

Научная статья
УДК 331

Экономико-математическая модель прогнозирования полной себестоимости производства воздушных судов и их компонентов

Александр Геннадьевич Подольский, Павел Евгеньевич Данилин,
Дмитрий Вадимович Кондратьев

Аннотация. Показана практическая важность учета эффекта обучения при планировании производства и разработке стратегии снижения издержек предприятий отечественного авиастроения, и приводятся принципы, которыми при этом следует руководствоваться на практике. Предложен методический подход к прогнозированию себестоимости летательных аппаратов и их компонентов, основанный на эффекте обучения на производстве, позволяющий повысить обоснованность прогнозной себестоимости. Приводятся результаты ретроспективного анализа термина «эффект обучения» от первых наблюдений Т. Райта в авиастроении до современных исследований.

Ключевые слова: авиастроение; воздушное судно; кривая обучения; прогнозирование; себестоимость; трудоемкость; эффект обучения

Для цитирования: Подольский А.Г., Данилин П.Е., Кондратьев Д.В. Экономико-математическая модель прогнозирования полной себестоимости производства воздушных судов и их компонентов // Вооружение и экономика. 2026. №1(75). С. 83-94.

Original article

Economic and Mathematical Forecasting Model of the Aircrafts and Their Components Total Cost Production

Aleksandr G. Podolskii, Pavel E. Danilin, Dmitrii V. Kondratev

Abstract. The article demonstrates the practical importance of the learning aspect appreciation in the course of production planning and cost reduction strategy development for domestic aircraft manufacturing companies, and outlines certain principles for practical application. A methodological approach to the cost forecast of aircrafts and their components is proposed, based on the learning aspect value in production that provides improved validity of forecasted costs. The results of a «learning trajectory measurement effect» term retrospective analysis are presented, spanning from T. Wright's first observations in aircraft manufacturing to modern research.

Keywords: aircraft manufacturing; aircraft; learning curve; forecasting; cost; labor intensity; learning effect

For citation: Podolskii A.G., Danilin P.E., Kondratev D.V. Economic and Mathematical Forecasting Model of the Aircrafts and Their Components Total Cost Production. Vooruzhenie i ekonomika = Armament and Economics. 2026;75(1): 83-94. (In Russ.).

В настоящее время перед российским авиастроением поставлены стратегические цели, направленные на обеспечение военной безопасности страны, авиатранспортной доступности и связанности регионов страны, мобильности населения и безопасности полетов, а также на достижение технологического суверенитета в авиастроении.

Достижение стратегических целей осуществляется посредством разработки и изготовления военной и специальной техники, в том числе авиационной, поставляемой в рамках государственного оборонного заказа, а также гражданской техники, создаваемой в рамках реализации Комплексной программы развития авиатранспортной отрасли Российской Федерации до 2030 года (КПГА), утвержденной распоряжением Правительства РФ¹. Программами государственного оборонного заказа (ГОЗ) и КПГА предусмотрены значительные объемы производства самолетов различных типов для нужд военной и гражданской авиации, а также широкой номенклатуры компонентов на всех уровнях кооперации изготовления воздушных судов.

Это обуславливает актуальность решения задачи эффективного использования бюджетных средств, выделяемых на производство как военной, так и гражданской техники

¹ Распоряжение Правительства РФ от 25 июня 2022 г. №1693-р «Об утверждении комплексной программы развития авиационной отрасли Российской Федерации до 2030 года».

в условиях дефицита бюджетных средств, а также обеспечения привлекательности закупки авиационной техники для российских авиакомпаний.

В этой связи одним из целевых ориентиров КПГА является снижение цены гражданских самолетов на 2% ежегодно в течение 5 лет относительно базовой цены 2025 года по мере освоения производства воздушных судов. Однако отсутствие методического аппарата, позволяющего вырабатывать обоснованные управленческие решения, направленные на достижение указанного целевого ориентира, не позволяет объективно формировать цены на воздушные суда и их компоненты.

При этом еще во времена существования СССР специалистами в области научной организации труда было выявлено, что совершенствование процессов труда по мере роста объемов выпускаемой продукции ведет к уменьшению затрат времени на выполнение операций трудового процесса за счет эффекта обучения на производстве [1]. Так, в работах К.Джурабаева показано влияние масштабов производства, величины и повторяемости партии деталей на затраты рабочего времени [2; 3].

На отраслевом уровне Министерством авиационной промышленности СССР разрабатывались нормативные модели с использованием кривых обучения. Впоследствии данные компетенции в отечественном авиастроении были фактически утрачены, в то время как обучение является одним из важнейших факторов, оказывающих влияние на себестоимость авиационной техники.

Результаты исследований в области учета фактора обучения на производстве и его экономической интерпретации опубликованы в работах зарубежных ученых, к которым прежде всего следует отнести [4-8]. В статье [9] отмечен универсальный характер кривой обучения и продемонстрировано ее проявление в различных отраслях промышленности, а в публикации [10] проведен сравнительный анализ различных математических моделей кривых обучения.

Среди российских исследований по данной тематике следует выделить публикацию [11], в которой описана линейная динамическая модель обучения в процессе производства; статью [12], в которой решена задача определения регрессионных функций кривых обучения в серийном производстве автомобилей; публикацию [13], содержащую описание применения методики кривой освоения в отрасли железнодорожного машиностроения; монографию [14], посвященную экономическому и математическому анализу эффекта обучения на производстве; публикации [15; 16], посвященные рассмотрению методики построения кривой обучения как инструмента планирования в решении производственных задач.

В то же время вопросу взаимосвязи объемов выпуска и затрат, соответствующих отдельным статьям калькуляции и отражающих сложные кооперационные цепочки и особенности экономики авиастроительных предприятий, уделено недостаточное внимание.

В промышленных условиях эффект обучения на производстве впервые был выявлен в 1936 году Т.Райтом в авиастроении. Согласно результатам его исследований, средние трудозатраты на производство самолетов снижаются по мере роста объема их производства нарастающим итогом [17]. При этом двукратное увеличение объема выпущенной продукции ведет к уменьшению трудоемкости производства единицы продукции на определенный процент от предыдущего значения, что графически выражается в виде кривой обучения (рисунок 1).

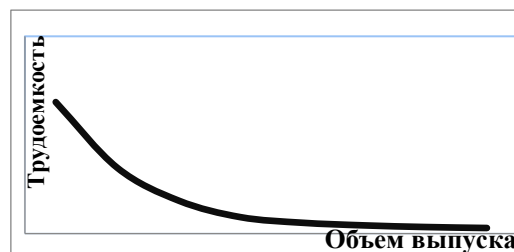


Рисунок 1 – Кривая обучения на основе экономической модели Т. Райта
Источник: составлено авторами на основе [17]

Кривая обучения в общем виде отражает зависимость трудоемкости производства от накопленного объема выпуска продукции. При этом с экономической точки зрения эффект обучения трактовался как феномен повышения производительности труда при повторных выполнениях идентичного задания [18]. Анализ прогнозных оценок трудоемкости производства воздушных судов, полученных с использованием кривой обучения, показал достаточно высокую их точность [5].

В 1960-1970-е гг. учет фактора обучения получил свое развитие в западной экономической литературе. В работах К.Эрроу, П.Ромера, Э.Шешински были предложены эндогенные модели экономического роста, согласно которым устойчивый экономический рост возможен на основе технического прогресса и обучения работников в процессе производственной деятельности [6; 7], а производительность труда определялась как функция времени и накопленного производственного опыта [8]. Предложенные модели не только отражали экономическую интерпретацию эффекта обучения, но и использовались в качестве инструмента внутрифирменного прогнозирования и планирования.

В этот же период времени специалистами Бостонской консалтинговой группы (BCG) концепция кривых обучения была расширена до «кривых опыта» в рамках стратегического менеджмента. Модель Б.Хендерсона, основателя BCG, имеет сходство с законом Т.Райта: каждое удвоение объема выпущенной продукции приводит к уменьшению затрат на определенный процент [4]. Данную модель отличает универсальность, а также применимость к производству любых товаров или услуг. Модель кривой опыта была использована BCG в стратегических рекомендациях General Instrument Corporation для моделирования и прогнозирования издержек.

В отечественной практике промышленного производства кривые обучения широко применялись и использовались для разработки экономически обоснованных норм времени. Учеными СССР проводились интенсивные научные исследования в области разработки закономерностей освоения производственных процессов, основ их высокоэффективного применения в разнообразных сферах трудовой деятельности, производства и управления².

К современным исследованиям по данной тематике относится разработанная Л.Варшавским динамическая модель затрат на производство продукции, отражающая связь между величиной экономии затрат, вызванной обучением и объемами производства в текущий и предыдущие моменты времени [11]. Данная модель может использоваться применительно к производству продукции в различных отраслях промышленности, например, для моделирования затрат на производство военных или гражданских воздушных судов. Вопросы взаимодействия оборонного и гражданского секторов экономики, требуемого для обеспечения военной безопасности страны и укрепления технологического суверенитета, рассмотрены в статье [19].

Постепенно эффект обучения на производстве был выявлен практически во всех отраслях промышленности [20]. Для авиастроения данный эффект является типичным, что обусловлено высокой трудоемкостью первых изделий и длительностью серийного производства. При этом он характерен и для других *трудоемких отраслей*, таких как аэрокосмическая промышленность, автомобилестроение, судостроение, станкостроение, приборостроение [9]. По мере накопления опыта практически все производственные организации демонстрируют рост производительности труда, однако скорости обучения различаются существенно. Одни предприятия достигают резкого снижения трудоемкости с увеличением объема выпуска, тогда как другие показывают слабое влияние эффекта обучения.

Причинами различий в «наклоне» кривых обучения могут быть уровень зрелости технологий, специализация поставщиков, особенности, специфика и сложность производственного процесса, в том числе повторяемость операций и эффективность передачи опыта [21]. Также влияние на кривые обучения оказывают эффекты масштаба производства, переход на новые продукты или технологии, оптимизация и стандартизация бизнес-процессов, а также реорганизация предприятий.

² Джурабаев К.Т. Научная организация и нормирование труда в электротехнической промышленности: учеб. пособие. М.: Высшая школа. 1985. 175 с.

Так как большинство предприятий авиационной промышленности относится к оборонно-промышленному комплексу, состав затрат и порядок их включения в себестоимость определяется приказом Минпромторга России 2019 года №334³ и Постановлением Правительства РФ 2017 года №1465⁴. Кроме того, Методические рекомендации по определению состава затрат, включаемых в себестоимость производства отечественной гражданской авиационной техники, также сформированы с учетом положений Приказа Минпромторга России №334.

Как правило, при определении цены продукции предприятиями авиационной промышленности используется затратный метод без стимулирующих экономических механизмов снижения затрат [22]. Данный метод предполагает, что цена, с одной стороны, должна покрывать все издержки производства и реализации продукции, обладающей определенными потребительскими свойствами, и приносить прибыль, представляющую собой надбавку к себестоимости, а с другой стороны, цена продукции зависит от особенностей экономики производящего ее предприятия, в том числе установившегося на нем уровня накладных расходов [23].

Учет эффекта обучения целесообразно осуществлять не после формирования себестоимости продукции, а путем первоначальной корректировки значений отдельных статей структуры цены, зависящих от фактора обучения, и последующего их суммирования для определения величины себестоимости. Такой подход будет способствовать росту обоснованности прогнозной цены и повышению эффективности расходования бюджетных средств.

Действие эффекта обучения на производстве обусловлено увеличением повторяемости одинаковых операций по мере роста объемов выпущенной продукции за счет накопления работниками специализированных навыков. Данный эффект проявляется в снижении удельных затрат на очередную единицу выпуска (прежде всего затрат на оплату труда, поскольку по мере накопления опыта сокращается удельная трудоемкость выпуска каждой последующей единицы продукции) [24]. Это, в свою очередь, ведет к снижению собственных затрат на производство продукции.

В серийном производстве процесс обучения происходит непрерывно, однако при наличии перерывов в производстве, устойчивом снижении объемов выпуска или высокой текучести кадров приобретенные работниками навыки теряются частично или полностью, что выражается в так называемом *«эффекте забывания»* [25], который ведет к росту трудоемкости и себестоимости производства в целом.

Учет фактора обучения в производстве дает значимый экономический эффект благодаря внедрению более точных норм времени и затрат, реалистичных производственных планов, выявлению резервов повышения производительности труда, улучшению бюджетирования и ценообразования в долгосрочных контрактах на производство продукции [26]. В сфере планирования трудовых ресурсов кривые обучения можно использовать для обоснования динамики потребного количества рабочих. В начальный период освоения, когда трудоемкость высока, может требоваться больше персонала, затем, по мере снижения трудоемкости, часть работников может быть перепрофилирована.

В указанных выше работах, посвященных рассмотрению различных аспектов эффекта обучения, не учитывается ряд положений, которые целесообразно рассматривать как принципы. Их игнорирование, особенно при прогнозировании себестоимости производства воздушных судов и их компонентов, приводит, во-первых, к созданию экономико-математических моделей, неадекватно учитывающих фактор обучения, во-вторых, к формированию прогнозных цен, необъективно отражающих издержки производства, что, в свою очередь, приводит к неэффективному использованию трудовых ресурсов и расходованию бюджетных средств. Основными принципами являются:

³ Приказ Минпромторга России от 08 февраля 2019 г. №334 «Об утверждении порядка определения состава затрат, включаемых в цену продукции, поставляемой в рамках государственного оборонного заказа».

⁴ Постановление Правительства РФ от 02 декабря 2017 г. №1465 «О государственном регулировании цен на продукцию, поставляемую по государственному оборонному заказу, а также о внесении изменений и признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации» (вместе с «Положением о государственном регулировании цен на продукцию, поставляемую по государственному оборонному заказу»).

Кривые обучения являются не средством уменьшения затрат на производство, а инструментом прогнозирования снижения затрат при определенном уровне и способе производства.

При осуществлении производственной деятельности включаются сложные внутрифирменные процессы обучения на разных уровнях функционирования предприятия, такие как рост навыков работников, повышение производительности труда, стандартизация, унификация бизнес-процессов, рост специализации, повышение качества ресурсного обеспечения и т.д. Все это, при правильной организации труда, позволяет снижать издержки от основной деятельности. Кривые обучения, как правило, действуют на микроуровне и мезоуровне, то есть в экономике конкретного предприятия и отрасли в целом, а процессы, происходящие на макроуровне, такие как инфляция, геополитические факторы и экономические санкции, могут способствовать не снижению, а повышению себестоимости продукции.

Кроме того, необходимо учитывать, что реальный процесс освоения и серийного производства воздушных судов носит стохастический характер, так как на производство каждого экземпляра изделия оказывают влияние следующие факторы: различие в квалификации смен, неритмичность поставок, разный уровень дефектов и переделок, что в комплексе приводит к случайному отклонению реальной трудоёмкости от ее прогнозной величины. Поэтому при учете влияния фактора обучения в экономико-математической модели (ЭММ) используются усредненные показатели.

Эффект обучения на производстве действует по отношению к серийной продукции, рабочей конструкторской документации которой присвоена литера О1.

В процессе освоения той или иной операции время ее выполнения уменьшается из-за роста специализированных навыков рабочего в результате многократного повторения одних и тех же трудовых движений, что со временем дает возможность отбирать наиболее рациональные приемы выполнения операций и обеспечивать оптимальный темп с минимальными физическими затратами.

В ходе проведения научно-исследовательских и опытно конструкторских работ, а также опытного производства возможны доработки как конструкторской, так и технологической документации. Это, в свою очередь, может привести к изменениям в производственном процессе, таким как введение или исключение ряда операций, а также и к доработке уже произведенных изделий.

Необходимость освоения рабочими новых элементов трудового процесса приводит к «перезапуску» кривой обучения. Такая же ситуация складывается при модернизации воздушного судна, которая предусматривает изменение его конструкции, а, следовательно, к указанному «перезапуску» кривой обучения.

Существует предел эффекта обучения, при достижении которого он перестает проявляться.

При долгосрочном планировании на основе эффекта обучения важно понимать, что сокращение затрат не может происходить долговременно, так как по мере приобретения работниками опыта кривая обучения выходит на «плато», достигая своего предела, что сокращает для фирмы возможности снижения затрат на производство данных изделий. То есть нельзя ожидать, что с каждой дополнительной партией воздушных судов трудозатраты будут снижаться.

Это обусловлено тем, что в ходе производственного процесса наступает момент времени, когда большинство улучшений уже реализовано и дальнейшее снижение трудоёмкости сначала идёт незначительными темпами, а затем достигается предел кривой обучения, то есть в процессе стратегического планирования необходимо учитывать не только стадии жизненного цикла, на которых находится продукция, но и то, что после определённого временного порога эффект обучения себя исчерпывает. Таким образом, наступает момент времени, когда для снижения себестоимости продукции предприятию необходимо внедрять инновации, повышать квалификацию работников и совершенствовать организацию труда, что требует финансовых ресурсов [27].

Необходимо учитывать различия в кривых обучения для производства воздушного судна и его компонентов.

На практике различные поставщики и даже цеха в рамках одного предприятия осваивают процесс учета эффекта обучения отдельно, а значит, для них будут характерны различные виды кривых обучения. Изготовление узлов, деталей и компонентов может характеризоваться пологими кривыми обучения, тогда как финальная сборка показывает крутое снижение трудоёмкости [28]. Причиной этого может являться эффект синергии: ускорение поставок комплектующих, отработанная ритмичность работы конвейера, улучшение сотрудничества между подразделениями – всё это особенно влияет на трудоёмкость сборки, а следовательно, и на себестоимость финального изделия.

При этом отличие в темпах обучения может наблюдаться между поставщиками комплектующих изделий ввиду различий в производственном процессе и уровне их специализации. Дело в том, что «энтропия задачи» (информационная мера сложности) статистически значимо влияет на рост производительности труда, то есть простые повторяющиеся производственные задачи решаются быстрее, а сложные информационно насыщенные производственные задачи требуют большего числа итераций для их решения и более высокого уровня умелости (мастерства), что ведет к более пологим кривым обучения [21]. Следовательно, на научно-производственных предприятиях, производящих сложную технику, к которой относится продукция авиастроения, эффект обучения будет менее выражен, чем на предприятиях, в производственном процессе которых преобладают более типизированные и стандартизированные операции.

Эффект обучения проявляется при стабильном росте объема выпускаемой продукции и достигается только при ритмичном размещении новых заказов по всей кооперации воздушного судна.

В серийном производстве процесс обучения происходит непрерывно, однако при наличии перерывов в производстве, устойчивом снижении объемов выпуска или высокой текучести кадров приобретенные навыки теряются частично или полностью, что выражается в так называемом «эффекте забывания» [25], который приводит к росту трудоёмкости и себестоимости производства в целом.

При небольших перерывах в производстве приобретенные навыки утрачиваются частично, что выражается в разрыве кривой обучения (ее «скачке» вверх), то есть средняя трудоёмкость изделий в последующей партии становится выше, чем в предыдущей (рисунок 2). При стабильном снижении объемов выпускаемой продукции или прекращении ее выпуска процессы забывания носят более выраженный характер, что проявляется в виде кривой забывания, по сути являющейся «зеркальным отражением» кривой обучения. Отсутствие регулярных заказов может усугубляться задержками в финансировании фирмы, что ведет к росту текучести кадров и еще более ярко выраженному эффекту забывания.

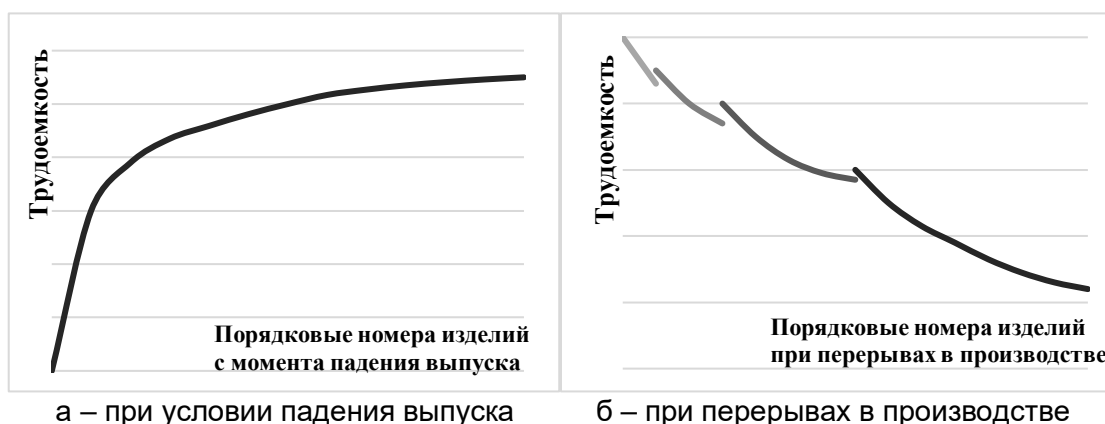


Рисунок 2 – «Эффект забывания» на производстве
Источник: составлено авторами

Эффект обучения положен в основу предлагаемой ЭММ, в которой реализован методический подход к прогнозированию себестоимости воздушных судов и их компонентов, учитывающий динамику значений статей структуры цены, характеризующих материальные и трудовые затраты. ЭММ определения себестоимости производства воздушного судна включает в себя частные модели как для отдельных видов техники, так и их компонентов, что позволяет получить объективные оценки себестоимости и ее составляющих как в целом по воздушному судну, так и по его компонентам, в зависимости от объема их производства [29].

Учет динамичности позволяет сформировать обоснованную величину себестоимости в зависимости от объема производства [16], что особенно важно в авиастроении. Указанный методический подход может быть встроен в такие бизнес-процессы фирмы, как бюджетирование, планирование себестоимости, ценообразование, нормирование труда, разработка экономических нормативов, производственное планирование, управление процессом освоения новой продукции и т.д.

Следование указанным принципам при использовании кривых обучения в отечественной авиационной промышленности является весьма актуальным с учетом ужесточения требований к эффективности использования ограниченных бюджетных средств и требований, предъявляемым к авиационным программам.

Использование кривых обучения позволяет в процессе управления производственным предприятием авиастроения опираться на научно обоснованный подход к прогнозированию трудоемкости и себестоимости с учетом эффекта накопленного опыта, что, в свою очередь, повышает уровень обоснованности ресурсного обеспечения изготовления изделий при заданных планом темпах и объемах производства, графиках поставок, размерах партий, распределении ресурсов между проектами.

Рассмотрим *содержание экономико-математической модели прогнозирования себестоимости производства воздушного судна и его компонентов*, которая реализует приведенные выше принципы и позволяет оценить влияние эффекта обучения на трудоемкость и материальные затраты, используя совокупность взаимосвязанных между собой частных моделей, отражающих различные аспекты процесса формирования себестоимости продукции. Принимается, что все стоимостные показатели определяются в постоянных ценах.

Первая частная модель представляет собой модель обучения Т. Райта, которая позволяет оценивать кумулятивную среднюю трудоемкость производства партии из n единиц воздушных судов.

С математической точки зрения указанная модель представляет собой убывающую степенную функцию одной переменной:

$$\bar{T}(n) = T_1 n^{\log_2 b}, \quad (1)$$

где: n – размер партии воздушных судов;

$\bar{T}(n)$ – кумулятивная средняя трудоемкость производства партии из n единиц воздушных судов;

T_1 – трудоемкость производства первой единицы воздушного судна в партии;

b – показатель обучения для воздушного судна, $0 < b \leq 1$.

Логарифм показателя обучения ($\log_2 b$) называется коэффициентом обучения. Показатель обучения b характеризует скорость обучения, то есть снижение трудоемкости изготовления единицы продукции при каждом удвоении суммарного объема выпуска.

Результат, получаемый при применении формулы $100\% (1 - b)$ можно трактовать как процент обучения. Например, так называемая 80% кривая обучения соответствует 20% снижению трудоемкости при каждом удвоении произведенных единиц, а 90% кривая обучения – 10% снижению трудоемкости.

Для краткости кривые обучения будем называть в терминах соответствующих показателей обучения. 100% кривая обучения не подразумевает снижения трудоемкости. Иными словами, чем выше % значение показателя обучения, тем меньше ее «крутизна». В таблице 1 приведены значения коэффициента обучения ($\log_2 b$) для различных значений показателя обучения.

Таблица 1 – Характеристики кривых обучения

Процентность кривых обучения, %	80	83	85	88	90	93	95	98
Показатель обучения b	0,8	0,83	0,85	0,88	0,9	0,93	0,95	0,98
Коэффициент обучения	-0,32	-0,27	-0,23	-0,18	-0,15	-0,10	-0,07	-0,03

Источник: составлено авторами

Значение показателя обучения определяется с учетом особенностей производственного процесса, объема выпускаемой продукции и на основании ретроспективного анализа статистических данных, в том числе с использованием результатов хронометража оперативного времени выполнения соответствующих видов работ.

Вторая частная модель расчета себестоимости собственных работ представляет собой аддитивную функцию, включающую три слагаемых:

$$\bar{C}_c(n) = \bar{C}_{30T}(n) + \bar{C}_{OCB}(n) + \bar{C}_{НР}(n), \quad (2)$$

где: $\bar{C}_{30T}(n)$ – кумулятивные средние (приходящиеся на одно воздушное судно) затраты на оплату труда основных производственных рабочих, занятых в изготовлении партии воздушных судов из n единиц;

$\bar{C}_{OCB}(n)$ – кумулятивные средние (приходящиеся на одно воздушное судно) отчисления на страховые взносы, соответствующие партии воздушных судов из n единиц;

$\bar{C}_{НР}(n)$ – кумулятивные средние (приходящиеся на одно воздушное судно) накладные расходы, соответствующие партии воздушных судов из n единиц.

Так как ОСВ и НР рассчитываются на основании нормативов, используемых для формирования контрактных (договорных) цен на воздушное судно, утверждаемых на предприятиях на плановый период, формула (2) принимает вид:

$$\bar{C}_c(n) = \bar{C}_{30T}(n) + N_{OCB} \bar{C}_{30T}(n) + N_{НР} \bar{C}_{30T}(n) = \bar{C}_{30T}(n)(1 + N_{OCB} + N_{НР}), \quad (3)$$

где: N_{OCB} – норматив отчислений на страховые взносы;

$N_{НР}$ – норматив накладных расходов.

Третья частная модель предназначена для определения кумулятивных средних (приходящихся на одно воздушное судно) затрат на оплату труда основных производственных рабочих исходя из кумулятивной средней трудоемкости производства партии воздушных судов из n единиц и норматива стоимости человеко-часа работы:

$$\bar{C}_{30T}(n) = N_{ч/ч} \bar{T}(n), \quad (4)$$

где $N_{ч/ч}$ – норматив стоимости человеко-часа;

$\bar{T}(n)$ – кумулятивная средняя трудоемкость производства.

Подставив формулу (1) в формулу (4), получаем:

$$\bar{C}_{30T}(n) = N_{ч/ч} T_1 n^{\log_2 b}. \quad (5)$$

Подставив формулу (5) в формулу (3), получим аналитическое выражение для определения кумулятивной средней (приходящейся на одно воздушное судно) себестоимости собственных работ в партии воздушных судов из n единиц в зависимости от трудоемкости:

$$\bar{C}_c(n) = N_{ч/ч} T_1 n^{\log_2 b} (1 + N_{OCB} + N_{НР}). \quad (6)$$

Из формулы (6) следует, что себестоимость собственных работ по изготовлению первого по порядку воздушного судна определяется по формуле:

$$C_c(1) = N_{ч/ч} T_1 (1 + N_{OCB} + N_{НР}). \quad (7)$$

Осуществляя подстановку формулы (7) в формулу (6), получаем:

$$\bar{C}_c(n) = C_c(1) n^{\log_2 b}.$$

Для определения кумулятивной средней (приходящейся на одно воздушное судно) себестоимости изготовления i -го компонента воздушного судна (выполнения i -го вида работ) используется формула:

$$\bar{C}_{ci}(n_i) = \frac{\bar{d}_{Ai}(n)}{100} C_c(1) n^{\log_2 b_i},$$

где: $\bar{d}_{Ai}(n)$ – кумулятивная средняя (приходящаяся на одно воздушное судно) доля собственных затрат на изготовление i -го компонента воздушного судна (выполнения i -го вида работ) в общей кумулятивной средней собственной себестоимости изготовления воздушного судна-аналога в партии из n единиц, %;

b_i – показатель обучения для i -й компоненты воздушного судна, $0 < b_i \leq 1$.

Важной составной частью ЭММ прогнозирования себестоимости воздушного судна и его компонентов является *четвертая частная модель определения затрат по статье калькуляции «Материальные затраты»*, в которой учитываются расходы на приобретение материалов, сырья и вспомогательных материалов, полуфабрикатов, комплектующих изделий и ряд других затрат, относящихся на себестоимость продукции в качестве прямых затрат. При этом важно учесть, что часть материальных затрат подвержена действию эффекта обучения, а часть – нет.

Эффект обучения действует в отношении покупных комплектующих воздушных судов, являющихся технически сложными изделиями. При построении частной модели определения материальных затрат необходимо учитывать индивидуальные кривые обучения для различных узлов и компонентов воздушного судна, что позволяет повысить точность прогнозирования его полной себестоимости.

Формула для определения (на основе конструкторской документации) кумулятивных средних (приходящихся на одно воздушное судно) материальных затрат в партии из n воздушных судов имеет вид:

$$\bar{C}_{мз}(n) = \sum_{i=1}^M C_{Ki}(n, 1) r_i^{\log_2 b_i} + \bar{C}_м,$$

где: $C_{Ki}(n, 1)$ – стоимость изготовления первого по порядку комплектующего изделия i -го типа в интересах производства партии из n воздушных судов;

M – количество типов комплектующих изделий;

r_i – количество комплектующих изделий i -го типа, изготавливаемых для производства партии из n единиц воздушных судов;

b_i – показатель обучения для комплектующего изделия i -го типа;

$\bar{C}_м$ – кумулятивная средняя (приходящаяся на одно воздушное судно) суммарная стоимость материалов, на которые не распространяется эффект обучения.

Вышеприведенные частные модели позволяют сформировать модель прогнозирования кумулятивной средней (приходящейся на одно воздушное судно) полной себестоимости собственных работ при изготовлении партии воздушных судов из n единиц, которая имеет вид:

$$\begin{aligned} \bar{C}_{пс}(n) &= \bar{C}_c(n) + \bar{C}_{мз}(n) = N_{ч/ч} T_1 n^{\log_2 b} (1 + N_{ОСВ} + N_{НР}) + \sum_{i=1}^M C_{Ki}(n, 1) r_i^{\log_2 b_i} + \bar{C}_м = \\ &= C_c(1) n^{\log_2 b} + \sum_{i=1}^M C_{Ki}(n, 1) r_i^{\log_2 b_i} + \bar{C}_м. \end{aligned}$$

Полная себестоимость производства партии воздушных судов из n единиц определяется по формуле:

$$C_{псп}(n) = n \bar{C}_{пс}(n).$$

Таким образом, изложенная ЭММ позволяет представить суммарную полную себестоимость собственных работ при изготовлении партии воздушных судов из n единиц как произведение кумулятивной средней (приходящейся на одно воздушное судно) полной себестоимости собственных работ в партии воздушных судов из n единиц на количество воздушных судов в партии.

Проиллюстрируем применение метода прогнозирования полной себестоимости воздушных судов и их компонентов с практической точки зрения. Построим кривые обучения для гражданских самолетов на основании КПГА в редакции распоряжения Правительства РФ 2023 года №2259-р⁵ и с учетом актуальной производственной программы выпуска данных воздушных судов.

На рисунке 3 представлены 90-98% кривые снижения себестоимости собственных работ по финальной сборке воздушных судов Ту-214, Ил-114, SJ-100 и MC-21, производство которых планируется осуществить в рамках указанной программы, при условии непрерывного размещения заказов на их серийное производство и своевременного финансирования (авансов и окончательных расчетов).

Из графиков на рисунке 3 видно, что кривые обучения воздушных судов Ту-214, Ил-114, SJ-100 и MC-21 к 2030 году выходят на плато, что свидетельствует о том, что эффект обучения проявляется на приблизительно пятилетнем периоде времени.

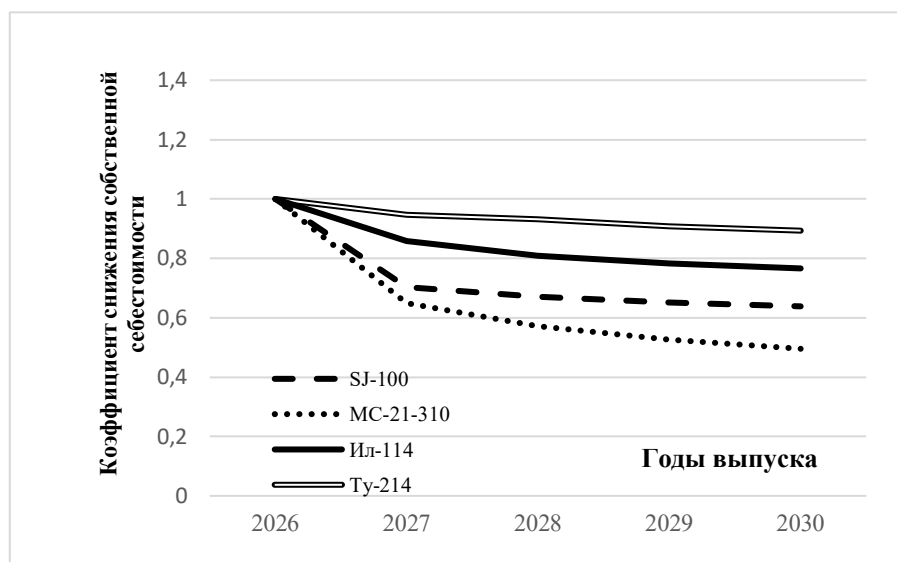


Рисунок 3 – 90-98% кривые обучения в рамках КПГА

Источник: составлено авторами

Учет эффекта обучения на указанном отрезке времени при производстве воздушных судов, реализованный в изложенной ЭММ, позволит повысить обоснованность принимаемых плановых решений как на уровне предприятий авиастроения, так и на общеотраслевом уровне, а также будет способствовать повышению эффективности расходования бюджетных средств, выделяемых в значительных объемах на развитие авиационной отрасли.

⁵ Распоряжение Правительства РФ от 22 августа 2023 г. №2259-р «О внесении изменений в распоряжение Правительства РФ от 25.06.2022 N 1693-р».

Список источников

1. Шапиро И.И. Технический прогресс и нормирование труда: монография. М.: Машиностроение, 1968. 242 с.
2. Джурабаев К.Т. Механизм учета фактора освоения производства при разработке и пересмотре норм // Актуальные проблемы организации и нормирования труда в условиях НТП: межвуз. сб. науч. тр. М.: МАИ, 1985. С. 11-13.
3. Джурабаев К.Т. Зависимость норм времени от величины и повторяемости партии деталей. Л.: ЛДНТП, 1965. 36 с.
4. Хендерсон Б.Д. Рассмотрение кривой опыта: почему это работает? // Стратегии, которые работают: Подход BCG: сб. статей. М.: Манн, Иванов и Фербер, 2005. С. 37-42.
5. Alchian A. Reliability of progress curves in airframe production // *Econometrica*. 1963. Vol.31. No.4. P. 679-693.
6. Arrow K.J. The economic implications of learning by doing // *Review of economic studies*. 1962. Vol.29. No.3. P. 155-173.
7. Romer P.M. Increasing Returns and Long-Time Growth // *Journal of Political Economy*. 1986. Vol.94. No.5. P. 1002-1037.
8. Sheshinsky E. Tests of the «learning by doing» hypothesis // *Review of economics and statistics*. 1967. Vol.49. No.4. P. 568-578.
9. Yelle L.E. The learning curve: Historical review and comprehensive survey // *Decision Sciences*. 1979. Vol.10. No.2. P. 302-328.
10. Badiru A. Computational survey of univariate and multivariate learning curve models // *IEEE Transactions on Engineering Management*. 1992. Vol.39. No.2. P. 176-188.
11. Варшавский Л.Е. Методологические основы моделирования развития олигополистических рынков продукции с длительным жизненным циклом (на примере рынка гражданской авиационной техники) // *Прикладная эконометрика*. 2010. №4(20). С. 53-74.
12. Павлов О.В. Определение регрессионных функций кривых обучения в серийном производстве автомобилей // *Вестник Самарского университета. Экономика и управление*. 2021. Т.12. №4. С. 212-222.
13. Миронова М.А. Методика «кривой освоения» как инструмента планирования и нормирования труда на предприятии // *Аудит и финансовый анализ*. 2015. №5. С. 322-326.
14. Моргунов В.М. Эффект обучения на производстве: экономический и математический анализ. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2012. 128 с.
15. Павлов В.П., Талипова Л.Ф. Концепция «кривой обучения» в решении производственных задач // *Вестник экономики, права и социологии*. 2016. №1. С. 52-54.
16. Павлов О.В. Динамическая оптимизация производственной деятельности предприятия с учетом эффекта кривой обучения // *Вестник Самарского государственного экономического университета*. 2015. №3(125). С. 87-92.
17. Wright T.P. Factors affecting the cost of airplanes // *Journal of the aeronautical sciences*. 1936. Vol.3. No.4. P. 122-128.
18. Alchian A. Uncertainty, evolution, and economic theory // *Journal of Political Economy*. 1950. Vol.58. No.3. P. 211-221.
19. Байдаров Д.Ю., Иванов В.В., Файков Д.Ю. Взаимодействие оборонного и гражданского секторов – подход с позиций мезоэкономики // *Научный вестник оборонно-промышленного комплекса России*. 2025. №1. С. 13-22.
20. Argote L., Epple D. Learning curves in manufacturing // *Science*. 1990. Vol. 247. No.4945. P. 920-924.
21. Verna E., Genta G., Galetto M. Effects of product complexity on human learning in assembly and disassembly operations // *Journal of Manufacturing Technology Management*. 2023. Vol.34. No.9. P. 139-162.
22. Лавринов Г.А., Подольский А.Г. Управление ценообразованием на продукцию военного назначения при реализации ценностной концепции // *Инновации*. 2013. №8(178). С. 31-38.
23. Кондратьев Д.В. Проблема управления накладными расходами на предприятиях авиационной промышленности и меры по ее решению // *Стратегическое планирование и развитие предприятий: материалы XXII всерос. симпозиума (г.Москва, 2021, 13-14 апреля)*. М.: ЦЭМИ РАН, 2021. С. 238-241.
24. Ключков В.В., Вдовенков В.А., Критская С.С. Анализ эффективности и оптимизация уровня мощностей опытного производства в наукоемкой промышленности // *Финансовая аналитика: проблемы и решения*. 2014. №42(228). С. 2-14.

25. Globerson S., Levin N., Shtub A. The impact of breaks on forgetting when performing a repetitive task // IIE Transactions. 1989. Vol. 21. No.4. P. 376-381.
26. Glock C.H., Grosse E.H., Jaber M.Y., Smunt T.L. Applications of learning curves in production and operations management: a systematic literature review // Computers & Industrial Engineering. 2019. Vol.131. P. 422-441.
27. Трубицын А. В. К истории экономической концепции «Learning by doing» // Вопросы новой экономики. 2012. №4(24). С. 34-38.
28. Larsen H.T. Theory of complex work // Journal of Cost Analysis and Parametrics. 2022. Vol.10. No.3. P. 90-104.
29. Кондратьев Д.В. Формирование концепции «обучения действием» на производстве // Научные исследования и разработки. Экономика фирмы. 2022. Т.11. №3. С. 77-81.

Информация об авторах

- А.Г. Подольский – доктор экономических наук, профессор, SPIN 4731-0270.
- П.Е. Данилин – кандидат технических наук, доцент.
- Д.В. Кондратьев – кандидат экономических наук.