

УДК 681.5(075.8)

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНТЕГРАЦИИ РАЗРАБОТКИ И ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА СЛОЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ CALS-ТЕХНОЛОГИЙ

© 2012 В.В. Клочков¹, А.А. Коломоец²

¹ Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова
Российской академии наук (ИПУ РАН), г. Москва

² Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 10.10.2012

Предложена упрощенная модель для оценки возможного сокращения длительности и стоимости разработки и технологической подготовки производства наукоемких изделий, достигаемого благодаря интеграции этих этапов жизненного цикла изделий на основе информационных технологий. Выработаны рекомендации по выбору приоритетных направлений развития соответствующих информационных систем.

Ключевые слова: CALS-технологии, опытно-конструкторские работы, технологическая подготовка производства, интеграция, конструкторские ошибки, эффективность

ВВЕДЕНИЕ

Разработка и подготовка производства новой продукции были одной из первых областей массового применения информационных систем и технологий в наукоемкой и высокотехнологичной промышленности. Основным классом информационных систем, применяемых на этих этапах *жизненного цикла изделий (ЖЦИ) – системы автоматизированного проектирования (САПР)*, причем, не только конструкции изделий (САПР-К, конструкторские САПР), но и технологии их изготовления (САПР-Т, технологические САПР). Внедрение информационных технологий в практику *опытно-конструкторских работ (ОКР) и технологической подготовки производства (ТПП)* позволяет сократить длительность этих этапов ЖЦИ. При этом, как показывает опыт, стоимость может и не сократиться, что, однако, еще не означает неэффективности этих новшеств. Экономическая эффективность информационных технологий (ИТ) вообще не сводится к экономии затрат. Важнее новые возможности организации наукоемкого бизнеса, возможности получения дополнительных доходов и т.п., которые ИТ открывают перед предприятиями, пусть даже ценой повышения издержек. Соответствующие аспекты подробно описаны в работах [1. Бендиков М.А., Клочков В.В. Экономические аспекты внедрения CALS-технологий

в авиационной промышленности // Прикладная информатика. 2010. № 1. С. 21-34., 4. Клочков В.В. CALS-технологии в авиационной промышленности: организационно-экономические аспекты. М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2008. 124 с.], посвященных анализу экономической эффективности ИТ в авиационной промышленности. Особое внимание в вышеуказанных работах и в данной работе уделяется т.н. *CALS-технологиям (CALS, Continuous Acquisition and Lifecycle Support, т.е. технологиям непрерывной информационной поддержки ЖЦИ, подробнее см. [5. Российская энциклопедия CALS. Авиационно-космическое машиностроение / под ред. Заслуженного деятеля науки РФ проф. А.Г. Братухина. М.: НИЦ АСК, 2008. 608 с., 6. Судов Е.В., Левин А.И., Давыдов А.Н., Барабанов В.В. Концепция развития CALS-технологий в промышленности России. М.: НИЦ CALS-технологий “Прикладная логистика”, 2002. 36 с.]*). Концепция CALS является, на наш взгляд, наиболее комплексной концепцией информатизации наукоемкой промышленности. Ее суть состоит в сквозной интеграции информационных технологий и систем, применяемых на всех стадиях ЖЦИ, что позволяет создать *единое информационное пространство (ЕИП)* для всех участников ЖЦИ, существенно упростив взаимодействие между ними.

Оценка экономической эффективности внедрения информационных технологий в ОКР и ТПП, относящихся к предпроизводственным стадиям ЖЦИ, основана, прежде всего, на учете факторов т.н. *временной конкуренции* на рынках наукоемкой продукции. Начиная массовое производство и продажи раньше соперников, лидер

Клочков Владислав Валерьевич, доктор экономических наук, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории 67. E-mail: vlad_klochkov@mail.ru
Коломоец Александр Александрович, аспирант кафедры компьютерного моделирования факультета Аэромеханики и летательной техники. E-mail: alexk_1985@hotmail.com

успевает к моменту выхода последователей на рынок накопить значительный опыт производства новой продукции и существенно снизить ее себестоимость (благодаря т.н. *эффекту обучения*, состоящему в сокращении удельных затрат на производство каждой новой единицы продукции по мере накопления опыта ее изготовления). Кроме того, продукция лидера уже эксплуатируется на протяжении ряда лет, приобретая дополнительные конкурентные преимущества в глазах потребителей (а в сфере эксплуатации также могут действовать сильные эффекты обучения). В итоге запаздывание относительно лидеров инновационной гонки может достигнуть такого порогового уровня, при котором выручка от продажи продукции не покрывает вложений и затрат, т.е. проект станет убыточным. Иначе говоря, можно “отстать от лидера навсегда”, и выход на рынок станет для запоздавших компаний бессмысленным. По описанным причинам производители стремятся ускорить предпроизводственные стадии ЖЦИ и вывести свой продукт на рынок раньше конкурентов – возможно, даже ценой дополнительных затрат на форсирование НИОКР и ТПП, в т.ч. затрат, связанных с внедрением информационных технологий. В целом, благодаря применению CALS-технологий на предпроизводственных стадиях ЖЦИ, по оценкам американских авиастроительных компаний, достигается сокращение времени вывода новых изделий на рынок на 25..75%, [6.

Судов Е.В., Левин А.И., Давыдов А.Н., Барабанов В.В. Концепция развития CALS-технологий в промышленности России. М.: НИЦ CALS-технологий “Прикладная логистика”, 2002. 36 с.]. В данной работе предполагается более детально исследовать источники описанного эффекта, возможности его усиления, и выработать экономически обоснованные рекомендации по развитию и внедрению ИТ на стадиях ОКР и ТПП наукоемкой продукции.

В простейших моделях эффективности ИТ на предпроизводственных стадиях ЖЦИ (см., например, [1. *Бендиков М.А., Клочков В.В.* Экономические аспекты внедрения CALS-технологий в авиационной промышленности // Прикладная информатика. 2010. № 1. С. 21-34., 4. *Клочков В.В.* CALS-технологии в авиационной промышленности: организационно-экономические аспекты. М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2008. 124 с.]) учитывалось лишь сокращение ожидаемой продолжительности ОКР и ТПП благодаря их информатизации по двум основным причинам:

- снижается трудоемкость проектирования изделий и отработки технологий их производства;
- появляется возможность параллельного выполнения ОКР и ТПП.

Сами по себе продолжительности ОКР и ТПП в работах [1. *Бендиков М.А., Клочков В.В.* Экономические аспекты внедрения CALS-технологий в авиационной промышленности // Прикладная информатика. 2010. № 1. С. 21-34., 4. *Клочков В.В.* CALS-технологии в авиационной промышленности: организационно-экономические аспекты. М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2008. 124 с.] рассматривались как детерминированные величины. Но в реальности эти стадии ЖЦИ сопряжены со значительными техническими рисками, которые также могут снижаться благодаря внедрению новых технологий и принципов организации ОКР и ТПП. Именно этим аспектам и уделяется основное внимание в данной работе. Современные информационные технологии не только позволяют автоматизировать трудоемкие расчеты и процедуры проектирования изделий и технологических процессов. Они открывают возможности перехода к новой, более эффективной организации инновационных разработок в наукоемкой промышленности. Так, например, хотя в традиционной структуре жизненного цикла наукоемкой продукции технологическая подготовка производства следует за разработкой изделия (см. рис. 1), целесообразно начинать ТПП и развитие производственных мощностей не по окончании НИОКР, а еще в ходе разработки изделия.

Т.е. эти два этапа ЖЦИ должны, по возможности, перекрываться. Это обеспечивает два основных преимущества:

1) Сокращается ожидаемая общая продолжительность предпроизводственных стадий ЖЦИ, поскольку значительная часть ТПП может быть проведена еще до официальной передачи конструкторской документации на завод-изготовитель. Иначе говоря, ТПП выполняется практически параллельно ОКР. Аналогично, заранее можно начать и некоторые процессы технического перевооружения производства (как правило, достаточно длительные).

2) Снижается риск принятия на стадии ОКР технологически нереализуемых или неэффективных решений – благодаря итеративному согласованию конструкторских решений и технологических возможностей. Это, в свою очередь, также позволяет сократить ожидаемую длительность НИОКР и ТПП, риск ее увеличения и риск перерасхода средств.

Подчеркнем, что возможности интеграции ОКР и ТПП, интерактивного диалога конструкторов и технологов появляются именно благодаря внедрению CALS-технологий. Они обеспечивают целостность данных об изделии в едином информационном пространстве (ЕИП), и предоставляют технологам информацию обо всех изменениях конструкции изделия в реальном мас-

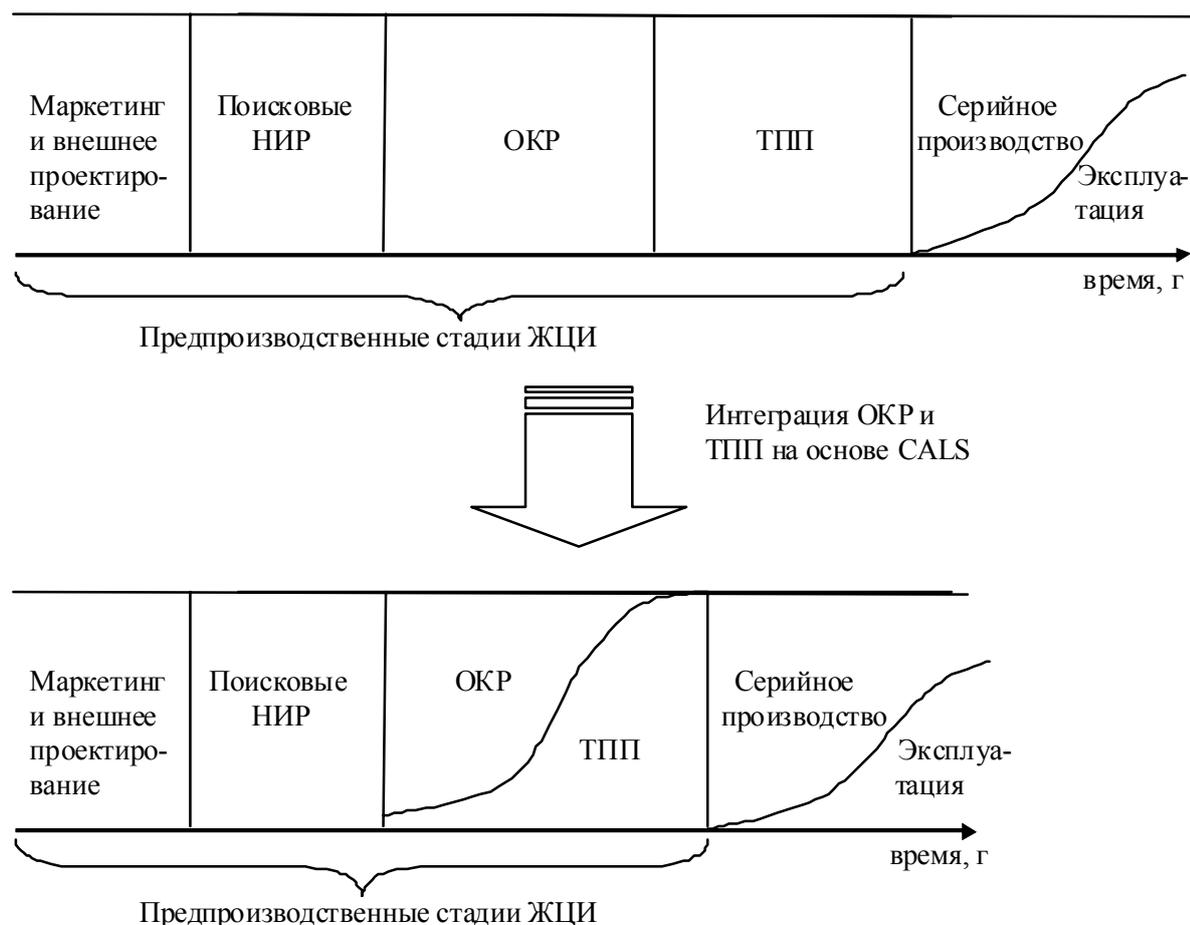


Рис. 1. Традиционная и перспективная структура предпроизводственных стадий жизненного цикла наукоемкой продукции

штабе времени (причем, что немаловажно, в виде, пригодном для автоматизированного анализа конструкции на технологичность с помощью технологических САПР). Находясь в ЕИП вместе с разработчиками изделия, технологи могут использовать актуальную конструкторскую документацию для проектирования и виртуальной отработки технологических процессов.

Вряде работ, посвященных технологическим аспектам внедрения ИТ в производство (см. [8. *M. Tolouei-Rad. An approach towards fully integration of CAD and CAM technologies // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. Vol. 18. Issue 1-2, September–October 2006, pp. 31-36.*]), предлагается полная интеграция (на программном уровне) конструирования и подготовки производства изделий, т.е. конструктор одновременно проектирует изделие и (в автоматизированном режиме) технологические процессы его изготовления. Однако, не отрицая целесообразности такого решения применительно к относительно простым изделиям, заметим, что при создании сложных технических систем такая стратегия

- либо труднореализуема, поскольку могут вступать в противоречие решения разных кон-

структоров, проектирующих различные элементы изделия и процессы их изготовления, и решать эти противоречия будет существенно сложнее, в силу большей сложности принимаемых решений;

- либо может быть неэффективной, поскольку, разрабатывая технологию производства сложного изделия в целом, можно принять более рациональное решение (например, применив групповую обработку деталей и т.п.), чем при изолированной оптимизации конструкции и технологии изготовления каждого элемента. Т.е. глобальный оптимум достигим на более высоком уровне принятия решений, чем уровень разработчика конкретной детали или узла.

Поэтому в данной работе конструкторы и технологи все-таки рассматриваются как разные группы специалистов, решающие каждая свои специфические задачи. Учитывается, что CALS-технологии облегчают их взаимодействие и позволяют сделать его интерактивным.

На качественном уровне описанные выше соображения об эффективности интеграции разработки и подготовки производства изделий высказывались и другими исследователями, как в нашей стране, так и за рубежом, см., например,

[5. Российская энциклопедия CALS. Авиационно-космическое машиностроение / под ред. Заслуженного деятеля науки РФ проф. А.Г. Братухина. М.: НИЦ АСК, 2008. 608 с., 7. *P.S. Adler and D.A. Helleloyd. Effective Implementation of Integrated CAD/CAM: A Model // IEEE Trans. Eng. Manag., vol EM-34, No. 2, pp. 101-108, May 1987.*]. Однако при этом, насколько известно авторам, не проводилось формального анализа эффективности интеграции ОКР и ТПП и влияния на эффективность различных характеристик информационных технологий и самих интегрируемых стадий ЖЦИ. Предлагаемая работа частично восполняет этот пробел, предоставляя простой инструмент для получения приближенных количественных оценок.

МОДЕЛИ ДЛИТЕЛЬНОСТИ И СТОИМОСТИ РАЗРАБОТКИ И ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ С УЧЕТОМ РИСКА КОНСТРУКТОРСКИХ ОШИБОК

Приближенные количественные оценки эффективности интеграции ОКР и ТПП с учетом вышеописанных факторов можно получить в рамках следующего подхода. Разделим ОКР и ТПП на этапы, причем, по завершении каждого этапа ОКР появляется возможность выполнить определенный этап ТПП. Прежде всего, разумеется, это касается разработки технологических процессов, а не развития производственных мощностей. Возможности развития материально-технической базы производства до завершения рабочего проектирования существуют (как правило, в части универсального оборудования и пассивной части основных фондов – зданий, сооружений, инженерной инфраструктуры и т.п.), но нуждаются в отдельном анализе. В свою очередь, выполнение определенных этапов ТПП позволяет выявить ошибки, которые с некоторой вероятностью могли быть допущены в ходе ОКР. Поскольку благодаря интеграции ОКР и ТПП они исправляются раньше, а не по завершении всего комплекса ОКР, снижаются ожидаемые потери времени и средств. Здесь рассматривается лишь определенный класс конструкторских ошибок – ошибки, приводящие к снижению технологичности изготовления изделия или даже невозможности его изготовления в рамках имеющихся технологий. Кроме того, считается, что такие ошибки могут выявляться лишь в ходе ТПП, при разработке технологических процессов, а не в ходе дальнейшей разработки конструкции, т.е. еще на этапе ОКР.

Оценив вероятности появления и обнаружения ошибок на тех или иных этапах ОКР и ТПП,

можно определить ожидаемый объем переделок в конструкции и технологии производства изделий, а также соответствующие потери – как во временном, так и в стоимостном выражении. Полученные таким образом результаты остается сопоставить с ожидаемыми затратами и потерями времени и средств при традиционном, последовательном выполнении ОКР и ТПП. При этом учитывается, что интеграция ОКР и ТПП позволяет выполнять их практически параллельно. Частными показателями эффективности интеграции этих этапов ЖЦИ можно считать, например, относительное сокращение ожидаемых потерь времени и средств на переделки. Обобщающая, интегральная оценка должна строиться на основе модели временной конкуренции производителей наукоемкой продукции (см. [1. *Бендииков М.А., Клочков В.В. Экономические аспекты внедрения CALS-технологий в авиационной промышленности // Прикладная информатика. 2010. № 1. С. 21-34., 4. Клочков В.В. CALS-технологии в авиационной промышленности: организационно-экономические аспекты. М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2008. 124 с.*]), в которой выигрыш во времени выхода изделия на рынок, как и изменение стоимости его создания, оказывают непосредственное влияние на прибыль производителя. При этом можно сравнить значимость сокращения длительности предпроизводственных стадий ЖЦИ и изменения (возможно, положительного) их стоимости. Однако в данной работе такая интегральная оценка не проводится (в каждом конкретном случае ее можно выполнить самостоятельно на основе подходов, описанных в работах [1. *Бендииков М.А., Клочков В.В. Экономические аспекты внедрения CALS-технологий в авиационной промышленности // Прикладная информатика. 2010. № 1. С. 21-34., 4. Клочков В.В. CALS-технологии в авиационной промышленности: организационно-экономические аспекты. М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2008. 124 с.*]), а основное внимание уделяется анализу изменения частных показателей – длительности и стоимости ОКР и ТПП.

Прежде всего, необходимо оценить ожидаемые фактические объемы работ с учетом переделок. Введем следующие условные обозначения. Пусть n – число этапов ОКР, обозначаемых индексами $i = 1, \dots, n$, и соответствующих им этапов ТПП, обозначаемых индексами $j = 1, \dots, n$ (т.е. по окончании j -го этапа ОКР можно выполнять j -й этап ТПП). Для простоты будем считать, что все этапы ОКР имеют одинаковую длительность $\tau^{\text{ОКР}}$ и стоимость $c^{\text{ОКР}}$, а все этапы ТПП – соответственно, $\tau^{\text{ТПП}}$ и $c^{\text{ТПП}}$ (либо можно оперировать усредненными длительностями и стоимостями). Следовательно, плановые

длительность и стоимость ОКР и ТПП (без учета ошибок и переделок) определяются следующими соотношениями:

$$T_{\text{план}}^{\text{ОКР}} = n \cdot \tau^{\text{ОКР}}; C_{\text{план}}^{\text{ОКР}} = n \cdot c^{\text{ОКР}};$$

$$T_{\text{план}}^{\text{ТПП}} = n \cdot \tau^{\text{ТПП}}; C_{\text{план}}^{\text{ТПП}} = n \cdot c^{\text{ТПП}},$$

Будем считать, что на каждом из n последовательных этапов ОКР ошибка может быть допущена с вероятностью p . В свою очередь, с вероятностью q такая допущенная ошибка может быть обнаружена на каждом последующем этапе ТПП.

В случае обнаружения ошибки, все выполненные после нее этапы ОКР подлежат переделке, в среднем, на долю $\alpha \in [0; 1]$ (как по времени, так и по стоимости), а соответствующие этапы ТПП – на долю $\beta \in [0; 1]$. Иногда наличие хотя бы одной принципиальной ошибки в последовательности этапов ОКР может обесценить все прочие, выполненные безошибочно, т.е. $\alpha \approx 1$ (впрочем, возможно, что ценность их результатов снизится незначительно, т.е. $\alpha \ll 1$). Поскольку конструирование изделия и разработка технологии его производства представляют собой, прежде всего, трудоемкие, а не материалоемкие процессы, стоимостные потери тесно связаны с временными. Поэтому приравнивание доли временных и стоимостных потерь при переделке оправдано (хотя можно ввести разные доли переделок по времени и по стоимости).

В случае обнаружения на этапе ТПП нескольких ошибок, подлежат переделке этапы ОКР и ТПП, начиная с самой ранней ошибки. В процессе переделки все ошибки, допущенные ранее на перерабатываемых этапах, будут исправлены, однако возникает вероятность совершения новых (вторичных) ошибок. Если ошибка не обнаружена на последнем этапе ТПП, она будет обнаружена позднее, в процессе производства и эксплуатации. При этом издержки на исправление этой ошибки, связанные с переработкой ОКР и ТПП, будут совпадать с издержками при ее обнаружении на последнем этапе ТПП. Кроме того, ошибки, не обнаруженные в ходе ТПП, приведут к дополнительным издержкам в ходе серийного производства и эксплуатации. Однако оценка таких дополнительных потерь выходит за рамки настоящей статьи. В связи с этим, не изменяя окончательного результата, далее будем считать, что если любая ошибка не была выявлена до последнего этапа ТПП, то она будет выявлена на последнем этапе ТПП.

Для оценки затрат, связанных с переделкой ОКР и ТПП необходимо оценить ожидаемое значение $\Delta N = \Delta N^{\text{ОКР}} = \Delta N^{\text{ТПП}}$ количества эта-

пов, подлежащих переделке. Для дальнейшего качественного анализа полезно найти относительно простую приближенную формулу для ожидаемого значения общего количества переделок ΔN . Можно показать, что при выполнении

следующих условий: $p \ll \frac{1}{n^2 + n}$,

$1 - q \ll 1$, $n > 1$ (малая вероятность возникновения ошибок на этапе ОКР и высокая вероятность их обнаружения на этапе ТПП) для оценки ожидаемого общего количества переделок, вызванных ошибками в ходе ОКР, можно пользоваться следующей формулой:

$$\begin{aligned} \Delta N &\approx \Delta N_1 = p(1-p)^n \left(\frac{n}{q} + (1-(1-q)^n) \left(\frac{1}{q} - \frac{1}{q^2} \right) \right) \approx \\ &\approx p(1-p)^n (n + (n-1)(1-q)) \approx np - (np)^2 + (n-1)p(1-q) \end{aligned} \quad (1)$$

Тогда ожидаемые длительность и стоимость переделок ОКР и ТПП можно выразить следующим образом:

$$\Delta T^{\text{ОКР}} = \alpha \cdot \tau^{\text{ОКР}} \cdot \Delta N; \quad (2)$$

$$\Delta C^{\text{ОКР}} = \alpha \cdot c^{\text{ОКР}} \cdot \Delta N; \quad (3)$$

$$\Delta T^{\text{ТПП}} = \beta \cdot \tau^{\text{ТПП}} \cdot \Delta N; \quad (4)$$

$$\Delta C^{\text{ТПП}} = \beta \cdot c^{\text{ТПП}} \cdot \Delta N, \quad (5)$$

где $\Delta N = \Delta N^{\text{ОКР}} = \Delta N^{\text{ТПП}}$ – ожидаемые количества этапов ОКР и ТПП, подлежащих переделке, для расчета которых можно воспользоваться, например, формулой (1).

Суммируя выражения (2) и (4), а также (3) и (5), можно найти ожидаемый прирост суммарных длительности и стоимости ОКР и ТПП, вызванный ошибками в проектировании и последующими переделками:

$$\delta T = \Delta T^{\text{ОКР}} + \Delta T^{\text{ТПП}} = \Delta N (\alpha \cdot \tau^{\text{ОКР}} + \beta \cdot \tau^{\text{ТПП}}); \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \delta C &= \Delta C^{\text{ОКР}} + \Delta C^{\text{ТПП}} + E_{\text{интегр}}^{\text{ОКР+ТПП}} = \\ &= \Delta N (\alpha \cdot c^{\text{ОКР}} + \beta \cdot c^{\text{ТПП}}) + E_{\text{интегр}}^{\text{ОКР+ТПП}}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $E_{\text{интегр}}^{\text{ОКР+ТПП}}$ – дополнительные расходы на ОКР и ТПП, необходимые для их интеграции и параллельного выполнения. Поскольку рассматриваемая здесь интеграция ОКР и ТПП реализуется на базе современных информационных технологий, прежде всего, *CALS*, и требует приобретения и эксплуатации дорогостоящих программно-аппаратных средств, а также существенных организационных изменений на предприятиях (подробнее см. [3. Калянов Г.Н. Консалтинг при автоматизации предприятий / М.:

СИНТЕГ, 1997 – 316с., 4. Клочков В.В. CALS-технологии в авиационной промышленности: организационно-экономические аспекты. М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2008. 124 с.]), необходимо учитывать соответствующие затраты.

Выше рассматривалась стратегия параллельного выполнения ОКР и ТПП, реализуемая на базе CALS-технологий. Если же, как это делалось традиционно, ТПП начинается только по завершении ОКР, после передачи технологом полного комплекта конструкторской документации, тогда, на каком бы этапе ОКР ни была допущена ошибка, разработка изделия будет доведена до конца. При этом, если ошибка допущена на i -м этапе ОКР, переделке в любом случае подлежит $(n - i + 1)$ этапов ОКР. Тогда ожидаемое количество этапов ОКР, подлежащих переделке, можно оценить следующим образом (как и ранее, предполагаем, что выполняется условие

$p \ll \frac{1}{n^2 + n}$. Это позволяет пренебрегать относительно малочисленными кратными и повторными ошибками):

$$\begin{aligned} \Delta N_{\text{посл}}^{\text{ОКР}} &= p(1-p)^n \sum_{i=1}^n (n-i+1) = (8) \\ &= p(1-p)^n \frac{n(n+1)}{2} = \left(1 - \frac{\mu}{n}\right)^n \mu \frac{n+1}{2} \end{aligned}$$

Здесь введено обозначение $\mu = np$ – ожидаемое количество ошибок в ходе ОКР при последовательном выполнении ОКР и ТПП (без учета вторичных ошибок).

Заметим, что даже при традиционном, последовательном выполнении ОКР и ТПП, ожидаемая доля ОКР, подлежащих переделке, сокращается по мере увеличения числа этапов (при фиксированном μ). В частности, при $n = 1$ (ОКР вообще не делятся на этапы), при появлении ошибки всегда придется переделывать 100% работы, а при увеличении числа этапов ожидаемая доля переделок снижается.

Соответственно, ожидаемая длительность и стоимость переделок на стадии ОКР при последовательном выполнении ОКР и ТПП примут следующие значения (с учетом результата (8)):

$$\Delta T_{\text{посл}}^{\text{ОКР}} = \alpha \cdot \tau^{\text{ОКР}} \cdot \Delta N_{\text{посл}}^{\text{ОКР}} \approx \alpha \cdot \tau^{\text{ОКР}} \cdot \mu \cdot \frac{n+1}{2}; \quad (9)$$

$$\Delta C_{\text{посл}}^{\text{ОКР}} = \alpha \cdot c^{\text{ОКР}} \cdot \Delta N_{\text{посл}}^{\text{ОКР}} \approx \alpha \cdot c^{\text{ОКР}} \cdot \mu \cdot \frac{n+1}{2}; \quad (10)$$

Что касается ожидаемого количества этапов ТПП, подлежащих переделке, а также ожидаемых длительности и стоимости этих переделок,

они определяются так же, как и при параллельном выполнении ОКР и ТПП, поскольку при их последовательном выполнении также придется переделывать лишь те этапы ТПП, которые следуют за ошибкой. Следовательно, ожидаемый прирост стоимости и длительности ОКР и ТПП относительно планового уровня при традиционной последовательной организации этих процессов выражается следующими формулами (они получены суммированием выражений (4) и (9), а также (5) и (10)):

$$\begin{aligned} \delta T_{\text{посл}} &= \Delta T_{\text{посл}}^{\text{ОКР}} + \Delta T^{\text{ТПП}} = \\ &= \alpha \cdot \tau^{\text{ОКР}} \cdot \Delta N_{\text{посл}}^{\text{ОКР}} + \beta \cdot \tau^{\text{ТПП}} \cdot \Delta N; \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta C_{\text{посл}} &= \Delta C_{\text{посл}}^{\text{ОКР}} + \Delta C^{\text{ТПП}} = \\ &= \alpha \cdot c^{\text{ОКР}} \cdot \Delta N_{\text{посл}}^{\text{ОКР}} + \beta \cdot c^{\text{ТПП}} \cdot \Delta N. \quad (12) \end{aligned}$$

Сопоставив выражения (6) и (11), а также (7) и (12), можно найти относительное сокращение прироста длительности и стоимости ОКР и ТПП, вызванного ошибками и последующими переделками при переходе от последовательного выполнения ОКР и ТПП к параллельному.

Далее обозначим $A = \frac{\beta \cdot \tau^{\text{ТПП}}}{\alpha \cdot \tau^{\text{ОКР}}}$, $B = \frac{\beta \cdot c^{\text{ТПП}}}{\alpha \cdot c^{\text{ОКР}}}$,

$$C = \frac{E_{\text{интегр}}^{\text{ОКР+ТПП}}}{\alpha \cdot c^{\text{ОКР}}}.$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta T_{\text{посл}} - \delta T}{\delta T_{\text{посл}}} &= \frac{\Delta T_{\text{посл}}^{\text{ОКР}} - \Delta T^{\text{ОКР}}}{\Delta T_{\text{посл}}^{\text{ОКР}} + \Delta T^{\text{ТПП}}} = \\ &= \frac{1 - \Delta N / \Delta N_{\text{посл}}^{\text{ОКР}}}{1 + A \cdot \Delta N / \Delta N_{\text{посл}}^{\text{ОКР}}} = \frac{1 - \frac{2}{n+1}}{1 + A \cdot \frac{2}{n+1}}, \\ &= \frac{n-1}{n+1+2A} = 1 - 2 \frac{1+A}{n+1+2A}; \quad (13) \end{aligned}$$

$$= \frac{1 - \Delta N / \Delta N_{\text{посл}}^{\text{ОКР}} - C / \Delta N_{\text{посл}}^{\text{ОКР}}}{1 + B \Delta N / \Delta N_{\text{посл}}^{\text{ОКР}}} =$$

$$\frac{\delta C_{\text{посл}} - \delta C}{\delta C_{\text{посл}}} = \frac{\Delta C_{\text{посл}}^{\text{ОКР}} - \Delta C^{\text{ОКР}} - E_{\text{интегр}}^{\text{ОКР+ТПП}}}{\Delta C_{\text{посл}}^{\text{ОКР}} + \Delta C^{\text{ТПП}}} =$$

$$= \frac{1 - \Delta N / \Delta N_{\text{посл}}^{\text{ОКР}} - C / \Delta N_{\text{посл}}^{\text{ОКР}}}{1 + B \Delta N / \Delta N_{\text{посл}}^{\text{ОКР}}} =$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1 - \frac{2}{n+1}}{1 + B \frac{2}{n+1}} - \frac{\frac{2C}{np(n+1)}}{1 + B \frac{2}{n+1}} = \frac{n-1}{n+1+2B} - \frac{2}{np} \frac{C}{n+1+2B} = \\
 &= 1 - 2 \frac{1+B}{n+1+2B} - \frac{2}{np} \frac{C}{n+1+2B}. \quad (14)
 \end{aligned}$$

Это относительное сокращение, достигаемое благодаря новым принципам организации разработки и подготовки производства изделий, можно считать относительной мерой эффективности интеграции ОКР и ТПП.

Разумеется, здесь приведена лишь простейшая иллюстративная модель, но в реальных расчетах можно, оставаясь в рамках предлагаемого подхода, учесть индивидуальные характеристики различных этапов ОКР и ТПП (длительность, стоимость, вероятности допущения и обнаружения ошибки, доля работ, подлежащих переделке, и т.д.). Однако все введенные упрощения могут быть при необходимости сняты.

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ И КАЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНТЕГРАЦИИ ОКР И ТПП

Предлагаемый подход можно использовать для анализа эффективности различных организационных и технологических решений, позволяющих выявлять ошибки на ранних стадиях ЖЦ наукоемкой продукции. Так, например, в процессе испытаний изделий и даже на стадии их эксплуатации выявляются конструктивно-производственные недостатки, устранение которых существенно ускоряется и облегчается, если все участники ЖЦИ находятся в едином информационном пространстве. Эффективность более раннего выявления и устранения ошибок тесно связана с законом "1-10-100", хорошо известным в наукоемкой промышленности (см., например, [2. Васильев В.А., Каландаришвили Ш.Н., Новиков В.А., Одинокоев С.А. Управление качеством и сертификация. М.: Интернет инжиниринг, 2002 – 416 с.]). Он означает, что с переходом на следующий этап ЖЦИ стоимость исправления ранее допущенной ошибки возрастает на порядок. Разумеется, в каждом конкретном случае этот множитель может принимать индивидуальное значение, но качественный вывод остается в силе: ошибки целесообразно выявлять и исправлять на ранних стадиях ЖЦИ, пока еще они не привели к значительным необратимым потерям.

Расчеты по описанным моделям, даже в при-

веденном здесь упрощенном варианте, весьма трудоемки, и потому автоматизированы в среде *Microsoft EXCEL*. С помощью вышеописанных моделей были проведены параметрические расчеты в широком диапазоне значений модельных параметров. Исследовалось влияние на экономическую эффективность интеграции ОКР и ТПП таких факторов, как число этапов ОКР и ТПП, вероятность допущения и обнаружения ошибки на одном этапе, длительность и стоимость одного этапа ОКР и ТПП, доля работ, подлежащих переделке в случае обнаружения ошибки. Анализ результатов расчетов показывает, что ожидаемый объем переделок может сократиться, по сравнению с традиционной организацией разработки и подготовки производства изделий, на десятки процентов, при достаточно тесной интеграции ОКР и ТПП (что соответствует разбиению ОКР и ТПП на достаточно большое количество этапов, порядка 10 или более). Что касается соотношения стоимостей и

длительностей ОКР и ТПП $\frac{\alpha \cdot \tau^{\text{ОКР}}}{\beta \cdot \tau^{\text{ТПП}}}$, достаточ-

но, чтобы относительная значимость ОКР была не меньше, чем ТПП. Гораздо большее значение имеет повышение вероятности раннего обнаружения конструкторских ошибок на соответствующих этапах ТПП.

Определенные качественные выводы можно сделать, и не прибегая к численным примерам, на основе аналитического исследования полученных формул. В рамках данной упрощенной модели благодаря интеграции ОКР и ТПП на основе *CALS*-технологий сокращается лишь ожидаемое число этапов ОКР, подлежащих переделке: $\Delta N^{\text{ОКР}} < \Delta N^{\text{ОКР}}_{\text{посл}}$. Сравнение формул (3) и (8) показывает, что это изменение не будет существенным при следующих условиях:

$$\alpha \cdot \tau^{\text{ОКР}} \square \beta \cdot \tau^{\text{ТПП}}, \quad \alpha \cdot c^{\text{ОКР}} \square \beta \cdot c^{\text{ТПП}}, \quad \Delta N^{\text{ОКР}} \approx \Delta N^{\text{ОКР}}_{\text{посл}}.$$

При больших значениях затрат на новую, интегрированную организацию ОКР и ТПП $E^{\text{ОКР+ТПП}}_{\text{интегр}}$ (с учетом затрат на разработку и внедрение необходимых информационных систем), суммарная стоимость этих стадий ЖЦИ может даже возрасти¹. Напротив, при $\alpha \cdot \tau^{\text{ОКР}} \square \beta \cdot \tau^{\text{ТПП}}$, $\alpha \cdot c^{\text{ОКР}} \square \beta \cdot c^{\text{ТПП}}$ и $\Delta N^{\text{ОКР}} \square \Delta N^{\text{ОКР}}_{\text{посл}}$ интеграция ОКР и ТПП позволяет существенно снизить ожидаемые длительность и стоимость вывода нового изделия на рынок.

¹ Что, впрочем, еще не означает неэффективности интеграции ОКР и ТПП – окончательный ответ можно дать лишь на основе анализа процессов временной конкуренции на рынке наукоемкой продукции.

Как было отмечено в постановке задачи, ускорение предпроизводственных стадий ЖЦИ при интеграции ОКР и ТПП может достигаться за счет двух основных факторов – более раннего обнаружения и исправления ошибок, а также перехода от последовательного к параллельному выполнению соответствующих работ. Целесообразно оценить изменение ожидаемой общей длительности ОКР и ТПП – как плановых работ, так и возможных переделок, исправления ошибок. Однако при описанной в постановке задачи организации ОКР и ТПП (когда соответствующий этап ТПП начинается лишь по завершении определенного этапа ОКР), продолжительность плановых работ не меняется, поскольку отдельные этапы ОКР и ТПП все равно выполняются последовательно. Возможность параллельного выполнения работ на отдельных этапах ОКР и ТПП приведет к сокращению их плановой длительности, но может войти в противоречие с соображениями обнаружения ошибок. Моделирование возможного изменения общей продолжительности работ может существенно осложниться, в зависимости от соотношения длительности этапов разработки изделия ($\tau^{\text{ОКР}}$) и подготовки его производства ($\tau^{\text{ТПП}}$). Так, например, при $\tau^{\text{ОКР}} \ll \tau^{\text{ТПП}}$ (и, соответственно, $T_{\text{план}}^{\text{ОКР}} \ll T_{\text{план}}^{\text{ТПП}}$) подавляющая часть ошибок может быть обнаружена уже по окончании всех n этапов ОКР, и эффект раннего обнаружения ошибок будет почти незначим (что, впрочем, имеет место и при поочередном выполнении этапов ОКР и ТПП, как показано выше). Напротив, при $T_{\text{план}}^{\text{ОКР}} \ll T_{\text{план}}^{\text{ТПП}}$ можно проводить почти полную виртуальную отработку технологии производства изделия после каждого этапа ОКР, но целесообразность такой стратегии, с учетом дополнительных затрат, нуждается в дополнительном анализе. В обоих этих случаях параллельное выполнение ОКР и ТПП слабо повлияет на продолжительность плановых работ, которая при последовательном их выполнении составляла $(T_{\text{план}}^{\text{ОКР}} + T_{\text{план}}^{\text{ТПП}})$, а при переходе к параллельной организации разработки и подготовки производства сократится, приблизительно², до $\max\{T_{\text{план}}^{\text{ОКР}}; T_{\text{план}}^{\text{ТПП}}\}$, что, в свою очередь, мало отличается от суммы $(T_{\text{план}}^{\text{ОКР}} + T_{\text{план}}^{\text{ТПП}})$, если одно из слагаемых в ней существенно выше другого. Таким образом, существенное сокращение плановой продолжительности работ за счет их параллельного выполнения (в идеальном слу-

² Необходимо учесть необходимость выполнения по окончании n -го этапа ОКР, заключительного этапа ТПП.

чае – почти вдвое) возможно лишь в том случае, если ОКР и ТПП имеют близкую, по порядку величины, плановую продолжительность:

$T_{\text{план}}^{\text{ОКР}} \approx T_{\text{план}}^{\text{ТПП}}$. При этом выполнение i -го этапа ТПП и обнаружение возможных ошибок будет происходить с запаздыванием на 1 шаг относительно соответствующего этапа ОКР, что, в принципе, можно учесть путем небольшой модификации используемой здесь модели. Численные оценки показывают, что в указанном случае ускорение предпроизводственных стадий ЖЦИ достигается, главным образом, благодаря переходу от последовательного к параллельному выполнению ОКР и ТПП. Возможность раннего обнаружения и коррекции ошибок в этом случае менее важна.

Таким образом, экономическая эффективность интеграции ОКР и ТПП будет более существенной, если:

- плановые длительность и стоимость ОКР не меньше, или даже выше таковых для ТПП;
- выше вероятность обнаружения ошибки на каждом этапе ТПП;
- больше число этапов ОКР и ТПП.

Чем определяется выполнение этих условий? Поскольку здесь под ТПП подразумевается, в основном, разработка технологических процессов, можно считать, что собственно разработка изделия является не менее длительной и дорогостоящей. Повышению вероятности раннего обнаружения конструкторских ошибок на стадии ТПП способствует применение современных средств моделирования технологических процессов в составе технологических САПР. Что касается увеличения числа этапов ОКР и ТПП, в рамках предлагаемой модели оно соответствует более тесной интеграции разработки и подготовки производства изделий (т.е. повышению интенсивности диалога между конструкторами и технологами), которая и достигается благодаря внедрению CALS-технологий и образованию единого информационного пространства (ЕИП), объединяющего всех участников ЖЦИ. Эти качественные выводы, сделанные на основе проведенного выше экономико-математического анализа, следует принимать во внимание при совершенствовании конструкторских и технологических САПР, а также CALS-технологий, обеспечивающих их интеграцию в ЕИП.

ВЫВОДЫ

1. В условиях жесткой временной конкуренции на рынках наукоемкой продукции сокращение длительности ОКР и ТПП может быть более значимым, чем изменение их стоимости при

внедрении информационных технологий, которое может быть как отрицательным, так и положительным. Для сокращения длительности предпроизводственных стадий ЖЦИ и риска ее увеличения, целесообразна интеграция ОКР и ТПП на основе CALS-технологий. Эффективность такого решения определяется

- сокращением ожидаемой продолжительности ОКР и ТПП благодаря их параллельному выполнению;
- возможностью раннего обнаружения конструкторских ошибок и сокращения потребного объема переделок.

Первый фактор более значим в том случае, когда плановые длительности ОКР и ТПП близки по величине. Если плановая продолжительность ОКР существенно выше, чем продолжительность ТПП, наиболее существенна возможность раннего обнаружения и коррекции ошибок. Если же трудоемкость разработки изделия существенно ниже трудоемкости подготовки производства, эффективность интеграции этих стадий ЖЦИ незначительна.

2. Относительное сокращение ожидаемой длительности и стоимости коррекции ошибок на этапах ОКР и ТПП благодаря интеграции этих этапов на базе CALS-технологий в реалистичных условиях достигает нескольких десятков процентов, и будет тем сильнее, чем

- больше число этапов, на которые делятся ОКР и ТПП (т.е. чем теснее их интеграция, интерактивное взаимодействие конструкторов и технологов в реальном масштабе времени);
- выше доля ОКР в суммарной трудоемкости ОКР и ТПП;
- выше вероятность обнаружения конструкторских ошибок на каждом этапе ТПП (т.е. чем лучше развито виртуальное моделирование технологических процессов).

Таким образом, развитие информационных

систем, используемых на стадиях ОКР и ТПП, должно идти, в первую очередь, по пути обеспечения тесной интеграции этих стадий, повышения вероятности обнаружения допущенных конструкторских ошибок, а сокращение ожидаемой трудоемкости ОКР и ТПП благодаря их информатизации (если таковое будет иметь место) менее значимо. Следовательно, основные усилия разработчиков программно-аппаратных средств целесообразно направить на облегчение информационного взаимодействия участников жизненного цикла изделий путем унификации стандартов представления информации и образования единого информационного пространства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бендиков М.А., Ключков В.В. Экономические аспекты внедрения CALS-технологий в авиационной промышленности // Прикладная информатика. 2010. № 1. С. 21-34.
2. Васильев В.А., Каландаршвили Ш.Н., Новиков В.А., Одинокоев С.А. Управление качеством и сертификация. М.: Интермет инжиниринг, 2002 – 416 с.
3. Калянов Г.Н. Консалтинг при автоматизации предприятий / М.: СИНТЕГ, 1997 – 316с.
4. Ключков В.В. CALS-технологии в авиационной промышленности: организационно-экономические аспекты. М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2008. 124 с.
5. Российская энциклопедия CALS. Авиационно-космическое машиностроение / под ред. Заслуженного деятеля науки РФ проф. А.Г. Братухина. М.: НИЦ АСК, 2008. 608 с.
6. Судов Е.В., Левин А.И., Давыдов А.Н., Барабанов В.В. Концепция развития CALS-технологий в промышленности России. М.: НИЦ CALS-технологий “Прикладная логистика”, 2002. 36 с.
7. P.S. Adler and D.A. Helleloyd. Effective Implementation of Integrated CAD/CAM: A Model // IEEE Trans. Eng. Manag., vol EM-34, No. 2, pp. 101-108, May 1987.
8. M. Tolouei-Rad. An approach towards fully integration of CAD and CAM technologies // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. Vol. 18. Issue 1-2, September–October 2006, pp. 31-36.

A COMPLEX PRODUCT DESIGN AND PROCESS ENGINEERING INTEGRATION BASED ON CALS-TECHNOLOGY EFFICIENCY ANALYSIS

© 2012 V.V. Klochkov, A.A. Kolomoets

¹ Institute of Control Sciences named after V.A. Trapeznikov, Russian Academy of Sciences (ICS RAS), Moscow

² Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)

A simplified model for estimation of high technology products design and process engineering possible cost and time reduction due to integration of these life cycle stages based on information technologies is proposed. Recommendations on corresponding information systems priority lines of development are worked out.

Keywords: CALS-technology, development, process engineering, design mistakes, integration, efficiency.

Vladislav Klochkov, Dr. Sci. (Econ.), Cand. Sci. (Tech.).

E-mail: vlad_klochkov@mail.ru

Alexander Kolomoets, Post-Graduate Student, Chair of Computer Simulation, Department of Aeromechanics and Flight Engineering. E-mail: alexk_1985@hotmail.com