

7.9. СОВРЕМЕННЫЕ ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ И РАЗВИТИЕМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ БАЗЫ В ПРИКЛАДНОЙ НАУКЕ И ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Клочков В.В., д.э.н., в.н.с., лаборатория экономической динамики и управления инновациями Института проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской Академии наук, г. Москва;

Зотов В.А., к.т.н., директор департамента, Национальный исследовательский центр «Институт им. Н.Е. Жуковского», г. Жуковский;

Рождественская С.М., начальник отдела, Национальный исследовательский центр «Институт им. Н.Е. Жуковского», г. Жуковский

Перейти на ГЛАВНОЕ МЕНЮ

Обоснованы принципы оценки эффективности использования и развития экспериментальной базы с позиций прикладной науки и наукоемкой промышленности. Сформулирован набор показателей, характеризующих объекты экспериментальной базы и позволяющих решать задачи ее оптимального использования и развития. Особое внимание уделено аспектам реформирования прикладной науки и внедрения системы оценки уровней готовности технологий. С помощью экономико-математической модели выявлены условия, когда может быть эффективным четкое разграничение экспериментальной в зависимости от сложности и требуемого качества исследований и испытаний.

ВВЕДЕНИЕ

Во многих областях науки, техники и промышленности создана разнообразная, весьма сложная и дорогостоящая экспериментальная база научных исследований и разработок (т.е. организационно-техническая система, включающая в себя совокупность экспериментального оборудования, средств обеспечения исследований и испытаний, квалифицированных кадров, методов исследований и испытаний). Ее высокая стоимость (в условиях усиливающегося дефицита ресурсов), трудности ее создания и содержания, ужесточение требований к точности и достоверности исследований и испытаний превращают экспериментальную базу в сложный объект управления, заставляют уделять внимание эффективности использования конкретных объектов экспериментальной базы, планировать ее развитие научно обоснованными формальными методами. В настоящее время в некоторых отраслях высокотехнологичной промышленности, например, в авиационной, реализуется кардинальная реформа прикладной науки, направленная на повышение эффективности исследований и разработок. Происходящие изменения неизбежно затрагивают и процессы использования и развития экспериментальной базы. В данной работе основным объектом исследования является авиационное и соответствующие области прикладной науки. В то же время основные результаты данного исследования могут быть без ограничения общности распространены и на другие отрасли высокотехнологичной промышленности и области прикладной науки.

Экспериментальные исследования – один из главных методов исследований во многих научных дисциплинах и в большинстве областей прикладных исследований и разра-

боток. В то же время, наряду с экспериментами, также используются расчетные исследования и различные виды моделирования – компьютерного численного, имитационного, полунатурного и т.п. Фактически многие реальные методы исследований представляют собой сочетание перечисленных выше «чистых» методов, т.е. являются расчетно-экспериментальными. Как правило, ответ на некоторый вопрос, возникающий в процессе научных исследований и разработок (такими вопросами могут быть проверка качественной гипотезы либо получение количественной оценки некоторой величины), может быть получен различными способами – расчетно-теоретическими, экспериментальными, и следует выбирать их оптимальное сочетание. Критерии оптимальности, которыми руководствуются исследователи в этом выборе, в общем случае, могут отражать следующие аспекты:

- длительность исследования (что особенно актуально в связи с усилением временной конкуренции на рынках инновационной продукции и ужесточением временных ограничений при создании образцов и систем вооружений, военной и специальной техники (ВВСТ) в современной геополитической обстановке);
- затраты на проведение исследования, т.е. фактически его стоимость (при этом могут иметь значение и отдельные составляющие затрат в натуральном выражении, в т.ч. трудоемкость, ресурсоемкость и т.п., поскольку могут быть ограниченными конкретные виды ресурсов – особенно квалифицированные кадры, и дефицит одних ресурсов иногда не может быть компенсирован избытком других, тогда как стоимостная «свертка» такую возможность подразумевает);
- качество исследования, т.е. точность и достоверность получаемых количественных оценок или качественных выводов.

Поскольку эти интегральные характеристики могут вступать в противоречие друг с другом, оптимальный баланс между ними уже определяется в рамках систем более высокого уровня, чем научная сфера как таковая, – в рамках проектов создания наукоемкой продукции, на основе критериев их коммерческой, военно-экономической и другой эффективности. Например, требуется обеспечить заданную (для успешной сертификации на целевом рынке) точность и достоверность испытаний изделия, максимизируя суммарную прибыль от его реализации за жизненный цикл, с учетом как дополнительных затрат на форсирование испытаний, так и возможных потерь вследствие их высокой длительности в условиях временной конкуренции. В такой постановке задачи требования к качеству исследований фиксированы, а между конфликтными требованиями удешевления и ускорения исследований и испытаний ищется оптимальный компромисс. Общая постановка задачи оценивания эффективности исследований и разработок обсуждается в работе [2]. В конечном счете эффективность методов и средств исследований и испытаний, самой организации этих процессов определяется сочетанием трех групп показателей: качества (точности, достоверности, полноты воспроизведения условий и т.п.), стоимости и длительности.

Рациональное сочетание расчетных и экспериментальных методов определяется множеством факторов, среди которых прежде всего следует выделить повторяемость исследований и испытаний.

Как правило, разработка аналитической модели требует создания соответствующей теории, описывающей моделируемый объект или процесс. Это весьма длительный и трудоемкий процесс, в некоторых областях науки занимающий десятки лет, поскольку необходимо достичь адекватного понимания механизмов происходящих процессов. Однако при наличии соответствующей теории и аналитических моделей, сам процесс расчета для конкретного набора условий становится быстрым и малозатратным. Более того, он

может многократно и с низкими затратами повторяться для различных наборов параметров с целью оптимизации проектных и др. решений. Нередко при наличии аналитических моделей возможно решение обратных задач, когда по заданному выходу, т.е. требуемым параметрам технического совершенства объекта, определяются его конструктивные или технологические параметры. Таким образом, наличие аналитических моделей существенно упрощает и ускоряет процессы планирования развития технологий, проектирования наукоемкой продукции.

Возможно, менее длительным и трудоемким является построение численной или имитационной модели, сопряженное с разработкой соответствующего программного обеспечения – программных пакетов, моделирующих комплексов. Разработка численных и аналитических моделей также требует качественного понимания механизмов моделируемых процессов, но оно достигается быстрее чем их теоретическое осмысление, необходимое для построения аналитических формул и теорий (иногда аналитические модели в принципе не могут быть разработаны за приемлемое время). Численный расчет или имитационное моделирование с применением компьютеров, разумеется, более трудоемки и длительны, чем расчеты при наличии аналитических формул. Однако и в этих случаях возможно решение обратной задачи с целью оптимизации проектных параметров.

Что касается экспериментальных исследований, они, разумеется, требуют создания и содержания самой экспериментальной базы (как правило, весьма дорогостоящей), а также нередко длительной и трудоемкой подготовки эксперимента. Например, может потребоваться изготовление моделей для испытания в аэродинамической трубе, на прочностных стендах и т.п., причем эти модели должны обладать подобием с реальными объектами в одном (например, аэродинамика) или даже нескольких аспектах (например, упругоподобные модели для исследования явлений аэроупругости, имитирующие не только аэродинамическую форму изделия, но также его жесткостные характеристики). Также может потребоваться изготовление для исследования или испытаний конкретного объекта уникальной оснастки даже к универсальному экспериментальному оборудованию.

Несмотря на вышеописанные факторы, иногда подготовка натурального эксперимента требует меньше времени, чем подготовка к проведению расчетных исследований. Следует учитывать, что настройка программного обеспечения на конкретный объект также может требовать значительного времени и трудозатрат – например, на построение расчетной сетки в конечно-элементных моделях механики сплошной среды (в аэродинамике, горении и теплообмене, прочности). Иногда и само проведение натурального эксперимента существенно быстрее, чем компьютерные расчеты. Однако, как правило, натурные эксперименты наиболее энергоемки и ресурсоемки по сравнению с прочими методами исследований.

Поэтому если предполагается, что исследования определенного вида будут повторяться многократно на протяжении длительного времени (порядка десятилетий), более рациональным становится переход к преимущественно расчетно-теоретическим методам (в идеале – на основе фундаментальных теорий и аналитических формул) или, по крайней мере, к компьютерному моделированию (численному, имитационному). Высокие постоянные затраты времени и ресурсов на разработку инструментария (теорий и аналитических моделей, либо численных или имитационных моделей и соответствующего программного обеспечения) распределяются на значительное количество исследований, выполненных с их помощью, а «средние переменные затраты» на каждое такое исследование будут сравнительно невелики. Если же, наоборот, предполагается, что исследования данного вида предполагается

повторять лишь эпизодически (или даже однократно), целесообразно выбирать методы, не требующие высоких постоянных затрат времени и труда, пусть даже и сопряженные со значительными средними переменными издержками. Наглядно можно проиллюстрировать описанные принципы выбора рационального метода исследования с помощью схематичных графиков зависимостей, изображенных на рис. 1. На нем постоянная часть затрат времени, средств и других ресурсов, не зависящая от повторяемости исследований, отражена точками пересечения графиков с осью ординат.

Наклон графиков отражает удельные в расчете на одно типовое исследование, переменные затраты времени или других ресурсов. Если соотношение углов наклона для различных видов исследований интуитивно очевидно, то соотношение постоянных составляющих нуждается в обосновании. На первый взгляд, именно для натурального эксперимента с использованием дорогостоящей и сложной экспериментальной базы эти постоянные затраты могут быть наивысшими. Однако здесь необходимо учитывать последовательность этапов познания. Для разработки хотя бы простейших феноменологических моделей изучаемых явлений или систем, позволяющих организовать вычислительный или имитационный компьютерный эксперимент, требуется значительное количество натуральных наблюдений. В свою очередь построение аналитических моделей, как правило, требует пройти две вышеперечисленные стадии познания. То есть можно считать, что постоянные затраты для более совершенных моделей изучаемых процессов или систем поглощают и постоянные, и некоторую долю переменных затрат для менее совершенных моделей и методов исследования. Пунктирными линиями обозначены точки пересечения графиков, т.е. такие граничные значения повторяемости исследований, при которых целесообразно переходить к более совершенным моделям.

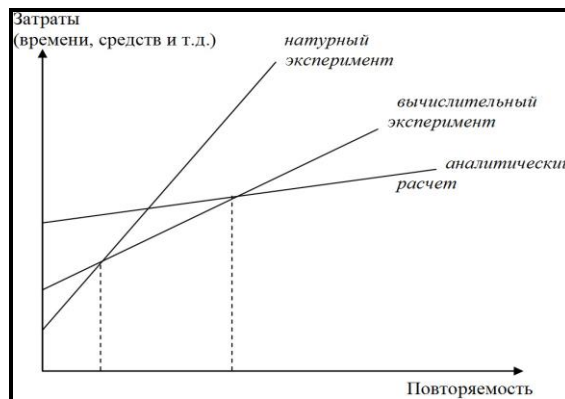


Рис. 1. Зависимость затрат ресурсов и времени от повторяемости исследований и испытаний для различных методов исследований

На основе вышеприведенных рассуждений можно сделать вывод о том, что нет априорной необходимости тотального отказа от натурального эксперимента и перехода к компьютерному моделированию или другим альтернативным методам исследований и испытаний во всех областях науки и техники (хотя такие изменения нередко декларируются). Переход к виртуальным экспериментам, компьютерному моделированию – ни в коем случае не самоцель, а лишь одно из возможных средств ускорения, удешевления, снижения ресурсоемкости и техногенной опасности процесса исследований и испытаний, при сохранении приемлемого их качества, т.е. точности и достоверности.

В различных случаях следует выбирать оптимальные методы – а точнее, оптимальное сочетание аналитиче-

ских, компьютерных моделей и натуральных экспериментов – с учетом повторяемости исследований и испытаний. В составе критериев оптимальности следует учитывать длительность, стоимость, различные составляющие ресурсоемкости, а также точность и достоверность исследований и испытаний. При этом также следует учитывать, что с точки зрения точности и достоверности далеко не все виды исследований и испытаний могут быть проведены в виртуальной форме.

До сих пор во многих видах исследований и испытаний только натуральный эксперимент обеспечивает требуемую, например, для сертификации изделий авиационной техники точность и достоверность измерений, воспроизведения условий эксплуатации и т.п. В то же время и расчетно-теоретические методы последовательно развиваются, в некоторых видах исследований и испытаний (в т.ч. ответственных), замещая натуральный эксперимент. Важным примером является предъявление при сертификации регионального самолета Sukhoi SuperJet 100 результатов компьютерного моделирования разрушения пневматика шасси и других особых случаев, причем эти результаты были зачтены Европейским агентством по авиационной безопасности (EASA), т.е. качество, точность и достоверность виртуальных экспериментов были признаны удовлетворительными.

Именно в таком, более широком, контексте и предлагается рассматривать использование и развитие экспериментальной базы как одного из средств научных исследований и испытаний (иногда они являются альтернативными, иногда дополняют друг друга). Соответственно критерии эффективности использования объектов экспериментальной базы должны отражать достижение с их помощью целей прикладной науки в целом, и даже целей более высокого уровня (в идеале – целей государства в соответствующей сфере, достигаемых путем разработки новых технологий в процессе прикладных исследований, выполняемых за государственный счет).

Инновации в сфере организации прикладных исследований и разработок: уровни готовности технологий

Выполнение прикладных исследований и разработок качественно и в срок требует, помимо полноценного ресурсного обеспечения, также повышения качества управления прикладной наукой как важнейшим звеном национальной инновационной системы [1]. Задача системы управления прикладными научно-исследовательскими работами (НИР) состоит в том, чтобы, несмотря на их высокорисковый характер и присущую им исключительно высокую неопределенность результатов и сроков их получения, обеспечить создание необходимого научно-технического задела (НТЗ) для разработки новых изделий в кратчайшие (и, по возможности, предсказуемые) сроки в пределах ограниченных ресурсов.

В управленческой науке и практике уже разработан ряд решений, позволяющих сократить сроки, стоимость и риски создания НТЗ. С целью формализации тактического управления самим процессом НИР сначала в зарубежной аэрокосмической промышленности, а затем и в других отраслях была введена система оценки *уровней готовности технологий* (УГТ, technology readiness level, **TRL**) [9]. Это оценка зрелости, готовности технологий к применению в разработке и производстве конкретных типов инновационной продукции. Принятая в зарубежной авиационной

науке и промышленности шкала УГТ предусматривает девять уровней, из которых первые шесть охватывают период создания НТЗ, а последующие три относятся к созданию конкретных образцов авиационной техники (рис. 2).

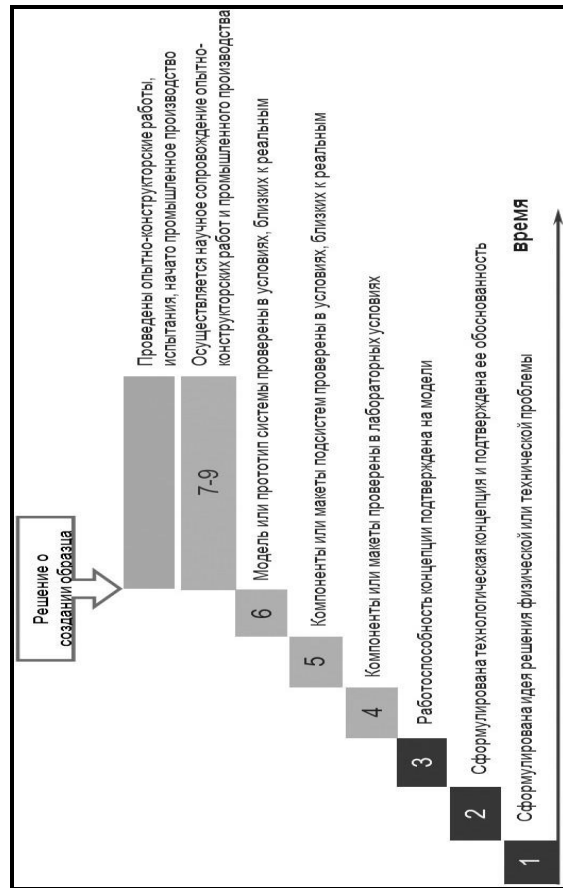


Рис. 2. Шкала уровней готовности технологий

Каждый УГТ имеет определенные критерии прохождения, подтверждается определенным образом – расчетными методами, либо экспериментальными – вначале лабораторными, затем полунатурными наземными и, в конце концов, летными. Готовность НТЗ к промышленной реализации (в наиболее распространенной шкале – УГТ 6) подтверждается, как правило, демонстратором интегрированной технической системы. При этом система в целом должна подтверждать свою работоспособность в условиях, близких к реальным. Чем выше уровень готовности, тем ниже технический риск применения данной технологии, поскольку она проверена в условиях, все более приближенных к реальным условиям эксплуатации. Причем чем выше уровень готовности – тем полнее и система, в составе которой проверяется инновация, а следовательно, тем ниже риск того, что в реальной эксплуатации проявится непредвиденное ранее отрицательное взаимодействие элементов.

На стадии формирования и анализа концепций развития технологий (т.е. на низких уровнях готовности технологий, УГТ 1-3), и сроки достижения резуль-

татов, и сами эти результаты характеризуются значительной неопределенностью. Поэтому на этих стадиях для уменьшения рисков программа исследований должна быть диверсифицирована по направлениям поиска, поскольку приоритетной цели можно достичь различными путями.

И наиболее перспективный из этих альтернативных путей заранее выделить нельзя, необходима проверка целого ряда перспективных «концепций-кандидатов», которая проводится в рамках *проблемно-ориентированных НИР*.

На более поздних стадиях наиболее перспективные технологические решения уже в основном определены и отобраны. Развитие технологий на высоких уровнях готовности (УГТ 4-6) реализуется в рамках *комплексных научно-технологических проектов (КНТП)*. Таким образом, результаты проблемно-ориентированных НИР служат сырьем для формирования комплексных научно-технологических проектов. В рамках КНТП доводится до промышленного уровня готовности именно совокупность взаимодей-

ствующих технологий, т.е. проводится их системная интеграция. Разумеется, совокупность технологий, входящих в КНТП, формируется таким образом, чтобы отдельные технологии дополняли друг друга, обеспечивая синергетический эффект.

В рамках комплексного научно-технологического проекта создается и испытывается демонстратор технологии, т.е. интегрированная система (вплоть до экспериментального летательного аппарата), которая испытывается в условиях, близких к реальным, для подтверждения готовности совокупности новых технологий к использованию при проектировании новой техники.

В то же время следует подчеркнуть, что КНТП реализуется не в интересах создания конкретного изделия, а для создания задела, который может быть применен при разработке целого ряда изделий, в т.ч. конкурирующими разработчиками.

На рис. 3 наглядно изображены различные виды НИР и проектов, реализуемых на разных уровнях готовности технологий.

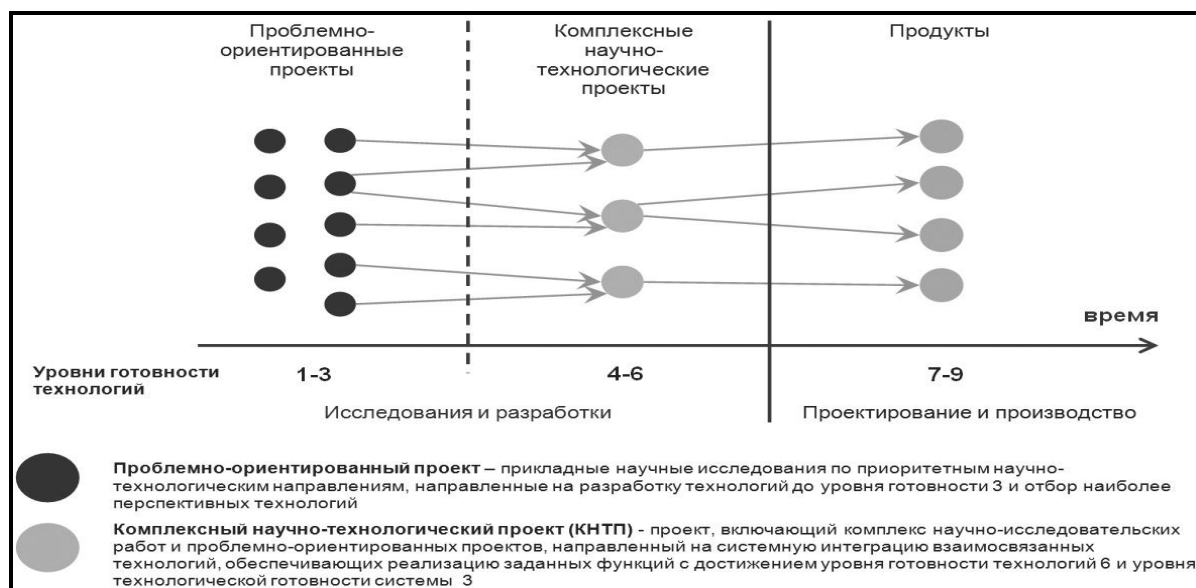


Рис. 3. Виды НИР и проектов при создании научно-технического задела и внедрении технологий в промышленность

В соответствии с описанной структурой программ прикладных исследований и разработок (подробнее см. [3]), экспериментальная база в совокупности с другими средствами исследований может применяться:

- для выполнения проблемно-ориентированных НИР в рамках отдельных научных дисциплин,
- для выполнения исследований в обеспечение системной интеграции технологий в рамках комплексных научно-технологических проектов (включая испытания демонстраторов комплексов новых технологий),
- а также для проведения испытаний образцов авиационной техники, в т.ч. сертификационных.

Перечисленные выше виды исследований и испытаний соответствуют различным уровням готовности технологий. Как правило, с ростом уровней готовности технологий, в соответствии с их определениями (см. [9]), возрастает комплексность исследований и

испытаний (поскольку тестируется все более полная система, и условия должны становиться все ближе к условиям реальной эксплуатации), а также требования к точности и достоверности их результатов, особенно на этапе сертификационных испытаний. Фактически каждому УГТ можно сопоставить набор объектов экспериментальной базы, необходимый для подтверждения достижения этого УГТ. Схематично это отражено на рис. 4. В связи с этим объекты экспериментальной базы целесообразно классифицировать, помимо прочих категорий, и по УГТ, достижение которых подтверждается на этих объектах. Причем на различных УГТ классификация объектов экспериментальной базы по назначению должна быть различной. На ранних УГТ 1-3, т.е. на стадии проблемно-ориентированных НИР, объекты экспериментальной базы подразделяются по дисципли-

нам и видам конкретных исследований, для которых они используются, – например, аэродинамические трубы для исследований в области аэродинамики, испытательные машины для прочностных исследований, пилотажные стенды для исследований в области эргономики кабин, и т.п.

На более поздних УГТ, 4-6, когда развитие технологий уже проводится в рамках комплексных научно-технологических проектов, нацеленных на интеграцию технологий в интересах создания перспективных образцов изделий авиационной техники, исследования и испытания уже становятся комплексными, междисциплинарными.

Поэтому объекты экспериментальной базы должны подразделяться по классам перспективных изделий, в обеспечение создания которых на этой базе проводятся комплексные исследования и испытания. Например, стенды для испытания авиадвигателей могут подразделяться по классу тяги испытываемых изделий, а также по диапазонам воспроизводимых условий полета (до- и сверхзвуковые скорости и т.д.). За основу классификации по назначению для объектов экспериментальной базы, соответствующих УГТ 4-6 и выше, целесообразно принять структуру комплексных научно-технологических проектов (КНТП), реализуемых в прикладной авиационной науке согласно стратегическим планам.

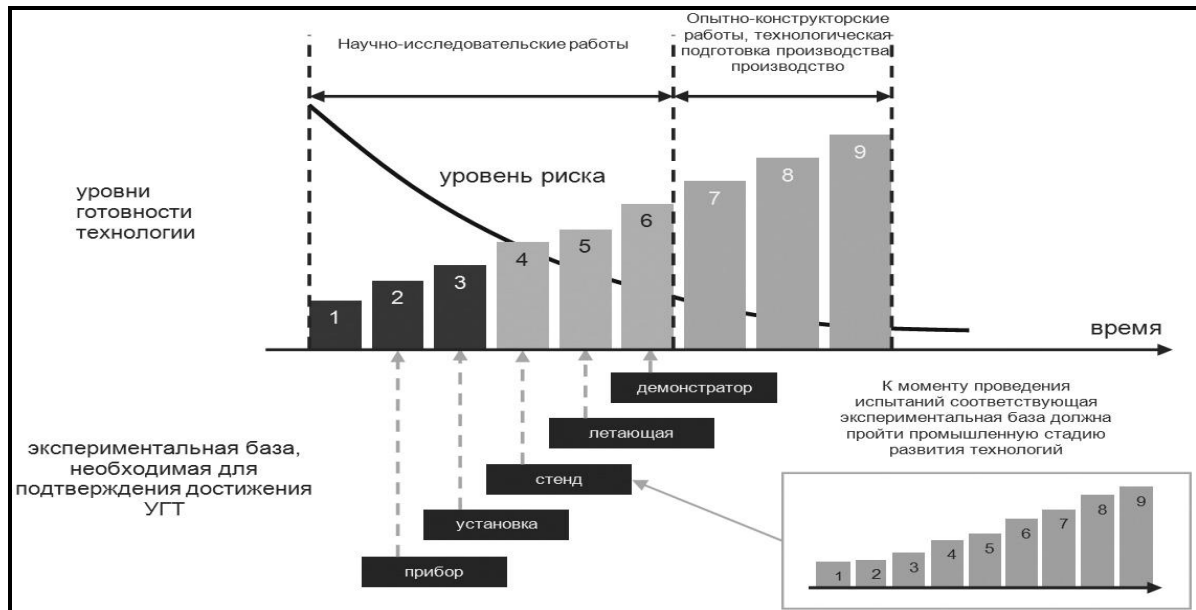


Рис. 4. Соответствие уровней готовности технологий и необходимых объектов экспериментальной базы (пример)

Помимо дифференциации по сложности проводимых исследований и испытаний, по точности и достоверности измерений (и, соответственно, по сложности и стоимости объектов экспериментальной базы), различные УГТ подразумевают, строго говоря, и дифференциацию объектов экспериментальной базы по длительности и ресурсоемкости проведения исследований и испытаний. Желательное соотношение их на различных УГТ определяется спецификой проводимых на этих УГТ исследований и разработок.

На стадии проблемно-ориентированных работ проводятся относительно многочисленные («серийные») эксперименты, но, как правило, в рамках одной дисциплины – например, аэродинамики, прочности и т.п. На этой стадии проводится первичный анализ эффективности нескольких конкурирующих идей и технических концепций. Поэтому требования к точности и достоверности результатов измерений здесь – наименьшие по сравнению с последующими стадиями. Однако оперативный анализ множества идей и вариантов их реализации требует малой длительности и стоимости проведения экспериментов. При переходе с УГТ 3 на УГТ 4, т.е. при форми-

ровании комплексных научно-технологических проектов, уже начинается системная интеграция взаимодействующих технологий, что подразумевает многодисциплинарный характер исследований и испытаний. В то же время это именно стадия формирования КНТП, когда также требуется перебор альтернативных вариантов их состава. Поэтому и здесь предъявляются повышенные требования к оперативности и дешевизне проведения экспериментов.

Наконец, на УГТ 5-6 проводятся уже испытания макетов систем и демонстраторов технологий в условиях, все более приближенных к условиям реальной эксплуатации. Многообразие вариантов, подлежащих анализу, на этой стадии сведено к минимуму, однако возрастают требования к точности и достоверности воспроизведения условий, проведения самих измерений и анализа их результатов.

Далее на УГТ 7-8 проводятся испытания образцов авиационной техники, систем и комплектных летательных аппаратов, в т.ч. сертификационные испытания. Несмотря на то, что развитие авиационной техники на УГТ 7-9 уже полностью относится к сфере ответственности организаций промышленности (подробнее см. [3]), сертификационные испытания

должны проводиться на независимой экспериментальной базе, также сосредоточенной в организациях государственного сектора прикладной науки. Это связано с категорическим требованием обеспечения объективности и независимости испытаний. Поэтому стратегические планы поддержания и развития экспериментальной базы, методов и средств исследований авиационной науки в обязательном порядке должны предусматривать и обеспечение возможности проведения всей необходимой номенклатуры сертификационных испытаний авиационной техники, причем с выполнением всех требований наднациональных авиационных властей, в зоне юрисдикции которых далее предполагается продажа и эксплуатация отечественной авиационной техники.

Анализ факторов, определяющих уровень развития и эффективность использования объектов экспериментальной базы

Как обосновано выше, следует рассматривать объекты экспериментальной базы как одни из возможных и необходимых в целом ряде случаев средств исследований и испытаний (а экспериментальные исследования, соответственно, как одни из равноправных методов исследований и испытаний). Поэтому никакие частные показатели уровня развития объектов экспериментальной базы и эффективности их использования не могут рассматриваться как решающие, они играют лишь вспомогательную роль. Экспериментальная база и методы экспериментальных исследований (как и методы расчетно-теоретических исследований) должны служить достижению генеральных целей развития науки. Генеральные цели развития методов и средств исследований, определенные в Плате деятельности Федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр «Институт им. Н.Е. Жуковского» по развитию науки и технологий в авиастроении на период 2016-2030 г., утвержденном распоряжением Правительства РФ от 16 сентября 2016 г. №1959-р, включают в себя:

- совершенствование и развитие методологии, методов и средств научных исследований и испытаний;
- полноту номенклатуры, качество и достоверность экспериментальных исследований, сертификационных испытаний;
- повышение экономичности, энергоэффективности, достоверности, надежности и безопасности проведения исследований и испытаний, сокращение длительности их проведения, сроков создания научно-технического задела, разработки и технологической подготовки производства изделий авиационной техники;
- оптимизацию использования объектов экспериментальной базы, включая развитие и унификацию программного и вычислительного обеспечения научных исследований и испытаний;
- создание и использование отраслевой инфраструктуры высокопроизводительных и распределенных вычислений.

Показатели, характеризующие развитие и использование объектов экспериментальной базы, должны отражать степень достижения этих генеральных целей. Строго говоря, первая группа целей – *совер-*

шенствование и развитие методологии, методов и средств научных исследований и испытаний – является обобщающей, а последующие группы конкретизируют ее достижение, поскольку совершенствование методов и средств исследований может быть направлено на расширение номенклатуры проводимых исследований и испытаний, повышение их качества и достоверности, повышение экономичности и безопасности и т.д. Соответственно различные группы количественных индикаторов должны отражать степень достижения этих, уже более конкретных, групп целей.

Полнота номенклатуры проводимых исследований и испытаний. Прежде всего экспериментальная база в совокупности с другими средствами исследований должна обеспечивать проведение исследований и испытаний по всей необходимой номенклатуре для выполнения стратегических планов исследований и разработок в области авиастроения. Прогнозируемые и планируемые уровни развития технологий, зафиксированные в стратегических планах, определяют:

- виды исследований и испытаний, номенклатуру измерений и наблюдений;
- требуемые диапазоны воспроизводимых условий – например, скоростей и температур набегающего потока, чисел Маха, Рейнольдса и т.п. параметров подобия, нагрузок на материалы и конструкции, частот колебаний, и т.п.

На низких УГТ полнота номенклатуры проводимых исследований определяется:

- покрытием основных дисциплин авиационной науки и основных видов экспериментальных исследований в рамках этих дисциплин;
- диапазонами воспроизводимых условий в рамках определенных видов исследований (как правило, эти диапазоны одномерны).

На высоких уровнях готовности технологий, в соответствии с их определениями, уже требуются многодисциплинарные исследования и испытания, что подразумевает одновременное воспроизведение свойств и условий эксплуатации авиационной техники с точки зрения нескольких дисциплин – например, аэродинамики и прочности конструкций, и т.п., а также одновременное проведение разнородных измерений и их комплексную обработку. Таким образом, для определения полноты номенклатуры исследований и испытаний недостаточно лишь указать изолированные диапазоны изменения условий и требования к точности и достоверности измерения определенных величин. На высоких УГТ такие требования уже предъявляются в комплексе, т.е. представляют собой многомерную допустимую область параметров воспроизводимых условий.

Таким образом, методы и средства исследований авиационной науки (в т.ч. объекты экспериментальной базы и методы экспериментальных исследований) характеризуются, с точки зрения полноты номенклатуры проводимых исследований и испытаний:

- перечнем их видов по дисциплинам (аэродинамика, прочность, динамика полета, процессы управления и т.п. либо комплексные многодисциплинарные исследования и испытания);
- диапазоном воспроизводимых условий (для комплексных многодисциплинарных исследований – многомерной областью значений параметров условий).

Интегральные показатели полноты покрытия всей необходимой номенклатуры исследований и испытаний должны, таким образом, отражать следующие компоненты.

Для проблемно-ориентированных НИР (УГТ 1-3):

- покрытие приоритетных направлений развития науки и технологий в авиастроении в соответствии с Планом деятельности (в виде бинарного индикатора – покрывает или не покрывает, т.е. позволяет ли имеющаяся экспериментальная база проводить эксперименты и испытания, соответствующие всем перечисленным в Плане деятельности приоритетным направлениям);
- долю планового (прогнозного) диапазона изменения воспроизводимых условий, которую можно воспроизвести на данной экспериментальной базе.

Для комплексных научно-технологических проектов и сертификационных испытаний (УГТ 4-6 и 7-9):

- покрытие номенклатуры КНТП, определенной в Плане деятельности, а также перспективного модельного ряда образцов авиационной техники, которые предполагается разрабатывать и производить в организациях промышленности;
- видов комплексных междисциплинарных исследований и испытаний (в виде бинарного индикатора – покрывает или не покрывает);
- доли планового (прогнозного) диапазона изменения воспроизводимых условий (по каждому параметру, воспроизводимому в комплексных исследованиях и испытаниях), которую можно воспроизвести на данной экспериментальной базе.

Точность и достоверность измерений, наблюдений, расчетов и их анализа. Следующая группа целей развития методов и средств исследований, определенных в Плане деятельности, представляет собой повышение качества измерений, наблюдений и их анализа. С одной стороны, в ряде случаев здесь действуют категорические требования обеспечения точности и достоверности получаемых количественных оценок и качественных выводов не ниже заданных порогов, особенно, в части сертификационных испытаний. На высоких УГТ эти пороговые требования представляют собой многомерную область допустимых параметров точности и достоверности экспериментов и обработки их результатов. С другой стороны, на более низких УГТ таких требований может и не быть, а повышение качества экспериментальных исследований становится предметом компромисса, оптимального выбора между:

- необходимым для этого удорожанием экспериментальной базы и самих экспериментов,
- а также сокращением потребного объема экспериментов и испытаний благодаря повышению их точности и достоверности (повышению «зачетности» испытаний и экспериментов).

В прикладной математической статистике (см., например, [7]) разработаны методы оценки минимально необходимого (для проверки определенной гипотезы или получения некоторой количественной оценки) эмпирическим путем, количества экспериментов. Также, разумеется, развиты и более комплексные методы математического планирования экспериментов [10]. Эти методы могут служить основой для оптимизации требуемого уровня точности и достоверности измерений, наблюдений или компьютерных расчетов.

Сокращение длительности и ресурсоемкости исследований и испытаний. Достижение этой группы

генеральных целей развития методов и средств исследований измеряется показателями общей длительности, а также потребных объемов ресурсов, для проведения всех видов исследований и испытаний, рассмотренных выше. Как обосновано ранее, формирование требований к целевым уровням этих показателей возможно лишь в рамках надсистем более высокого уровня (охватывающих весь жизненный цикл исследований, разработок, производства и эксплуатации образцов авиационной техники), что позволяет найти оптимальный баланс между конфликтными требованиями сокращения длительности и стоимости исследований и испытаний.

Показатели ресурсоемкости и стоимости экспериментальных исследований должны включать в себя:

- трудоемкость проведения экспериментов (с дифференциацией по профессиям и квалификациям задействованного персонала);
- энергоемкость проведения экспериментов;
- затраты прочих видов ресурсов (в т.ч. расходных материалов, технологических газов и жидкостей) на проведение экспериментов;
- те же показатели, но в стоимостной форме;
- суммарную стоимость проведения эксперимента.

Поскольку важную роль в планировании исследований, выборе оптимальной их методологии играет разделение на собственно проведение эксперимента и различные подготовительные операции (модельное производство, изготовление оснастки, установку моделей, настройку информационно-измерительных систем, и т.п.), все вышеописанные показатели длительности (стоимости, ресурсоемкости) проводимых экспериментов следует приводить с таким разделением:

- длительность (стоимость, ресурсоемкость) собственно рабочего цикла экспериментального исследования или испытания,
- длительность (стоимость, ресурсоемкость) подготовительных операций.

Кроме того, само содержание объектов экспериментальной базы требует затрат труда, энергии и прочих видов ресурсов. Поэтому необходимо также указывать:

- трудоемкость содержания объекта (с дифференциацией по профессиям и квалификациям задействованного персонала) за календарный период (например, год);
- энергоемкость содержания объекта за период;
- затраты прочих видов ресурсов на содержание объекта за период;
- те же показатели, но в стоимостной форме;
- суммарную стоимость содержания объекта за период.

Если стоимость и ресурсоемкость проведения экспериментов характеризует переменную часть затрат различных видов ресурсов, то стоимость и ресурсоемкость содержания объекта экспериментальной базы – постоянную часть затрат, связанных с экспериментальными исследованиями.

В принципе такое разделение актуально для любых методов и средств исследований и испытаний. Для расчетно-теоретических методов в постоянной части затрат должны фигурировать затраты:

- на разработку соответствующих теорий, моделей, аналитических формул;
- на разработку численных методов расчета;
- на разработку или приобретение (а также, возможно, адаптацию) программного обеспечения;

- на приобретение и содержание аппаратных средств компьютерного моделирования.

Эти методы и средства исследований играют для расчетно-теоретических подходов ту же роль, что и объекты экспериментальной базы – для экспериментальных подходов. Строго говоря, и для последних требуется разработка:

- методик исследований и испытаний;
- управления и планирования экспериментов;
- методов и, возможно, программного обеспечения анализа и обработки результатов измерений и наблюдений, и т.д.

Переменная составляющая затрат на проведение собственно исследований и испытаний для расчетно-теоретических методов включает в себя, главным образом, трудозатраты специалистов, проводящих численные расчеты, компьютерные эксперименты и т.п. Как уже отмечено выше, такие методы исследований характеризуются низкими, или даже нулевыми, значениями затрат прочих ресурсов, помимо труда, – например, энергии, технологических газов, жидкостей и других расходных материалов.

Установленное здесь соответствие между постоянными и переменными составляющими затрат различных ресурсов позволяет рассматривать любые методы исследований и испытаний – расчетно-теоретические (на основе аналитических моделей либо компьютерного моделирования), экспериментальные, их сочетания – на единой методической основе, что позволяет сравнивать их эффективность и выбирать оптимальные методы исследований и испытаний, а также их оптимальные сочетания.

Оптимизация использования объектов экспериментальной базы. Эта группа генеральных целей по своему содержанию тесно связана с предшествующей группой и направлена на сокращение затрат на проведение исследований и испытаний путем более рационального использования имеющихся объектов, минимизации их потребного количества и, как следствие, – суммарных затрат на создание и содержание объектов экспериментальной базы. В свою очередь эти цели достигаются путем:

- повышения загрузки имеющихся объектов вместо создания новых (в т.ч. за счет организации центров коллективного пользования (ЦКП) объектами экспериментальной базы), исключения непродуктивного дублирования объектов экспериментальной базы;
- комплексирования программ экспериментальных исследований и испытаний для одновременного получения большего объема информации в каждом эксперименте или испытании.

Как следует из анализа предыдущей группы показателей, с ростом коэффициента загрузки объектов экспериментальной базы сокращаются удельные, в расчете на один эксперимент или испытание, затраты различных ресурсов на содержание объектов. Исключение нерационального дублирования позволяет сократить суммарные затраты на содержание объектов экспериментальной базы при выполнении фиксированной программы исследований и испытаний, поскольку она выполняется меньшим количеством объектов. Организация ЦКП (в расчете как на выполнение собственной программы исследований и испытаний, так и на внешних заказчиков) позволяет частично снизить удельные затраты на содержа-

ние экспериментальной базы путем распределения соответствующих совокупных затрат (часть которых несут внешние заказчики) на большее количество экспериментов и испытаний.

В то же время следует учитывать, что повышение коэффициента загрузки – не самоцель, поскольку оно позволяет сократить лишь одну из статей издержек на исследования и испытания, а именно – затраты на создание и содержание объектов экспериментальной базы. Возможные мероприятия по ее развитию могут предполагать, в т.ч. приобретение и использование более производительного оборудования, так что даже в рамках ЦКП коэффициент загрузки может сократиться. Однако при этом за счет более совершенных технологий суммарные затраты на проведение исследований и испытаний могут снизиться.

Результурующий эффект изменений технологии исследований и испытаний, приводящих к изменению коэффициента загрузки объектов экспериментальной базы, зависит от структуры стоимости и ресурсоемкости экспериментальных исследований в данной области, а конкретнее – от соотношения удельного веса в общей стоимости или ресурсоемкости:

- содержания объектов экспериментальной базы (постоянной составляющей);
- собственно, проведения исследований и испытаний (переменной составляющей).

Поэтому показатели коэффициентов загрузки объектов экспериментальной базы могут использоваться лишь в качестве вспомогательных при принятии управленческих решений.

При формировании ЦКП также учитывается (как свидетельствует мировой опыт, а также методические рекомендации по обоснованию эффективности создания ЦКП в отечественной академической и вузовской науке [6, 8]) показатель доли внешних заказов в общем объеме исследований и испытаний. Он показывает, какая доля исследований и испытаний проводится в интересах внешних заказчиков и какую долю затрат на содержание объектов экспериментальной базы можно на них переложить. Однако и этот показатель должен рассматриваться лишь в качестве вспомогательного, поскольку даже при относительно малой доле внешних заказов формирование и функционирование ЦКП может быть эффективным в сравнении с изолированным содержанием и использованием объектов экспериментальной базы.

Обоснование перечня показателей объектов экспериментальной базы и их применение для целей управления

Таким образом, для каждого объекта экспериментальной базы, причем по каждому виду исследований и испытаний, необходимо указать:

- виды проводимых исследований и испытаний, классифицируемые в соответствии с подтверждаемым на данном объекте УГТ;
- диапазоны воспроизводимых условий и их сравнение с требуемыми диапазонами согласно Плану деятельности;
- точность и достоверность измерений основных параметров, и их сравнение с требуемым уровнем для соответствующих УГТ;

- длительность подготовки (в соответствующих данному виду исследований и испытаний единицах времени – годы, сутки, часы, минуты) $\bar{t}_{подг}$ и собственно проведения $\bar{t}_{исп}$ типового эксперимента (либо среднюю длительность для всех экспериментальных исследований и испытаний, проведенных за отчетный период, определяемую как отношение суммарной длительности подготовки и собственно проведения экспериментов $(T_{подг} + T_{исп})$ к общему количеству экспериментов за период);
- трудоемкость содержания объекта $\{I_{содерж}^j\}$, чел.х ч / г, с разделением по профессиям и квалификации участвующего персонала ($j = 1, 2, \dots, m$ – профессии и квалификации);
- ресурсоемкость содержания объекта $\{a_{содерж}^i\}$, ед. ресурса / г, для каждого вида используемых ресурсов, обозначаемых индексами $i = 1, 2, \dots, n$ (в качестве ресурсов рассматриваются электро- и теплоэнергия, измеряемые в кВт х ч и Гкал, технологические жидкости и газы и т.п.);
- трудовые затраты на содержание объекта, руб. / г, определяемые как сумма произведений ставок оплаты труда работников различных профессий и квалификаций $\{z^j\}$, руб. / чел. х ч, на трудоемкости содержания объекта: $C_{содерж}^{труд} = \sum_{j=1}^m I_{содерж}^j \times z^j$;
- материальные затраты на содержание объекта, руб. / г, определяемые как сумма произведений цен различных ресурсов $\{r^i\}$, руб. / ед. ресурса, на ресурсоемкости содержания объекта: $C_{содерж}^{мат} = \sum_{i=1}^n a_{содерж}^i \times r^i$;
- суммарные прямые затраты на содержание объекта, руб. / г, определяемые как сумма трудовых и материальных затрат: $DC_{содерж} = C_{содерж}^{труд} + C_{содерж}^{мат}$;
- амортизационные отчисления по данному объекту $C_{аморт}$, руб. / г;
- суммарные общие затраты на содержание объекта $C_{содерж} = C_{аморт} + DC_{содерж}$, руб. / г;
- трудоемкость подготовки и собственно проведения эксперимента $\{I_{подг}^j\}$ и $\{I_{исп}^j\}$, чел. х ч / эксперимент, с разделением по профессиям и квалификации участвующего персонала ($j = 1, 2, \dots, m$ – профессии и квалификации);
- ресурсоемкость подготовки и собственно проведения эксперимента $\{a_{подг}^i\}$ и $\{a_{исп}^i\}$, ед. ресурса / эксперимент, для каждого вида используемых ресурсов, обозначаемых индексами $i = 1, 2, \dots, n$ (в качестве ресурсов рассматриваются электро- и теплоэнергия, измеряемые в кВт х ч и Гкал, технологические жидкости и газы, и т.п.);
- трудовые затраты на подготовку и собственно проведение эксперимента, руб. / эксперимент, определяемые как сумма произведений ставок оплаты труда работников различных профессий и квалификаций $\{z^j\}$, руб. / чел. х ч, на трудоемкости подготовки и собственно проведения эксперимента: $C_{подг}^{труд} = \sum_{j=1}^m I_{подг}^j \times z^j$, $C_{исп}^{труд} = \sum_{j=1}^m I_{исп}^j \times z^j$;

- материальные затраты на подготовку и собственно проведение эксперимента, руб. / эксперимент, определяемые как сумма произведений цен различных ресурсов $\{r^i\}$, руб. / ед. ресурса, на ресурсоемкости подготовки и собственно проведения эксперимента:

$$C_{подг}^{мат} = \sum_{i=1}^n a_{подг}^i \times r^i, C_{исп}^{мат} = \sum_{i=1}^n a_{исп}^i \times r^i;$$

- суммарные прямые затраты на подготовку и собственно проведение эксперимента, руб. / эксперимент, определяемые как сумма трудовых и материальных затрат: $dc_{подг} = C_{подг}^{труд} + C_{подг}^{мат}$,

$$dc_{исп} = C_{исп}^{труд} + C_{исп}^{мат};$$

- коэффициент загрузки объекта, определяемый как отношение суммарного времени проведения экспериментов за период к максимальной производительности, с учетом подготовки экспериментов:

$$k_3 = \frac{T_{подг} + T_{исп}}{T_{max}};$$

- доля исследований и испытаний, выполняемых в интересах внешних заказчиков: $\alpha_{внеш} = \frac{T'_{подг} + T'_{исп}}{T_{подг} + T_{исп}}$

(штрих означает проведение исследований и испытаний в интересах внешних заказчиков).

Наличие информации о различных объектах экспериментальной базы в вышеописанном формате позволяет:

- принимать обоснованные решения по поддержанию, развитию (в т.ч. модернизации и строительству новых объектов) экспериментальной базы, по развитию методов экспериментальных исследований, в обеспечении выполнения стратегических планов исследований и разработок в авиационной промышленности;
- выбирать оптимальные альтернативы среди различных вариантов развития экспериментальной базы, методов экспериментальных исследований и других методов исследований и испытаний по критериям длительности, стоимости, отдельных показателей ресурсоемкости (трудоемкости, в т.ч. по отдельным профессиям и квалификациям, энергоемкости и др.), точности и достоверности измерений.

Далее будет приведен простой и наглядный пример применения показателей из сформированного выше перечня для обоснования важных управленческих решений в сфере использования и развития объектов экспериментальной базы авиационной науки.

Можно привести и другие примеры использования подобных показателей для принятия оптимальных решений в сфере развития научной инфраструктуры.

Так, в работах [4-6] аналогичные показатели используются для моделирования ЦКП научным оборудованием и для обоснования путей их развития, а также развития методов и средств исследований и испытаний.

В целом такой набор технических и экономических показателей достаточно универсален для различных объектов экспериментальной базы.

Он позволит принимать решения о ее использовании и развитии, оптимальные по критериям длительности или стоимости исследований при заданном их качестве.

Анализ эффективности жесткого разграничения объектов экспериментальной базы по уровням готовности технологий

Как правило, для подтверждения достижения более высоких уровней готовности технологий, а тем более для проведения сертификационных испытаний авиационной техники, используется и более сложная и дорогостоящая (как в строительстве, так и в эксплуатации) экспериментальная база, тогда как на низких УГТ достаточно более простых и дешевых объектов, обладающих меньшими точностью и достоверностью измерений, возможно – меньшими возможностями воспроизведения диапазона условий эксплуатации изделий авиационной техники, меньшей комплексностью проводимых исследований и испытаний. Такое соотношение качества и цены проводимых экспериментов обусловлено современной структурой программ прикладных исследований и разработок, предусматривающей различные виды работ и проектов на различных УГТ, в зависимости от уровня рисков, связанных с новыми технологиями и их взаимодействием в составе сложных систем. Соответственно представляется целесообразным разделение объектов экспериментальной базы на сертификационные и исследовательские с дальнейшей дифференциацией по УГТ.

В то же время вполне возможно, что недогруженная экспериментальная база, предназначенная для проведения сертификационных испытаний, используется для проведения исследований на более низких УГТ. Такая практика широко распространена в организациях прикладной науки. На первый взгляд, это однозначно неэффективно, поскольку, как правило, объекты экспериментальной базы и методы исследований, применяемые на более высоких УГТ, требуют и более высоких затрат на проведение экспериментов. Сами эти объекты, как правило, дороже при создании и в эксплуатации. В то же время, если они не загружены в полной мере соответствующими (их характеристикам) видами исследований и испытаний, и остаются резервы их использования для проведения более простых НИР, это может сократить (или даже полностью исключить) потребность в создании и поддержании специализированной экспериментальной базы, соответствующей более низким УГТ.

Как правило, загрузка объектов экспериментальной базы проведением сертификационных испытаний крайне неравномерна, что обусловлено временной структурой жизненного цикла изделий авиационной техники. За периодом исследований и разработок (НИР и ОКР), хотя он и является весьма длительным – 5-10 лет и более – следует еще более продолжительный период серийного производства и эксплуатации образца авиационной техники. И хотя крупные авиастроительные компании, как правило, стремятся сбалансировать возникающие волны работ и денежных потоков, смещая во времени моменты разработки различных классов воздушных судов, авиадвигателей и т.п. изделий авиационной техники, никогда не удается добиться рав-

номерной загрузки объектов экспериментальной базы на протяжении длительных периодов порядка десятилетий.

Это открывает резервы ее использования не только для проведения сертификационных испытаний, но и для выполнения более простых экспериментальных исследований.

Определить условия, при которых описанная ситуация (использование более сложных и дорогостоящих объектов экспериментальной базы для проведения относительно простых видов исследований и испытаний) может быть эффективной, можно с помощью следующей математической модели. Пусть стоимость создания и содержания некоторого объекта экспериментальной базы, предназначенного для проведения сертификационных испытаний, в расчете на год (т.е. стоимость владения) составляет $C_{серт}$ ден. ед. / г; средняя стоимость проведения на этом объекте одного эксперимента, соответствующего более низким УГТ, составляет $C'_{исслед}$ ден. ед. / эксперимент, а годовая производительность, измеренная в экспериментах данного вида (разумеется, определяемая с учетом безусловного приоритета проведения на данном объекте сертификационных испытаний), составляет $\Delta V'_{исслед}$ экспериментов / г. Обозначим среднегодовой объем экспериментов данного вида, соответствующих низким УГТ, $Q_{исслед}$, экспериментов / г.

В принципе эксперименты данного вида вполне могут (и, на первый взгляд, по возможности, должны) проводиться на специализированной экспериментальной базе, более простой и дешевой. Обозначим стоимость создания и содержания специализированного объекта экспериментальной базы, предназначенного исключительно для проведения исследований на низких УГТ, в расчете на год (т.е. стоимость владения) $C_{исслед}$ ден. ед. / г; среднюю стоимость проведения на этом объекте одного эксперимента, соответствующего низким УГТ, обозначим $C_{исслед}$, ден. ед. / эксперимент, а годовую производительность, измеренную в экспериментах данного вида – $V_{исслед}$, экспериментов / г.

Как правило, объекты экспериментальной базы, соответствующие более высоким УГТ, имеют более высокую стоимость владения: $C_{серт} > C_{исслед}$. И стоимость проведения на них экспериментов, соответствующих более низким УГТ, как правило, выше чем на специализированном оборудовании, к которому не предъявляются наивысшие требования к комплексности исследований и испытаний, к точности и достоверности измерений и наблюдений: $C'_{исслед} > C_{исслед}$. В то же время более сложные и дорогостоящие объекты экспериментальной базы в любом случае будут созданы для проведения сертификационных испытаний. Иногда они не будут загружены этими видами работ в полной мере, что позволит перенести на них выполнение более примитивных экспериментов и избежать создания и поддержания специализированных объектов, пусть даже более простых и дешевых.

Рассмотрим вначале ситуацию, когда $Q_{исслед} \leq \Delta V'_{исслед}$, т.е. возможности дополнительной загрузки сертификационного объекта экспериментальной базы полностью исключают необходимость создания специализированных исследовательских объектов, предназначенных исключительно для проведения экспериментов на низких УГТ. Сопоставим общие затраты, связанные с выполнением таких экспериментальных исследований:

- в том случае, если они выполняются на недогруженном сертификационном объекте:

$$\Delta TC_{серт} = Q_{исслед} \times c'_{исслед}$$

- и в том случае, если для их проведения решено создавать и поддерживать специализированные исследовательские объекты экспериментальной базы, в количестве $\left\lceil \frac{Q_{исслед}}{V_{исслед}} \right\rceil$, где квадратные скобки означают округление вверх до ближайшего целого числа:

$$TC_{исслед} = c_{исслед} \times \left\lceil \frac{Q_{исслед}}{V_{исслед}} \right\rceil + Q_{исслед} \times c_{исслед}$$

Подчеркнем, что в первом случае отдельных затрат на владение объектом экспериментальной базы не требуется, поскольку он уже создан и используется для проведения сертификационных испытаний. Условие целесообразности выполнения на сертификационной экспериментальной базе экспериментов, соответствующих низким УГТ, определяется следующими неравенствами:

$$\Delta TC_{серт} < TC_{исслед}$$

$$\Rightarrow Q_{исслед} \times c'_{исслед} < c_{исслед} \times \left\lceil \frac{Q_{исслед}}{V_{исслед}} \right\rceil + Q_{исслед} \times c_{исслед}$$

$$\text{или } c'_{исслед} - c_{исслед} < \frac{c_{исслед}}{Q_{исслед}} \times \left\lceil \frac{Q_{исслед}}{V_{исслед}} \right\rceil \quad (1)$$

То есть прирост стоимости выполнения эксперимента на более дорогостоящей и сложной сертификационной экспериментальной базе должен быть ниже чем удельные (в расчете на один эксперимент) затраты на владение специализированными исследовательскими объектами экспериментальной базы с учетом дискретности их количества.

Можно переписать полученное условие в следующем виде:

$$\left(\frac{c'_{исслед}}{c_{исслед}} - 1 \right) \times \frac{Q_{исслед} \times c_{исслед}}{c_{исслед}} < \left\lceil \frac{Q_{исслед}}{V_{исслед}} \right\rceil$$

В левой части первый множитель отражает относительный прирост удельных прямых затрат на один эксперимент, выполняемый на сертификационной экспериментальной базе, по сравнению с его проведением на более простой и дешевой исследовательской базе. Второй множитель отражает соотношение прямых затрат на проведение экспериментов и затрат на владение объектом экспериментальной базы (для исследовательской экспериментальной базы). Произведение этих величин должно быть меньше вы-

ражения в правой части, которое заведомо не ниже единицы и возрастает с ростом объема экспериментов как ступенчатая функция и т.д. (рис. 5):

$$\left\lceil \frac{Q_{исслед}}{V_{исслед}} \right\rceil = 1, Q_{исслед} \in (0; V_{исслед}]$$

$$\left\lceil \frac{Q_{исслед}}{V_{исслед}} \right\rceil = 2, Q_{исслед} \in (V_{исслед}; 2V_{исслед}]$$

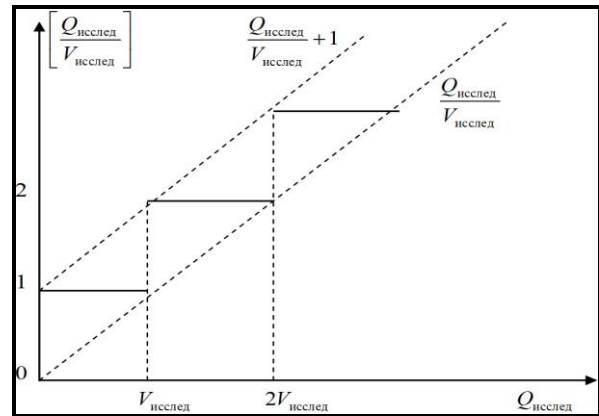


Рис. 5. Поведение функции $\left\lceil \frac{Q_{исслед}}{V_{исслед}} \right\rceil$

Таким образом, правая часть рассматриваемого неравенства заведомо не ниже единицы, а при

$Q_{исслед} > V_{исслед}$ лежит в пределах от $\frac{Q_{исслед}}{V_{исслед}}$ до

$$\frac{Q_{исслед}}{V_{исслед}} + 1.$$

Для получения содержательных качественных выводов об условиях целесообразности и нецелесообразности жесткого разделения сертификационной и исследовательской экспериментальной базы следует провести иллюстративные расчеты с использованием нескольких наборов условных исходных данных.

Пусть, например, $Q_{исслед} \leq V_{исслед}$, т.е. потребуется создание и поддержание единственного исследовательского объекта экспериментальной базы. Именно такая ситуация является наиболее распространенной в большинстве областей авиационной науки и наиболее практически интересной для анализа. Тогда правая часть полученного условия равна единице, а левая часть должна быть меньше единицы.

И если, например, $\frac{Q_{исслед} \cdot c_{исслед}}{c_{исслед}} = 0,2$, т.е. даже

на исследовательской экспериментальной базе эксперименты фондоемки, и 80% затрат составляет стоимость владения, и лишь 20% – прямые затраты, тогда допустимый относительный прирост прямых затрат при переносе исследований на сертификационный объект экспериментальной базы должен быть ниже 500%, т.е. допустим почти шестикратный прирост прямых затрат:

$$\left(\frac{c'_{исслед} - 1}{c_{исслед}}\right) \times 0,2 < 1, \left(\frac{c'_{исслед} - 1}{c_{исслед}}\right) < 5$$

или $\frac{c'_{исслед}}{c_{исслед}} < 6$.

В принципе, и такие соотношения стоимостных параметров могут встречаться в отдельных областях авиационной науки.

Если же, напротив, исследовательская технология экспериментальных исследований не является фондоемкой, а в структуре затрат преобладают прямые издержки.

Например, $\frac{Q_{исслед} \times c_{исслед}}{c_{исслед}} = 4$ (т.е. 80% составляют

прямые затраты на проведение экспериментов, и лишь 20% – стоимость владения объектом экспериментальной базы), допустимый относительный прирост прямых затрат при переносе исследований на сертификационный объект экспериментальной базы должен быть ниже 25%:

$$\left(\frac{c'_{исслед} - 1}{c_{исслед}}\right) \times 4 < 1, \left(\frac{c'_{исслед} - 1}{c_{исслед}}\right) < 0,25.$$

Принимая решение о проведении относительно простых экспериментов на сложной и дорогостоящей сертификационной экспериментальной базе, необходимо контролировать выполнение полученных выше условий, прежде всего – возрастание прямых затрат на проведение экспериментов не выше пороговых уровней, вычисляемых по вышеприведенным формулам.

Несколько более сложна для анализа ситуация, когда $Q_{исслед} > \Delta V'_{исслед}$, т.е., даже используя резервные возможности сертификационной экспериментальной базы, все равно придется создавать и содержать специализированные исследовательские объекты в количестве $\left[\frac{Q_{исслед} - \Delta V'_{исслед}}{V_{исслед}}\right]$.

Целесообразно ли в такой ситуации вообще действовать сертификационные объекты для проведения более простых экспериментов? Если такое решение будет принято, суммарные затраты в расчете на год составят:

$$\Delta TC_{серт} = c_{исслед} \times \left[\frac{Q_{исслед} - \Delta V'_{исслед}}{V_{исслед}}\right] + \Delta V'_{исслед} \times c'_{исслед} + (Q_{исслед} - \Delta V'_{исслед}) \times c_{исслед},$$

а если будет принято решение о полном разделении сертификационных и исследовательских объектов экспериментальной базы по видам проводимых на них исследований и испытаний, среднегодовые затраты будут выражаться ранее полученной формулой:

$$TC_{исслед} = c_{исслед} \times \left[\frac{Q_{исслед}}{V_{исслед}}\right] + Q_{исслед} \times c_{исслед}.$$

Условие предпочтительности первого варианта примет следующий вид:

$$\Delta V'_{исслед} \times (c'_{исслед} - c_{исслед}) < c_{исслед} \times \left\{ \left[\frac{Q_{исслед}}{V_{исслед}}\right] - \left[\frac{Q_{исслед} - \Delta V'_{исслед}}{V_{исслед}}\right] \right\},$$

$$c'_{исслед} - c_{исслед} < \frac{c_{исслед}}{\Delta V'_{исслед}} \times \left\{ \left[\frac{Q_{исслед}}{V_{исслед}}\right] - \left[\frac{Q_{исслед} - \Delta V'_{исслед}}{V_{исслед}}\right] \right\}. \quad (2)$$

Для удобства сопоставления, это условие также содержит в левой части прирост стоимости выполнения эксперимента на более дорогостоящей и сложной сертификационной экспериментальной базе по сравнению с более простой исследовательской.

Однако смысл выражения в правой части уже менее очевиден и интуитивно понятен, чем в ранее рассмотренном случае $Q_{исслед} \leq \Delta V'_{исслед}$ (т.е. в случае достаточности резервов сертификационной экспериментальной базы).

Сопоставляя условия (*) и (**), даже не удается однозначно определить, какое из них является более жестким. Левые части неравенств идентичны, но в правой части находятся произведения двух сомножителей, первый из которых в неравенстве (2) больше, поскольку, по условию, $Q_{исслед} > \Delta V'_{исслед}$, но второй – заведомо меньше, поскольку из числа

$\left[\frac{Q_{исслед}}{V_{исслед}}\right]$ вычитается некоторое целое число, не

меньшее единицы. Следовательно, условие (2) предпочтительности дозагрузки сертификационной экспериментальной базы более простыми экспериментами в случае, когда все равно потребуются создавать и поддерживать специализированную исследовательскую базу, может быть как мягче, так и жестче, чем условие предпочтительности полного переноса этих более простых экспериментов на сертификационные объекты достаточной производительности (1).

Особо следует выделить ситуацию, когда $\left[\frac{Q_{исслед}}{V_{исслед}}\right] = \left[\frac{Q_{исслед} - \Delta V'_{исслед}}{V_{исслед}}\right]$, т.е. использование не-

догруженных объектов сертификационной экспериментальной базы даже в малой степени не сокращает потребности в создании и поддержании исследовательской экспериментальной базы. В неравенстве (2) при этом правая часть обнуляется, и неравенство невыполнимо при любом положительном приросте прямых затрат. То есть в этом случае выполнение исследований, соответствующих низкому УГТ, на сложной и дорогостоящей сертификационной экспериментальной базе заведомо неэффективно, и целесообразно жесткое разграничение объектов экспериментальной базы по УГТ.

Заметим, что такая ситуация наиболее вероятна, если производительность объектов сертификационной экспериментальной базы (причем, остаточная, за вычетом потребности в проведении сертификационных испытаний) существенно ниже чем производи-

тельность объектов исследовательской экспериментальной базы, а также существенно ниже, чем общий объем экспериментов, проводимых на более низких УГТ. В силу высокой сложности и длительности экспериментов, проводимых по сертификационным технологиям, такое соотношение производительности и объема исследований весьма вероятно.

ВЫВОДЫ

Первое. Экспериментальная база прикладной науки и высокотехнологичной промышленности является лишь одним из альтернативных средств исследований и испытаний. Помимо экспериментальных исследований, знания и технологии могут быть получены путем расчетно-теоретических исследований, а также сочетания теоретических и экспериментальных. Поэтому следует принимать решения о выборе методов и средств исследований и испытаний, оптимальные по критериям их стоимости или длительности, при заданном качестве (точности и достоверности).

Второе. Объекты экспериментальной базы целесообразно характеризовать следующими показателями:

- виды проводимых исследований и испытаний;
- диапазоны воспроизводимых условий, и их сравнение с требуемыми диапазонами;
- точность и достоверность измерений основных параметров, и их сравнение с требуемым уровнем для соответствующих УГТ;
- средние длительности подготовки и проведения экспериментов;
- коэффициент загрузки объекта;
- доля исследований и испытаний, выполняемых в интересах внешних заказчиков;
- трудоемкость содержания объекта;
- ресурсоемкость содержания объекта;
- трудовые затраты на содержание объекта;
- материальные затраты на содержание объекта;
- суммарные прямые затраты на содержание объекта;
- амортизационные отчисления по данному объекту;
- суммарные общие затраты на содержание объекта;
- трудоемкость подготовки и проведения эксперимента;
- ресурсоемкость подготовки и проведения эксперимента;
- трудовые затраты на подготовку и проведение эксперимента;
- материальные затраты на подготовку и проведение эксперимента;
- суммарные прямые затраты на подготовку и проведение эксперимента.

Такой перечень технических и экономических показателей позволяет принимать обоснованные решения об оптимальном использовании различных объектов экспериментальной базы, планировать ее развитие оптимальным образом (по критериям длительности и стоимости исследований и испытаний, при заданных уровнях их качества).

Третье. Как показал анализ, проведенный с помощью математических моделей, рассматривать вопрос о целесообразности переноса исследований, выполняемых на более низких УГТ, на объекты экспериментальной базы, предназначенные для более сложных исследований и сертификационных испытаний, имеет смысл лишь в тех случаях, когда последние имеют существенные резервы повышения загрузки за счет проведения более примитивных экспериментов. Причем эти резервы должны полностью исключить необходимость создания специализированных объектов экспериментальной базы, соответствующих более низким УГТ.

Но даже в этих случаях необходимо сопоставлять экономии на содержании специализированной экспериментальной базы и прирост прямых затрат на проведение экспериментов на более сложном и дорогостоящем обо-

рудовании. Допустимое при этом удорожание экспериментов может быть даже многократным, если экспериментальные исследования и испытания являются фондоемкими, и подавляющая доля их себестоимости (70-80% и выше) приходится на стоимость владения объектами экспериментальной базы. Если же, напротив, большую часть стоимости исследований и испытаний составляют прямые затраты, относительный их прирост при переносе экспериментов на оборудование, соответствующее высоким УГТ, составляет не более 15-25%.

Литература

1. Голиченко О.Г. Основные факторы развития национальной инновационной системы: уроки для России [Текст] / О.Г. Голиченко. – М. : Наука, 2011. – 634.
2. Дутов А.В. Критерии эффективности системы управления прикладными исследованиями в наукоемкой промышленности [Текст] / А.В. Дутов, В.В. Ключков // Экономический анализ: теория и практика. – 2014. – №20. – С. 2-15.
3. Ключков В.В. Современные принципы управления прикладными исследованиями в авиационной науке [Текст] / В.В. Ключков, С.М. Рождественская // Интеллект & технологии. – 2016. – №1. – С. 58-63.
4. Ключков В.В. Ограничения международной кооперации и эффективность использования экспериментальной базы российской прикладной науки [Текст] / В.В. Ключков, С.М. Рождественская // Менеджмент и бизнес-администрирование. – 2016. – №2. – С. 131-140.
5. Ключков В.В. Центры коллективного пользования в прикладной авиационной науке: эффективность и направления развития [Текст] / В.В. Ключков, Н.В. Чернер // Финансовая аналитика: проблемы и решения. – 2015. – №42. – С. 2-17.
6. Ключков В.В. Экономические стимулы создания центров коллективного пользования научным оборудованием [Текст] / В.В. Ключков, Н.В. Чернер // Russian j. of management. – 2015. – Vol. 3 ; iss. 6. – Pp. 610-617.
7. Колемаев В.А. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст] / В.А. Колемаев, В.Н. Калинина. – М. : ИНФРА-М, 2001.
8. Олишевский Д.П. Моделирование и анализ организации и управления центром коллективного пользования [Текст] / Д.П. Олишевский, Б.Ю. Сербиновский. – Новочеркасск : ЮРГТУ (НПИ), 2009. – 134 с.
9. Clausing D. Technology readiness. Research technology management [Text] / D. Clausing, M. Holmes ; Industrial research institute. – 2010. – 243 p.
10. Fisher R.A. The design of experiment [Text] / R.A. Fisher. – 6-th ed. – London: Oliver and Boyd, 1951.

Ключевые слова

Экспериментальная база; прикладная наука; уровни готовности технологий; эффективность; критерии.

Ключков Владислав Валерьевич

Зотов Валерий Алексеевич

Рождественская Софья Михайловна

РЕЦЕНЗИЯ

Актуальность темы. Экспериментальная база прикладной науки и наукоемкой промышленности является важнейшим инфраструктурным актором реализации научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР), создания инноваций. Усиливаю-

щееся отставание от стран-лидеров в ресурсной поддержке отечественной науки вынуждает искать новые пути повышения ее эффективности путем оптимизации как структуры науки, так и структуры экспериментальной базы, особенно в фондоемких областях науки и техники. Деятельность в ряде областей научно-исследовательских разработок (НИР) и опытно-конструкторских работ (ОКР), промышленного производства невозможна без разнообразных, весьма сложных и дорогостоящих экспериментальных установок, полигонов, стендов и т.п., их перманентного совершенствования. В настоящее время их содержание и развитие, как правило, финансируется из средств государственного бюджета.

Проявление перечисленных факторов требует решения задачи определения формальных критериев эффективности использования объектов экспериментальной базы, а также уровня их совершенства. Эти критерии должны быть настолько информативны, чтобы на их основе можно было обоснованно принимать решения о сохранении, консервации или закрытии отдельных объектов, о модернизации и строительстве новых.

Развитие информационных технологий привело к тому, что многие виды экспериментальных исследований могут быть заменены компьютерным моделированием и расчетами, виртуальными экспериментами. Эти возможности важны при принятии решений о развитии экспериментальной базы прикладной науки и наукоёмкой промышленности.

Необходимость выработки критериев эффективности и развития системной теории оптимального управления применительно использованию и развитию экспериментальной базы прикладной науки и высокотехнологичной промышленности определили актуальность научных результатов, изложенных в рецензируемой рукописи.

Научная новизна и практическая значимость. Фундаментальность авторского подхода проявилась в том, что поставлена и решалась задача не только оптимизации структуры и потенциала экспериментальной базы, ее развития и использования, но и совершенствования методологии оптимального управления этой

базой, развития методов и средств её исследования. В связи с достигнутым высоким уровнем возможностей компьютерного моделирования такой подход представляется более адекватным, позволяющим учитывать множество факторов, укладываясь в жесткий регламент системы планирования экспериментальной базы.

К сильным сторонам работы следует отнести ее системный характер, поскольку оптимальность понимается авторами с точки зрения целей прикладной науки в целом, т.е. как минимизация стоимости или продолжительности исследований и испытаний при заданном их качестве. Благодаря такому подходу авторам удалось показать, что сами по себе частные критерии эффективности использования экспериментальной базы – коэффициент загрузки, доля внешних заказов для центров коллективного пользования и т.п. – не могут рассматриваться как решающие.

Несомненным элементом новизны является классификация объектов экспериментальной базы и требований к ним в зависимости от уровней готовности технологий, которые на этих объектах достигаются. Это важнейшее новшество в организации прикладных исследований и разработок должно было найти отражение и в задачах управления развитием экспериментальной базы, что и было сделано авторами.

В качестве иллюстрации разработанных подходов, а также их практического приложения, авторами построена математическая модель, позволяющая оценить эффективность жесткого разделения объектов экспериментальной базы по уровням готовности технологий, которые на этих объектах подтверждаются. Полученные выводы необходимо принимать во внимание при эксплуатации имеющейся экспериментальной базы, а также при разработке планов ее развития.

Результаты исследования могут быть полезными во многих фондоемких областях прикладной науки и промышленности – авиационной, ракетно-космической, судостроительной и т.д.

Заключение. В статье представлены результаты масштабного и системного исследования авторов в области управления сложными технико-экономическими объектами, какими являются объекты экспериментальной базы науки и наукоёмкой промышленности. Результаты оригинальные, обладают выраженными признаками научной новизны. Рецензируемая статья представляет значительный научный и практический интерес. Рекомендую ее к опубликованию в журнале «Аудит и финансовый анализ».

Бендиков М.А., д.э.н., в.н.с., Центральный экономико-математический институт Российской Академии наук, г. Москва.

[Перейти на ГЛАВНОЕ МЕНЮ](#)