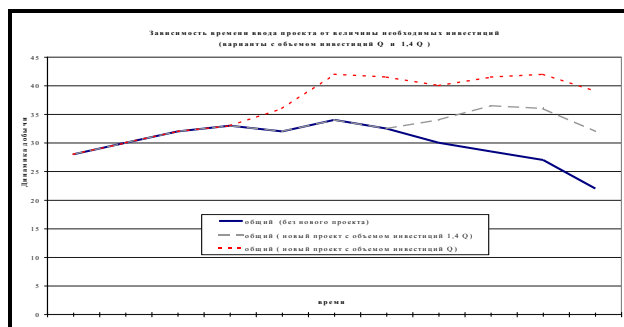


Рис. 7. Зависимость времени ввода проекта от величины необходимых инвестиций

Целью другой частной задачи являлось определение стоимости (по критерию оптимизации для модели) каждого отдельного элемента как новых, так и действующих. Отличительной чертой и основной проблемой подобных практических постановок задач является трудоемкость учета системных (синергических) эффектов.

Учет сложности системы в целом и отдельных ее подсистем: все они состоят из большого числа взаимосвязанных элементов, причем число типов этих элементов тоже достаточно велико. Взаимодействие отдельных подсистем между собой, наличие у них собственных 'интересов', целей и критериев оценки, экономического механизма функционирования и т.д. обуславливают появление системных (синергических) эффектов. При анализе сложных многоуровневых систем учет синергических эффектов очень важен потому, что в таких системах ориентация на локальные выгоды подсистем может приводить к решениям, не выгодным для системы в целом. Наличие таких эффектов приводит к тому, что эффект по системе в целом может не совпадать с суммой эффектов по отдельным составляющим ее частям; в этом непосредственно проявляется свойство целостности (эмерджентности) сложных систем. Существенной составляющей синергических эффектов являются также эффекты концентрации, специализации производства и др.

Данный вариант задачи основывается на максимально допустимой агрегации описания ВИНК как по числу регионов, так и по транспортным сетям с учетом слабо формализуемых ограничений. В описании участвовало 22 производственных элемента, расположенных на транспортной сети, состоящей из 9 вершин и 63 дуг. Состав производимых и потребляемых продуктов, а также удельные характеристики производственных элементов остались без существенных изменений. Транспортная сеть была агрегирована из

более детального описания первой задачи. Фактически этот вариант можно считать первым уровнем предыдущей задачи.

Таблица 3

**Ранжировка очередности проектов
а) по чистому дисконтированному доходу**

Проект	Суммарные инвестиции	ЧДД проекта, %				
		7	10	12.5	15	18
Элемент 2	12 000	8 110	5 600	1 310	1 000	730
Элемент 20	1 750	4 900	2 900	4 150	3 100	2 190
Элемент 12	1 910	3 800	1 830	630	500	380
Элемент 16	2 499	3 270	1 740	-115	-100	-84
Элемент 10	1 315	2 800	1 700	0	-20	-50
Элемент 22	2 300	2 670	1 540	-60	-50	-40
Элемент 1	8 350	2 450	1 230	660	400	200
Элемент 19	1 555	1 760	1 130	-60	-67	-70
Элемент 7	1 900	1 660	1 030	100	-20	-100
Элемент 21	1 700	1 580	930	640	315	110
Элемент 14	1 460	1 480	840	-83	-110	-125
Элемент 3	2 000	1 140	820	860	450	180
Элемент 9	4 806	570	270	0	-30	-50
Элемент 17	565	400	260	680	520	390
Элемент 18	640	384	225	90	50	20
Элемент 15	465	330	160	1 180	770	450
Элемент 5	1 681	130	50	210	170	137
Элемент 13	629	80	30	158	120	90
Элемент 11	1 559	30	-44	840	660	510
Элемент 8	1 219	-30	-50	1 990	1 410	950
Элемент 6	230	-85	-70	520	330	185
Элемент 4	246	-170	-136	1 040	730	470

б) по удельной отдаче на инвестиции

Проект	Суммарные инвестиции	ЧДД / инвестиции при (%)				
		7	10	12.5	15	18
Элемент 12	1 910	4.42	2.66	1.65	1.05	0.53
Элемент 10	1 315	3.89	2.12	1.31	0.77	0.31
Элемент 20	1 750	3.86	2.57	1.91	1.47	1.08
Элемент 19	1 555	2.20	1.79	1.59	1.47	1.38
Элемент 14	1 460	2.03	1.65	1.46	1.34	1.22
Элемент 22	2 300	2.02	1.42	1.11	0.88	0.66
Элемент 16	2 499	1.92	1.26	0.91	0.66	0.44
Элемент 21	1 700	1.66	1.09	0.78	0.55	0.36
Элемент 7	1 900	1.33	0.96	0.69	0.46	0.26
Элемент 18	640	1.30	1.00	0.86	0.79	0.73
Элемент 15	465	1.27	0.73	0.48	0.30	0.14
Элемент 2	12 000	1.24	1.05	0.90	0.78	0.63
Элемент 3	2 000	1.21	1.14	1.07	1.02	0.95
Элемент 17	565	1.21	1.00	0.89	0.83	0.77
Элемент 1	8 350	0.53	0.46	0.41	0.36	0.31
Элемент 9	4 806	0.23	0.13	0.06	-0.01	-0.08
Элемент 13	629	0.21	0.09	0.00	-0.11	-0.21
Элемент 5	1 681	0.14	0.07	0.00	-0.04	-0.10
Элемент 11	1 559	0.03	-0.06	-0.13	-0.19	-0.25
Элемент 8	1 219	-0.05	-0.09	-0.13	-0.17	-0.21
Элемент 6	230	-0.69	-0.71	-0.71	-0.69	-0.64
Элемент 4	246	-1.24	-1.21	-1.18	-1.17	-1.14

В приводимой ниже табл. 3 результатов расчета порядок (очередность) наименований производственных элементов дан в соответствии с экспертными (до расчетными) оценками эффективности данных элементов или оценками, полученными на основе стандартных методик расчета эффективности отдельно взятого проекта или предприятия. Сначала перечислялись действующие предприятия, затем новые (они выделены курсивом).

Расчет по модели и ранжировка проектов в соответствии с полученными результатами показывают существенно другую картину, что говорит о значительном

взаимном влиянии производственных элементов на конечный результат совместной оптимизации. Табл. 4 показывает зависимость результатов расчетов от взятого коэффициента дисконтирования.

Таблица 4
Проекты новые и действующие
Суммарные инвестиции в проект и чистый дисконтированный доход
за период 2001-2020 г.

\$ млн

Проект	Суммарные инвестиции	ЧДД проекта, %				
		7	10	12.5	15	18
Элемент 1	8 350	2 450	1 740	1 310	1 000	730
Элемент 2	12 000	8 110	5 600	4 150	3 100	2 190
Элемент 3	2 000	1 140	820	630	500	380
Элемент 4	246	-170	-136	-115	-100	-84
Элемент 5	1 681	130	50	0	-20	-50
Элемент 6	230	-85	-70	-60	-50	-40
Элемент 7	1 900	1 660	1 030	660	400	200
Элемент 8	1 219	-30	-50	-60	-67	-70
Элемент 9	4 806	570	260	100	-20	-100
Элемент 10	1 315	2 800	1 230	640	315	110
Элемент 11	1 559	30	-44	-83	-110	-125
Элемент 12	1 910	3 800	1 700	860	450	180
Элемент 13	629	80	30	0	-30	-50
Элемент 14	1 460	1 480	930	680	520	390
Элемент 15	465	330	160	90	50	20
Элемент 16	2 499	3 270	1 830	1 180	770	450
Элемент 17	565	400	270	210	170	137
Элемент 18	640	384	225	158	120	90
Элемент 19	1 555	1 760	1 130	840	660	510
Элемент 20	1 750	4 900	2 900	1 990	1 410	950
Элемент 21	1 700	1 580	840	520	330	185
Элемент 22	2 300	2 670	1 540	1 040	730	470

Практика разработки схем развития ВИНК показывает значительную неопределенность исходной информации. Это касается в наибольшей степени следующих групп данных.

1. Характеристики перспективных объектов нефтедобычи и переработки
2. Размеры и динамика потребления нефти и нефтепродуктов по регионам
3. Динамика экспортных и внутренних цен на продукты
4. Изменение эксплуатационных характеристик из-за влияния НТП, перспективное оборудование и его характеристики.
5. Капитальные вложения и эксплуатационные расходы (их взаимозависимость) в перспективе по действующим производственным и транспортным объектам
6. Перспективное расположение и товаропоток объектов конечного сбыта.

Данные первой группы основываются на прогнозах и предположениях по разработке новых перспективных месторождений и возможных проектах реконструкции действующих (или строительства новых) НПЗ. Реализация этих предложений в перспективе, в основном, определяется динамикой финансовых ограничений на объем капитальных вложений. Причем объем и динамика финансовых ограничений зависят от многих факторов и предугадать более менее точно для отдаленной перспективы невозможно. Практически очень сложно предугадать точное поведение внутренних и внешних цен (третья группа данных), которые определяются мировым рынком и от которых сильно зависит

вторая и шестая группы данных. Неопределенность четвертой и пятой групп вызвана неизбежными ошибками в прогнозировании научно-технического прогресса в производстве. Кроме того данные зависят от внешнего окружения (как то конкуренты, подрядчики и т.п.). Шестая группа данных вообще сильно определяется динамикой развития всей экономики страны и ее структурными характеристиками.

Поэтому для корректной работы с данными следующим шагом предполагается модифицировать модель для работы в условиях неопределенности. Для прогнозных данных будет рассматриваться диапазон возможных изменений, а функционал будет рассчитываться как ожидаемая величина (в математическом смысле) и таким образом не будет изменяться от конкретного значения точно неизвестных показателей.

Литература

1. Многоуровневые модели перспективного планирования (Внутренние и внешние связи отраслевых систем)/ под ред. А.М. Алексеева. М.: Экономика 1978.
2. Аганбегян А.Г., Багриновский К.А., Гранберг А.Г. Система моделей народнохозяйственного планирования. М.: Мысль, 1973.
3. Моделирование формирования территориально-производственных комплексов. Новосибирск: Наука 1976.
4. Многоуровневые системы отраслевой оптимизации / под ред. Л.А. Козлова и З.Р. Цимдиной. -Новосибирск: Наука 1975г.
5. Алекперов В.Ю. Вертикально интегрированные нефтяные компании России. Москва 1996г.
6. Астанина Л.А., Волконский В.А. Итеративный метод декомпозиции многоотраслевой модели и его экспериментальное использование// Экономика и математические методы. 1975. Т. XI, вып. 1. стр. 83-98.
7. Иванилов Ю.П. Лотов А.В. Математические модели в экономике. М.: Наука, 1979.
8. Уздемир А.П. Динамическое размещение производств I //Автоматика и телемеханика 1979 — №11.
9. Иоффе В.И. Калякин Б.Н. Динамическая постановка задачи оптимизации структуры производства и применения пластмасс и методы ее решения // Экономика и математические методы. 1974 — Т. X. Вып. 5. стр 928-934.
10. Шафранский В.В. Математические модели и методы планирования развития отраслей промышленности. М.: Наука, 1984г.
11. Алекперов В.Ю. О новых направлениях развития вертикально интегрированных нефтяных компаний России // Нефтяное хозяйство — 1997 №4
12. Кочетков А.В. Рожина Ю.Н. Надо менять пропорции // Нефть России 1997 №12(37). стр. 14-15.
13. Кочетков А.В. Ключ к конкурентоспособности // Нефть России 1996 №6(20).
14. Лившиц В.Н. Оптимизация при перспективном планировании и проектировании. М.: Экономика 1983г.
15. Михалевич В.С. Кукса А.И. Методы последовательной оптимизации в дискретных сетевых задачах оптимального распределения ресурсов. М.: Наука, 1983.
16. Уздемир А.П. Динамические целочисленные задачи оптимизации в экономике. М.: Физматлит, — 1995г.
17. Лившиц В.Н. Системный анализ экономических процессов на транспорте М.: Транспорт — 1986г.
18. Белоусова Н.И. и др. Системный анализ инфраструктуры как элемента народного хозяйства / препринт М.: ВНИИСИ 1981г.
19. Швецов А.Н. Лексин В.Н. Государство и регионы: Теория и практика государственного регулирования территориального развития / УРСС М. -1997г.
20. Коссов В.В. 'Межотраслевые модели (теория и практика использования)'. — М.: Экономика. -1973г.

21. Моисеев Н.Н. 'Математические модели экономической науки'. — М.: Знание, -1973г.
22. Коссов В.В. 'Экономико-математическая модель территориального планирования// Математические методы и проблемы размещения производства. — М.: Экономиздат, — 1963г.
23. Канторович Л.В. Глобенко И.Г. 'Однопродуктовая динамическая модель при наличии мгновенной превращаемости фондов'.- ДАН СССР.-1967г. Т. 174, №3.
24. Краснощеков П.С., Петров А.А. 'Принципы построения моделей'.- М.: Изд-во МГУ. -1983г.
25. Петров А.А. 'Математическое моделирование экономического развития'.- М.:Знание -1984г.
26. Петров А.А. Пospelов И.Г. 'Системный анализ развивающейся экономики: многосекторная модель и учет природных ресурсов III// Изв. АН. СССР. Техническая кибернетика. — 1979г. — №3.
27. Интрилигатор М. 'Математические методы оптимизации и экономическая теория. - М.: Прогресс.- 1975.
28. Оптимальное территориально-производственное планирование/ Под ред. А.Г. Аганбегяна и Д. М. Казакевича.- Новосибирск: Наука, 1970.
29. Козлов Л.А. 'Оптимальное планирование развития и размещения отраслей промышленности'. — Новосибирск: Наука, 1970.
30. Серов С.С., Уздемир А.П. Динамическая задача размещения предприятий отрасли и численный метод ее решения. I//Автоматика и телемеханика. — 1976.- №4.
31. Хачатуров В.Р., Астахов Н.Д. 'Динамические задачи размещения (модели и методы)// Экономика и математические методы. -1976.-Т. XII, вып.1.
32. Хачатуров В.Р., Астахов Н.Д., Григорьев В.В. 'Алгоритмы определения оптимальной совокупности отраслевых вариантов размещения предприятий с учетом эффекта агломерации'/ ВЦ АН СССР.- Препринт.- М., 1984.
33. Методические положения оптимального отраслевого планирования в промышленности' / под ред. Аганбегяна, Л.А. Козлова и Д.М. Казакевича.- Новосибирск: Наука, 1972.
34. Типовая методика расчетов по оптимизации развития и размещения производств на перспективу// Экономика и математические методы. -1977. -Т. XIII, вып. 6.
35. Суворов Б.П. 'Оптимизация текущего планирования нефтеперерабатывающего производства.' — М.: Наука, 1974.
36. Белухин В.П., Рушайло Б.Б., Соболев О.С. 'Параметрическое разложение задачи календарного планирования и управления химико-технологическим комплексом'// Вопросы промышленной кибернетики (труды ЦНИИКА). 1975. — Вып. 44.
37. Кривенко Ю.П. Модели производства с учетом динамики оборотных фондов.// Экономика и математические методы. -1972.-Т. VIII, вып.1.
38. Первозванский А.А. Математические методы в управлении производством. — М.: Наука, 1975.
39. Шенброт И.М., Андропов М.В., Ромм В.С., 'Оперативно-календарное планирование химических производств в автоматизированных системах управления'. -М.: Химия, 1977.
40. Кофман А., Дебазей Г. 'Сетевые методы планирования и их применение'. -М.: Прогресс, 1968.
41. Некрасов А.С., Крестина Ю.С. Модель размещения электростанций // Экономика и математические методы. — 1974 — Т. X, вып. 6.
42. Филимонова Е.И., Чурашев В.Н. Вопросы совершенствования перспективного планирования в угольной промышленности // Оптимальное планирование развития и размещения отраслей промышленности. — Новосибирск: ИЭОПП СО АН СССР, 1972. — Ч.1.
43. Investments for Capacity Expansion: Size, Location and Time-Phasing / A.S. Manne, Ed. — Cambridge, Mass.: The MIT Press, 1967.
44. Benders J.F. Partitioning Procedures for Solving Mixed-Variables Programming Problems // Numerische Mathematik. —1962 V. 4, № 3.
45. Erlenkotter D. Preinvestment Planning for capacity Expansion: a Multi-Location Dynamic Model. —New Dehli, India: Agency for International Development, 1970.
46. Erlenkotter D. Sequencing Expansion Projects // Operat. Res. —1973 —V. 21, № 2.
47. Erlenkotter D. Capacity Planning for Large Multilocation Systems: Approximate and Incomplete Dynamic Programming Approaches. // Manag. Sci. — 1975. —V. 22, № 3.
48. Erlenkotter D., Manne A.S. Capacity Expansion for India's nitrogenous Fertilizer Industry // Manag. Sci. — 1968. —V. 14, № 10.
49. Erlenkotter D., Rogers J.S. Sequencing Competitive Expansion Projects//Operat. Res.—1977 —V. 25, № 6.
50. Петров. А.А., Пospelов И.Г., Шананин А.А. 'Опыт математического моделирования экономики' — М.: Энергоатомиздат, 1996г.
51. Р. Брейли, С. Майерс. Принципы корпоративных финансов: пер. с англ. — М.: ЗАО 'Олимп-Бизнес', 1997г.
52. Гольштейн Е.Г., Юдин Д.Б. новые направления в линейном программировании. — М.: Сов. Радио, 1966.
53. Пропой А.И., Ядыкин А.Б. Параметрическое квадратичное и линейное программирование. I, II// Автоматика и телемеханика. — 1978. № 2,4.
54. Казакевич Д. М. Производственно-транспортные модели в перспективном отраслевом планировании. — М. Экономика, 1972г.

Виктор Анатольевич Баев