

Е.Ю. Байбакова, аспирант,  
В.В. Клочков, д-р экон. наук,<sup>1</sup>  
г. Москва

## ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ФРАГМЕНТАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЦЕПОЧЕК В НАУКОЕМКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В работе изучаются экономические факторы, стимулирующие и ограничивающие углубление фрагментации технологических цепочек в промышленности. Отмечено, что в результате фрагментации технологических цепочек в наукоемкой промышленности может теряться целостное представление о сложном изделии. Предложена экономико-математическая модель выбора оптимальной организации инновационных разработок с учетом данной проблемы.

**Ключевые слова:** технологические цепочки, фрагментация, системный интегратор, параллельное проектирование, когнитивный барьер.

### **Фрагментация технологических цепочек: предпосылки и ограничения.**

Переход к открытой конфигурации изделий, модульная конструкция сложной продукции открывают возможность ее разработки и производства не только на вертикально интегрированных предприятиях полного цикла (рис. 1), но и в рамках матричных и сетевых организационных структур. В таких структурах (рис. 2) выделяются специализированные поставщики комплектующих изделий и производственных услуг, а также системные интеграторы-носители бренда, поставляющие финальные изделия или услуги потребителям.

Как показано в ряде работ (например, [4]), это дает возможность сокращения себестоимости благодаря повышению масштабов выпуска и ассортимента

продукции специализированных производителей. Что касается негативных последствий такого изменения структуры предприятий и отраслей, прежде всего обращают внимание на повышение транзакционных издержек, а также контрактных рисков. Соответствующие аспекты достаточно глубоко исследованы в работах известных ученых институциональной школы – прежде всего О. Уильямсона, основоположника транзакционного подхода к объяснению феномена фирмы и ее границ (TCE, Transaction Cost Economics, экономика транзакционных затрат), нобелевского лауреата 2009 г., [9]. Однако развитие информационных технологий – прежде всего технологий безбумажного информационного обмена, CALS (Continuous Acquisition and Lifecycle Support, непрерывная информационная поддержка жизненного цикла) – позволяет сократить влияние негативных институциональных факторов до приемлемого уровня, [5]. Системные интеграторы могут формировать так называемые *виртуальные предприятия* с переменным составом *агентов*, т.е. специализированных поставщиков. Возможность быстрой и

---

<sup>1</sup> Байбакова Елена Юрьевна – аспирант ГОУ ВПО «Московский физико-технический институт (государственный университет)»; e-mail: elenabaibakova@mail.ru

Клочков Владислав Валерьевич – доктор экономических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН; e-mail: vlad\_klochkov@mail.ru

дешевой замены агента подавляет его оппортунистические устремления.

Таким образом, в настоящее время складываются экономические, технологические, институциональные условия для перехода к матричным и сетевым организационным структурам отраслей и отраслевых комплексов. Как можно увидеть, сравнивая рис. 1 и 2, это означает *фрагментацию* технологических цепочек, уже происшедшую во многих высокотехнологичных отраслях мировой экономики [3]. Более того, существуют

экономические предпосылки для ее дальнейшего углубления – от уровня функциональных модулей и агрегатов изделия до уровня элементной базы и отдельных дорогостоящих технологических операций, которые могут быть унифицированы в межотраслевом масштабе. Резервы дальнейшего снижения себестоимости продукции благодаря устранению межотраслевых барьеров являются предметом отдельного анализа. При этом необходимо учитывать следующие факторы. Чем сильнее фраг-

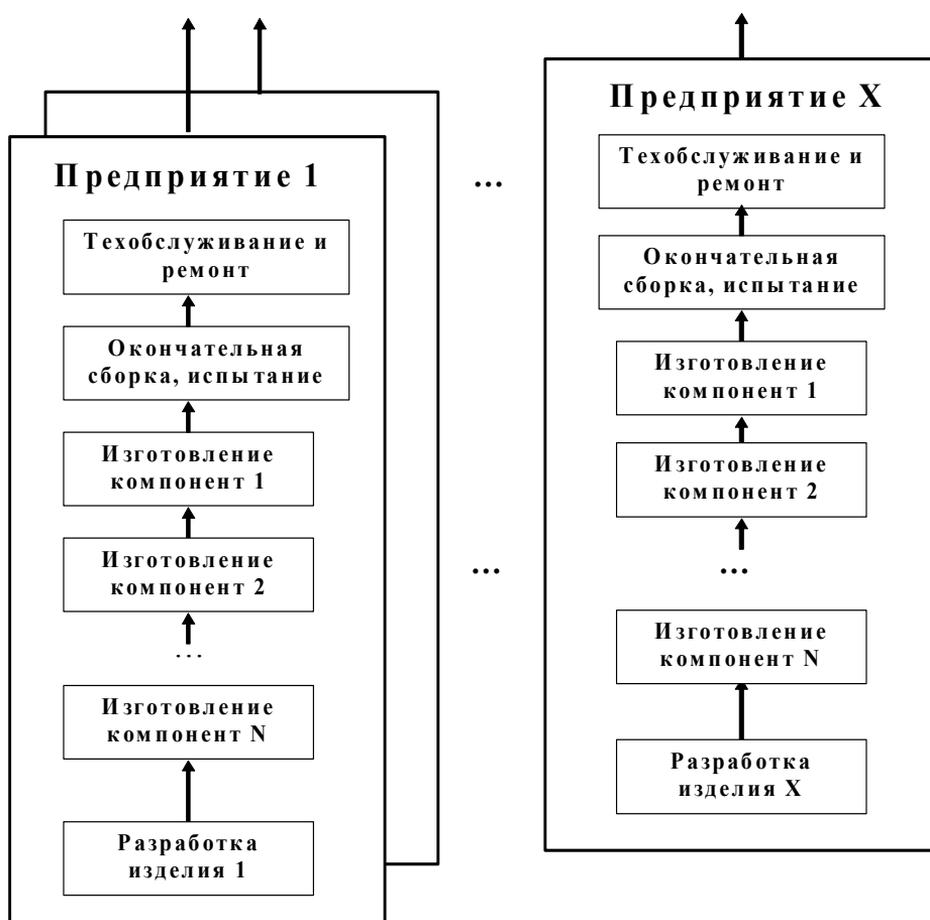


Рис. 1. Традиционная структура наукоемкой промышленности с вертикально интегрированными предприятиями

ментирована технологическая цепочка, тем шире, при прочих равных, возможная область применения продукции каждого ее звена, т.е., например, лопаточные машины могут применяться только в транспортном и энергетическом машиностроении, но отдельные узлы или технологические операции, используемые при их производстве (заготовительное производство, механообработка, сварка и пайка, нанесение покрытий и модификация поверхностей, и т.п.), могут применяться во многих подотраслях машиностроения. Здесь можно провести аналогию с живой природой: относительно простые органические соединения распространены гораздо шире более сложных. Подобные эффекты глубоко исследованы в рам-

ках теории *техноценозов*, т.е. больших технических систем, обнаруживающих некоторые свойства эволюционирующих живых систем [7].

Если бы различные сочетания элементов изделий были равновероятными, и соответствующая вероятность зависела бы лишь от количества элементов в сочетании, тогда, как показывают комбинаторные расчеты, распространенность даже самых простых сочетаний, состоящих из нескольких элементов, была бы чрезвычайно малой. Разумеется, различные сочетания элементов не являются равновероятными – потому и существуют отрасли как кластеры производств, обладающих технологической общностью. Прогнозирование роста применимости компо-

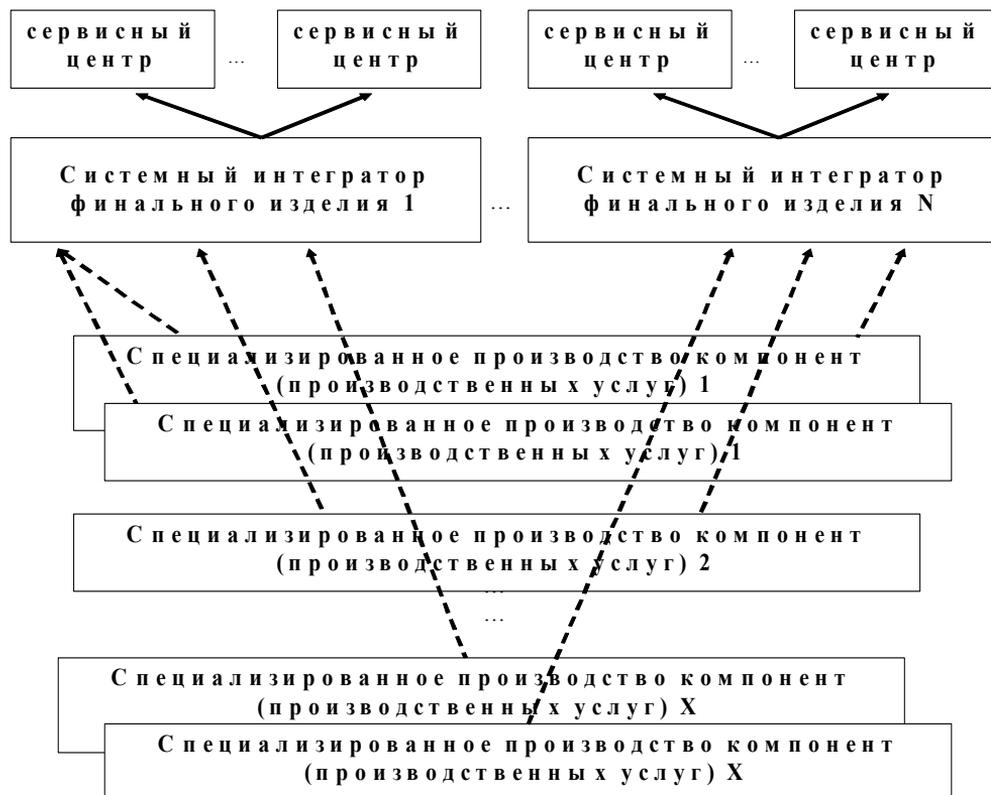


Рис. 2. Сетевые организационные структуры и фрагментация технологических цепочек

нент по мере углубления фрагментации технологических цепочек, возможности и целесообразности межотраслевой кооперации требуют детального анализа конфигурации конкретных изделий и технологий их изготовления. Такую работу в нашей стране проводили специалисты в области стандартизации и унификации – прежде всего в НИИ стандартизации и унификации (НИИСУ, [10]). Однако, несмотря на наличие мощных административных рычагов управления в советской экономике, межотраслевые барьеры и конфликты интересов воспрепятствовали широкой унификации даже технологически близких производств в разных отраслях. В то же время в ведущих промышленных державах мира проблемы устранения межотраслевых барьеров относительно успешно решаются даже в рыночной экономике. Так, например, в США исторически сформировалась именно аэрокосмическая промышленность, в то время как в нашей стране авиационная и ракетно-космическая промышленность развивались практически изолированно.

Получив оценки увеличения применимости компонент или технологических операций в результате углубления фрагментации технологической цепочки, следует сравнить себестоимости производства этих компонент в каждой отрасли и в рамках межотраслевой специализации (возможно, при наличии нескольких конкурирующих специализированных поставщиков). Для получения приближенных количественных оценок можно использовать подход, аналогичный предложенному в работе [4]. Снижение себестоимости будет более существенным, если унифицируемые отрасли характеризуются высокой степенью технологической общности.

Однако фрагментация технологических цепочек имеет естественные ограничения, обусловленные наличием транзакционных затрат и контрактных

рисков. Также необходимо учитывать, что специализация предприятий, тем более на межотраслевом уровне, означает увеличение транспортных расходов (за исключением случаев концентрации предприятий многих отраслей в одном регионе, что реализуется в так называемых *кластерах* и во многом определяет эффективность таких структур). Таким образом, дальнейшая фрагментация технологических цепочек целесообразна лишь при условии, что выигрыш от увеличения масштабов применения комплектующих изделий (с учетом реальных, всегда ограниченных, возможностей их унификации для разных финальных изделий) превосходит прирост транспортных расходов, транзакционных затрат и ожидаемых потерь.

Следует отметить, что вопреки распространенному стереотипу, сформировавшемуся в рамках концепции ТСЕ, фрагментация технологических цепочек неоднозначным образом влияет на контрактные риски, в т.ч. риск форс-мажорных обстоятельств, срыва поставок и т.п. Здесь можно провести аналогию с эффектом, хорошо известным в технической теории надежности [1]. Резервирование эффективнее проводить на уровне элементов, а не функциональных блоков. В первом случае при отказе какого-либо элемента его функции выполняет резервный, поэтому блок в целом (даже не резервированный) не теряет работоспособности. После этого могут выходить из строя и другие элементы, но работоспособность системы не теряется, пока остается хотя бы один исправный элемент данного типа. Во втором случае при отказе любого элемента выходит из строя весь функциональный блок (содержащий в т.ч. и исправные элементы), и его функции приходится передавать резервному блоку. Если теперь выйдет из строя какой-либо элемент резервного блока, это приведет к отказу системы в

целом. Аналогично, если возрастает уровень дефектности или цена отдельного элемента изделия, это касается лишь данного элемента, и последствия такого события могут быть смягчены за счет смены поставщика данного элемента или диверсификации поставок. Если же агенты поставляют законченные функциональные модули, являющиеся для системного интегратора «черными ящиками», повышение дефектности или цены уже отражается на большей доле (в стоимостном измерении) закупаемых товаров и производственных услуг.

Особое внимание следует уделить влиянию изучаемого здесь явления на рынок труда, формирование человеческого капитала и т.п. Широко распространены опасения, что глубокая фрагментация технологических цепочек, т.е. формирование длинной цепочки субподрядов, приводит к сокращению рыночной власти наемных работников (в т.ч. по причине примитивизации их труда и снижения их требуемой квалификации) и ухудшению их положения [6, с. 275]: «Как понять, что богатые и по идее законопослушные транснациональные корпорации опускаются до свойственного прошлому веку уровню эксплуатации... Только благодаря механизмам субподряда: на каждом уровне подряда, субподряда и т.д. производители торгуются, сбивая друг другу цены, и на каждом уровне подрядчик и субподрядчик выуживают свою небольшую прибыль. В конце этой цепочки передачи подрядов и сбивания цен стоит рабочий...» Немаловажным является фактор концентрации работников на вертикально интегрированном предприятии, возможность их непосредственного общения, согласования требований к работодателю и т.п., тогда как работники специализированных производств разобщены в пространственном и социальном смысле. Разумеется, описанная гипотеза о негативных со-

циальных последствиях фрагментации технологических цепочек нуждается в корректной проверке, в т.ч. формальными, экономико-статистическими методами.

**Когнитивный барьер в наукоемкой промышленности.** В то же время фрагментация технологических цепочек таит в себе, по мнению авторов, еще целый ряд менее очевидных рисков, помимо контрактных. Прежде всего, она сопровождается фрагментацией знаний, что особенно критично в наукоемких отраслях. Специализация, безусловно, позволяет предприятию накопить значительный опыт разработки и производства определенных компонентов изделия, приобрести исключительную компетентность в своей области, недостижимую для предприятия, производящего финальное изделие по полному циклу. Однако при этом есть риск потери системного представления о продукте в целом. Безусловно, таким представлением должен обладать системный интегратор, который осуществляет управление проектом. Но формирование целостного представления об изделии затрудняется вследствие аутсорсинга разработки и производства большинства компонент, т.е., помимо хорошо изученных транзакционных барьеров, возникает *когнитивный барьер*<sup>2</sup>. В последние десятилетия в наукоемкой промышленности развиваются технологии *параллельного проектирования* сложных изделий и систем. В их основе лежит декомпозиция глобальной задачи оптимального проектирования финального изделия на локальные задачи оптимального проектирования компонентов [2]. Однако

<sup>2</sup> Аналогичный термин используется в психологии и педагогике, однако применительно к инновационным исследованиям и разработкам данный термин впервые введен авторами.

такая декомпозиция возможна лишь для систем с заданной структурой. Если же для достижения глобального оптимума потребуется изменение структуры изделия, т.е. исключение определенных компонентов и/или включение новых, оно недостижимо в рамках описанного подхода. Например, специализированный производитель турбинных или компрессорных лопаток для газотурбинных двигателей может обеспечить наивысший достижимый уровень их конструктивного совершенства, низкую себестоимость, высокое качество и т.п. Однако вряд ли он предложит перейти к прямоточному реактивному двигателю [8], в газоздушном тракте которого отсутствуют компрессор, турбина и соответствующие лопатки. Можно возразить, что такое решение может и должен предложить системный интегратор, обладающий видением продукта в целом и перспектив его развития. Однако нет никакой гарантии, что такое видение у него действительно сформируется в условиях глубокой фрагментации технологических цепочек.

Собственные интересы специализированных предприятий-поставщиков могут препятствовать оптимальному изменению конфигурации изделий. В ряде случаев кардинальное изменение конструкции изделия не влечет за собой исключения из технологических цепочек тех или иных участников. Так, переход элементной базы электроники с вакуумных ламп на полупроводниковые приборы не изменил принципиально структуры финальных изделий – место ламп-диодов, триодов и т.п. заняли полупроводниковые диоды и транзисторы. Другими словами, существует хотя бы принципиальная возможность конверсии предприятий-производителей электронных ламп и их перехода на выпуск полупроводниковых элементов, затем – микросхем и т.д. Однако в ряде случаев

сама конфигурация изделия меняется столь радикально, что какие-то участники технологических цепочек уже в принципе не найдут себе места. Можно привести хотя бы использованный ранее пример производителей лопаток, которые в принципе отсутствуют в прямоточных реактивных двигателях. Естественно, опасаясь потери рынка, специализированные предприятия-производители не сообщают системному интегратору о возможности радикального изменения конфигурации изделия, даже если сами будут знать о такой возможности.

Влияние фрагментации знаний изменяется по мере углубления фрагментации технологических цепочек немонотонным образом. Если системный интегратор закупает у агентов законченные функциональные модули изделия, когнитивный барьер наиболее высок. В этом случае системный интегратор, как правило, представляет себе отдельные модули как «черные ящики» с известными «входом» и «выходом», к которым он может предъявлять требования. Поскольку он слабо представляет себе структуру модулей и суть происходящих в них процессов, он может лишь оптимизировать параметры их «входа» и «выхода», но не структуру системы в целом (см. примеры выше). Если же системный интегратор разукрупняет изделие до элементарных деталей (наподобие автономалей – крепежных деталей, подшипников и т.п.) и элементарных технологических операций, в этом случае, наоборот, агенты теряют понимание роли своей продукции в финальном продукте. Разумеется, при этом полноценный аутсорсинг в сфере научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) нереализуем – системный интегратор вынужден полностью разрабатывать изделие. Специализация (со всеми сопутствующими выгодами) реализуется в этом случае лишь собственно в производстве. Более того, она может и не исчерпать

всех возможных резервов, поскольку для реализации межотраслевой унификации комплектующих изделий и производственных услуг необходимо видеть соответствующие возможности, что требует глубокого понимания структуры изделий различных отраслей. Следовательно, в наукоемких отраслях экономия от перехода к матричным организационным структурам будет невелика и может не оправдать рост транзакционных и транспортных издержек.

Строго говоря, организация НИОКР может существенно отличаться от организации серийного производства, поэтому некорректно говорить «разработка и производство» тех или иных компонент. Например, изделие вполне может разрабатываться только системным интегратором, но его компоненты могут производиться специализированными предприятиями. Сравнивая различные виды организационных структур, необходимо учитывать все составляющие себестоимости изделия, возникающие на разных стадиях жизненного цикла:

- стоимость НИОКР;
- стоимость технологической подготовки производства (ТПП);
- стоимость серийного производства,

а также потери, возникающие на каждой из перечисленных стадий жизненного цикла изделия. Каждое из этих слагаемых ведет себя особым образом по мере углубления фрагментации технологических цепочек. Но если поведение производственных затрат, а также разнообразных потерь на стадии серийного производства, связанных с оппортунистическим поведением партнеров и т.п., сравнительно глубоко изучено в разнообразных работах, то проблемы, возникающие на стадии НИОКР, исследованы гораздо меньше. Именно им уделено основное внимание в данной работе.

В конечном счете, необходимо выработать рекомендации по оптимальной организации разработки сложных изделий, по выбору между вертикальной интеграцией в сфере НИОКР и аутсорсингом разработки отдельных компонент. С одной стороны, аутсорсинг НИОКР позволяет воспользоваться ключевыми компетенциями специализированных предприятий в разработке отдельных компонент, улучшая качество их проектирования, удешевляя и ускоряя НИОКР. Возможность ускорения разработки изделий и обеспечения временного лидерства на рынке является чрезвычайно важной в наукоемких отраслях. С другой стороны, в силу описанной проблемы когнитивного барьера самостоятельная разработка всего финального изделия системным интегратором обеспечивает лучшую согласованность получаемых проектных решений, чем аутсорсинг разработки отдельных компонент и агрегатов. Естественно, оптимальная организация разработки сложных изделий будет зависеть от специфики этих изделий, а также от стадии жизненного цикла используемых технологий. Здесь имеется в виду не жизненный цикл изделия (ЖЦИ), а фактически жизненный цикл определенного технологического уклада (ЖЦ ТУ). На протяжении этого жизненного цикла может смениться несколько поколений изделий. Помимо уже отмеченного немоного изменения высоты когнитивного барьера по мере углубления фрагментации, можно предположить, что его высота будет неодинаковой на различных стадиях ЖЦ ТУ. Когда технологии достигают зрелости, можно считать, что рациональная структура сложных изделий определилась, хорошо известна руководству и персоналу предприятий – системных интеграторов. При этом оптимизация разработки и производства изделия сводится, главным образом, к эволюционному совершен-

ствование его компонент и снижению издержек их выпуска. Такая задача успешно решается в рамках матричных, сетевых структур с глубокой специализацией предприятий (соответственно с глубокой фрагментацией технологических цепочек). Однако в периоды смены технологических укладов, осуществления радикальных продуктовых инноваций может оказаться более целесообразным создавать инновационный продукт в рамках вертикально интегрированной структуры, контролируя разработку (а иногда и производство) всех необходимых компонент и производственных услуг. Это потребует от системного интегратора содержания исследовательских и опытно-конструкторских мощностей, избыточных по меркам периодов зрелости технологии. Однако только такая стратегия позволит найти резервы радикального улучшения характеристик инновационной продукции.

**Экономико-математическая модель когнитивного барьера.** Количественная модель когнитивного барьера должна отражать вышеописанные качественные особенности данного явления. Для формального описания обсуждаемой проблемы предлагается следующий подход. Пусть сложное изделие включает в себя элементарные компоненты (детали, элементарные производственные операции)  $i = 1, \dots, n$ . Степень взаимосвязи между ними можно описать квадратной матрицей размерностью  $n \times n$ . Понимание этих связей, т.е. комплексное представление о продукте, позволяет по каждой компоненте выбрать оптимальное, с глобальной точки зрения, проектное решение, в т.ч., возможно, и решение об исключении данной компоненты. В противном случае, когда решаются независимые задачи оптимизации каждой компоненты (естественно, без возможности ее исключить), неучет взаимосвязи между компонентами  $i$  и  $j$

приводит к потере прибыли от реализации нового изделия, равной  $\Delta\pi_{ij}$ . Именно прибыль от реализации за весь ЖЦИ считается здесь интегральным показателем качества проектирования.

Общее количество взаимосвязей между компонентами финального изделия описывается следующей формулой:

$$S_{\Sigma}(n) = \frac{n \cdot (n-1)}{2}. \quad (1)$$

Если системный интегратор закупает у специализированных поставщиков  $m$  агрегатов финального изделия, каждый агрегат содержит в среднем  $\frac{n}{m}$  элементов. Будем считать, что отдельный поставщик оптимизирует свой агрегат с позиций глобального оптимума для финального изделия в целом. При этом отдельный поставщик изучает и оптимизирует в среднем  $\frac{n}{m} \cdot \left(\frac{n}{m} - 1\right)$  связей. Все поставщики в сумме оптимизируют  $m \cdot \frac{n}{m} \cdot \left(\frac{n}{m} - 1\right) / 2 = n \cdot \left(\frac{n}{m} - 1\right) / 2 = \frac{n \cdot (n-m)}{2m}$  связей. Кроме того, сам системный интегратор согласует «входы» и «выходы» закупаемых агрегатов, что добавляет еще  $\frac{m \cdot (m-1)}{2}$  взаимосвязей.

Итого общее число взаимосвязей, учтенных в процессе НИОКР, выражается следующей формулой:

$$S_{cons}(n, m) = \frac{m \cdot (m-1)}{2} + \frac{n \cdot (n-m)}{2m}. \quad (2)$$

Соответственно число неучтенных взаимосвязей равно следующей разности:

$$\begin{aligned} S_{uncons}(n, m) &= S_{\Sigma}(n) - S_{cons}(n, m) = \\ &= \frac{n \cdot (n-1)}{2} - \frac{m \cdot (m-1)}{2} - \frac{n \cdot (n-m)}{2m} = \\ &= \frac{m \cdot n \cdot (n-1) - m^2 \cdot (m-1) - n \cdot (n-m)}{2m} = \\ &= \frac{(m-1) \cdot (n^2 - m^2)}{2m}, \quad m = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (3)$$

Полученное выражение изменяется немонотонным образом по мере увеличения числа закупаемых агрегатов  $m$  от 1 до  $n$ . Заметим, что оба этих крайних значения соответствуют централизованному проектированию всего изделия (хотя случай  $m = 1$  практически является вырожденным: он означает, что системный интегратор закупает изделие в целом у другого системного интегратора), и в этих случаях, как и следовало ожидать, неучтенных взаимосвязей нет ( $S_{uncons}(n; 1) = S_{uncons}(n; n) = 0$ ). В промежуточных точках полученная функция сначала резко возрастает, а затем начинает плавно убывать, рис. 3.

Заметим, что немонотонный характер полученной зависимости отражает отмеченную выше немонотонность изменения высоты когнитивного барьера по мере углубления фрагментации технологических цепочек. Причем наиболее высоким этот барьер действительно будет в

том случае, если системный интегратор закупает у поставщиков крупные ( $m \times n$ ) законченные функциональные блоки.

Далее необходимо описать потери из-за неучета тех или иных взаимосвязей, а также затраты на их учет в процессе разработки нового изделия. Будем считать, что неучет взаимосвязей приводит к потере прибыли от реализации изделия относительно максимально достижимого уровня (глобального оптимума). На ранних стадиях жизненного цикла новой технологии величины  $\{\Delta\pi_{ij}\}$ , определяющие значимость связей между теми или иными компонентами, еще неизвестны. Строго говоря, планируя НИОКР по изделию в целом и по отдельным его компонентам, системный интегратор руководствуется лишь своей субъективной оценкой значимости той или иной связи  $\{\Delta\hat{\pi}_{ij}\}$ . Вначале (в момент времени  $t=0$ , считая от начала ЖЦ ТУ) все связи априори полагаются равно-



Рис. 3. Изменение высоты когнитивного барьера по мере углубления фрагментации технологических цепочек ( $n = 100$ )

ценными:  $\Delta\hat{\pi}_{ij}(0) \equiv \Delta\pi_0$ , где  $\Delta\pi_0$  – априорная оценка значимости связи между элементами. По мере накопления опыта разработки, производства и эксплуатации изделий оценки стремятся к своим истинным значениям  $\{\Delta\pi_{ij}\}$  – например, по аperiodическому закону следующего вида:

$$\begin{aligned} \Delta\hat{\pi}_{ij}(t) &= \Delta\pi_0 \cdot e^{-\lambda t} + \Delta\pi_{ij} \cdot (1 - e^{-\lambda t}) = \\ &= \Delta\pi_{ij} + (\Delta\pi_0 - \Delta\pi_{ij}) \cdot e^{-\lambda t}. \end{aligned} \quad (4)$$

Параметр  $\lambda$  можно трактовать как темп накопления знаний об изделии и взаимосвязи его элементов. Планируя организацию НИОКР, системный интегратор принимает решение о том, следует ли учитывать какую-нибудь связь между элементами или она является малозначительной. Пусть известна среднестатистическая стоимость учета одной связи в процессе проектирования изделия  $\bar{c}_{link}$ . Тогда, если  $\Delta\hat{\pi}_{ij}(t) > \bar{c}_{link}$ ,

связь между компонентами  $i$  и  $j$  считается важной и учитывается в процессе проектирования и системной интеграции. В самом начале ЖЦ ТУ все связи априори считаются значащими:  $\Delta\hat{\pi}_0 > \bar{c}_{link}$  и учитываются в процессе проектирования финального изделия. Т.е. в начале ЖЦ ТУ системному интегратору выгоднее самостоятельно вести НИОКР по всему изделию в целом (как и предполагалось в качественных рассуждениях, предшествовавших построению данной модели). Однако по мере накопления знаний об изделии как целостной системе часть связей оказывается малозначительной (поскольку фактически  $\Delta\pi_{ij} < \bar{c}_{link}$ ) и исключается из рассмотрения (рис. 4).

Оставшиеся взаимосвязи, напротив, учитываются в процессе проектирования более тщательно, поскольку по мере «вымывания» малозначительных связей среднестатистическая значимость оставшихся связей растет. Найдем момент

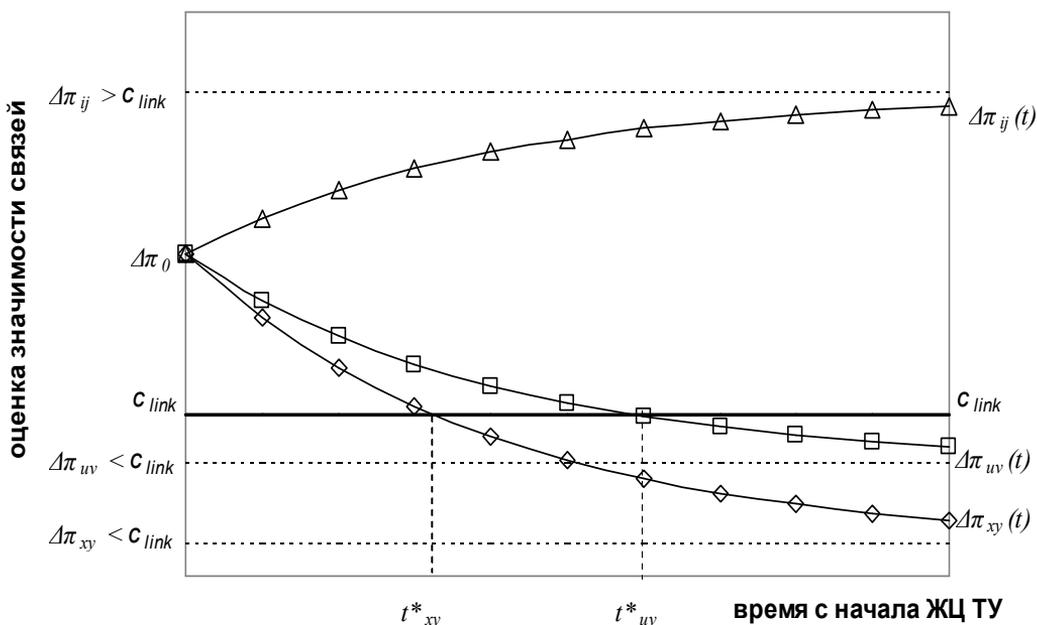


Рис. 4. Изменение со временем оценки значимости взаимосвязей между элементами изделия

времени  $t_{ij}^*$  (относительно начала ЖЦ данной технологии), когда малозначительная связь будет признана таковой и исключена из рассмотрения в процессе разработки изделий:

$$\begin{aligned} \Delta \hat{\pi}_{ij}(t_{ij}^*) &= \Delta \pi_{ij} + (\Delta \pi_0 - \Delta \pi_{ij}) \cdot e^{-\lambda \cdot t_{ij}^*} = \bar{c}_{link}, \\ \Rightarrow e^{\lambda \cdot t_{ij}^*} &= \frac{\Delta \pi_0 - \Delta \pi_{ij}}{\bar{c}_{link} - \Delta \pi_{ij}}, \text{ или} \end{aligned} \quad (4)$$

Итак, если  $\Delta \pi_{ij} < \bar{c}_{link}$ , после  $t_{ij}^*$  взаимосвязь между компонентами  $i$  и  $j$  исключается из рассмотрения в ходе проектирования изделия. Найдем общее количество связей, признанных несущественными в момент  $t$ :

$$S_{unsuff}(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \delta_{ij}(t), \quad (5)$$

где  $\delta_{ij}$  – индикатор, показывающий, учитывается ли в данный момент при разработке изделия взаимосвязь между компонентами  $i$  и  $j$ , или она является и уже считается несущественной.

**Изменение оптимальной организации разработки сложных изделий на протяжении жизненного цикла технологического уклада.** На первый взгляд, для того, чтобы определить рациональную глубину фрагментации технологической цепочки на той или иной стадии ЖЦ новой технологии, достаточно сопоставить число  $S_{insuff}(t)$  с зависимостью  $S_{uncons}(n; m)$  и найти соответствующее число агрегатов  $m^*(t)$ , на которые целесообразно делить финальное изделие в данный момент  $t$ . Однако зависимость  $S_{uncons}(n; m)$  от  $m$  – немонотонна, и, в принципе, решение может быть неединственным, см. рис. 3. Как трактовать возможный неоднозначный результат?

Прежде всего заметим, что уже при  $m = 2$  доля неучтенных связей между элементами двух «черных ящиков» составит около 50 % и при дальнейшем

углублении фрагментации будет только возрастать. Следовательно, если к началу разработки второго (после начала освоения принципиально новой технологии) поколения изделий более половины взаимосвязей между элементами еще считается существенными (т.е.  $S_{unsuff}(t) < \frac{S_{\Sigma}}{2}$ ), это поколение изделий почти полностью разрабатывает системный интегратор (считается, что первое поколение он вынужден был разрабатывать полностью самостоятельно). Допустимое число агрегатов, которые разрабатываются и поставляются специализированными производителями, довольно велико и близко к  $n$ . Т.е. возможен лишь аутсорсинг разработки относительно простых агрегатов, а не крупных функциональных модулей изделия, что соответствует движению «справа налево» на рис. 5. В противоположном случае возможно, что по мере накопления знаний о структуре изделия сравнительно быстро выделится несколько крупных фрагментов технологической цепочки, которые при создании последующих поколений будут измельчаться далее с образованием цепочки субподрядов (движение «слева направо» на рис. 5).

Таким образом развитие событий зависит от темпа накопления знаний о взаимосвязях элементов финального изделия  $\lambda$ . Если он низок (по сравнению с частотой смены поколений изделий), гораздо вероятнее постепенное укрупнение агрегатов, закупаемых системным интегратором у независимых поставщиков, а не фрагментация крупных модулей.

Также динамика фрагментации технологической цепочки сильно зависит от того, какие именно связи оказываются по мере накопления знаний несущественными. Если быстро выявляются кластеры сильно связанных друг с другом элементов изделия (на фоне слабости взаимосвязей элементов разных кла-

стеров), они и образуют законченные функциональные модули, разработка которых может выделяться из состава вертикально интегрированного предприятия. Последнее станет лишь системным интегратором этих модулей. Напротив, возможно, что даже при  $S_{unsuff}(t) \rightarrow S_{\Sigma}$  сильно взаимосвязанными окажутся такие детали, что выделение сравнительно обособленных модулей (т.е. модулизация изделия) окажется невозможным.

Так, например, на современных гражданских самолетах традиционной компоновки авиадвигатели представляют собой именно такие законченные функциональные модули, разрабатываемые и производимые независимо от воздушных судов, на которых они устанавливаются. Даже их расположение (подвеска на пилонах под крылом) позволяет использовать на одной модели самолета двигатели конкурирующих производителей, и наоборот.

Разработчики самолетов предъявляют требования к двигателям фактически как к «черному ящику» – оговариваются тягово-динамические, массогабаритные, расходные и некоторые другие характеристики, но не конкретная конструкция и технология изготовления. На истребителях, где двигатели уже занимают значительную долю объема планера, степень интеграции самолета и двигателя гораздо сильнее, и приходится согласовывать их конструкцию по аэродинамическим, компоновочным и др. соображениям. Если же рассмотреть перспективные проекты авиадвигателей для гиперзвуковых летательных аппаратов, в частности – прямоточные двигатели внешнего сгорания, в этих конструкциях определенные части планера одновременно выполняют роль элементов двигателя [8], и разделение их разработки (как и производства) становится принципиально невозможным.

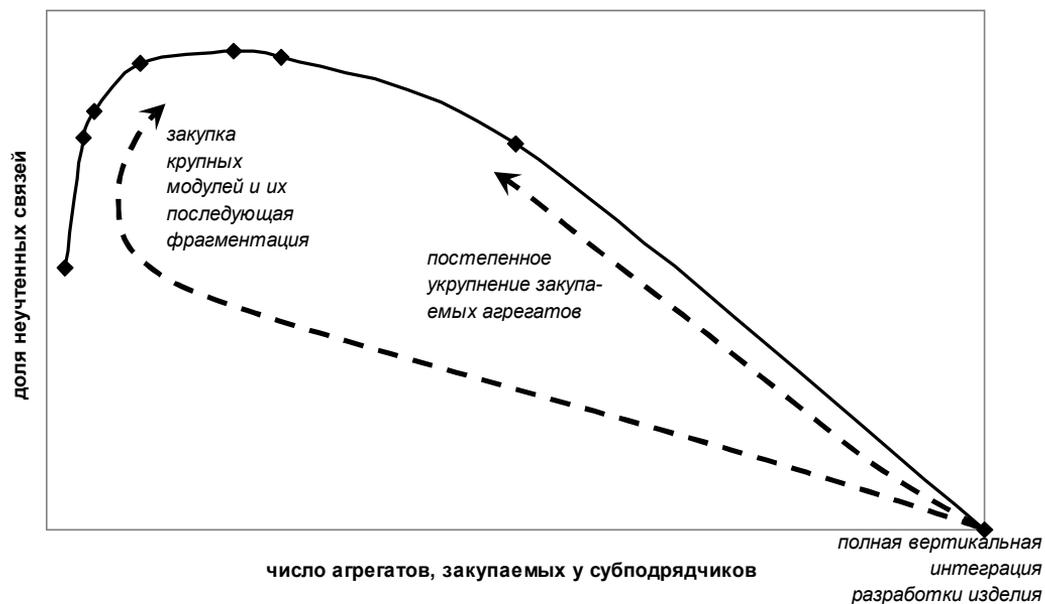


Рис. 5. Траектории изменения оптимальной организации НИОКР со временем

**Заключение.** Углублению фрагментации технологических цепочек может препятствовать когнитивный барьер – потеря целостного представления об изделии и взаимосвязях его компонент. Он наиболее высок, если системный интегратор закупает у поставщиков крупные функциональные модули изделия.

На ранних стадиях жизненного цикла технологического уклада целесообразна интеграция разработки изделия в целом. По мере накопления знаний о взаимосвязях элементов изделий становится допустимой более глубокая фрагментация технологических цепочек и в сфере НИОКР шире применяется аутсорсинг.

### **Список использованных источников**

1. Александровская Л.Н., Афанасьев А.П., Лисов А.А. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем. М.: Логос, 2001. 208 с.
2. Вязгин В.А., Федоров В.В. Математические методы автоматизированного проектирования. М.: Высшая школа, 1989. 184 с.
3. Голиченко О.Г. Технологическая революция и фрагментация цепей создания добавленной стоимости // мат. Межд. научно-практ. конф. «Управление инновациями – 2009». М.: ИПУ РАН, 2009. С. 36–41.
4. Клочков В.В. Оценка экономической эффективности интеграции авиационного двигателестроения // Полет. 2006. № 7. С. 28–33.
5. Клочков В.В. CALS-технологии в авиационной промышленности: организационно-экономические аспекты. М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2008. 124 с.
6. Кляйн Н. NO LOGO: люди против брендов. М.: Добрая книга, 2003. 624 с.
7. Кудрин Б.И. Исследования технических систем как сообществ изделий – техноценозов // Системные исследования. Ежегодник – 1980. М.: 1981. С. 236–254.
8. Энциклопедия «Авиация». М.: Большая Российская энциклопедия, 1994. 736 с.
9. Williamson O.E. Technology and transaction cost economics // Journal of economic behavior and organization. 1998. Vol. 10. PP. 355–363.
10. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [www.niisu.su](http://www.niisu.su).