УДК 339.13: 629.7: 656

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ РЫНКОВ АВИАПЕРЕВОЗОК И ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ПРИ ВНЕДРЕНИИ НОВЫХ ВИДОВ АВИАЦИОННОГО ТОПЛИВА*

В.В. КЛОЧКОВ,
доктор экономических наук,
ведущий научный сотрудник лаборатории
экономической динамики
и управления инновациями
E-mail: vlad_klochkov@mail.ru
Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова
Российской академии наук,
Москва

Б.А. БАГИР-ЗАДЕ,
магистрант кафедры экономики
E-mail: jasmin_bella@mail.ru
Московский физико-технический институт
(государственный университет)

Долгосрочная тенденция повышения цен на нефть, а также неизбежное сокращение нефтяных запасов в природе ставят мировую гражданскую авиацию (а вместе с ней – авиационную промышленность и топливно-энергетический комплекс) перед необходимостью поиска альтернативных видов топлива, способных конкурировать с традиционными видами горючего. Статья посвящена проблеме прогнозирования экономических перспектив освоения новых видов авиатоплива. Рассматривается несколько «кандидатов» на роль альтернативных видов топлива, дается краткое сравнение свойств каждого из них.

Представлена структура экономико-математической модели равновесия в системе связанных рынков авиатоплива, воздушных судов и авиаперевозок при наличии единственного вида топлива. Основное внимание уделяется построению модели стационарного равновесия на двухсекторном рынке – традиционного и альтернативного авиатоплива. Доказано, что подобное равновесие существует при некоторых допущениях относительно спецификации зависимостей, входящих в модели.

Практически важен вопрос, какое место займет традиционное авиатопливо и будет ли оно полностью вытеснено альтернативными видами. Для ответа на этот и другие вопросы авторы проводят сценарно-параметрический анализ. Рассмотрен пример альтернативного топлива с заданными обобщенными технико-экономическими параметрами (в частности, с заданным удельным расходом на

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект №13-06-00169 «Моделирование стратегий развития энергетических кластеров в ситуации технологического разрыва».

пассажиро-километр, а также параметрами функции предложения). Модель позволяет вычислить и наглядно показать равновесные объемы производства авиатоплива двух видов, а также параметры равновесия на рынках авиаперевозок.

В долгосрочной перспективе актуален вопрос о направлениях адаптации новых типов гражданских судов к альтернативному топливу, позволяющей эффективнее использовать его возможности. В процессе параметрических расчетов рассмотрено (на уровне обобщенных технико-экономических характеристик, включая удельный расход топлива и уровень прочих эксплуатационных расходов) несколько альтернативных проектов воздушных судов на новом виде топлива и продемонстрирован метод сравнения их эффективности.

Ключевые слова: *авиационное топливо, альтернативный вид авиатоплива, прогнозирование, многосекторный рынок, равновесие, эффективность*

Введение

Многократное и быстрое – приблизительно с 200–300 долл. США за 1 т в начале 2000-х гг. до более чем 1 000 долл./т в 2008 г. – удорожание авиационного топлива стало одной из самых значимых экономических проблем мировой гражданской авиации. Сокращение удельного расхода авиатоплива на протяжении нескольких десятилетий остается одним из важнейших направлений инновационного развития технологий в гражданском авиастроении.

Снижение топливных затрат во многом определяет возможности обеспечения доступности воздушного транспорта для широких слоев населения и массового производства гражданской авиационной техники. В то же время в силу объективных технико-экономических причин возможности снижения расхода топлива для современных воздушных судов и авиадвигателей традиционных конструкций близки к исчерпанию.

Активно идет поиск радикальных инновационных решений, которые, впрочем, пока не достигли необходимого для массового применения *уровня готовности технологий* [6, 19]. Пути дальнейшего инновационного развития в указанном направлении еще не определены, есть лишь технологии-кандидаты на роль будущих прорывных технологий.

В отрасли сложилась хорошо известная в теории инновационного развития ситуация *технологического разрыва* [9]: традиционные технологии практически исчерпали свой потенциал развития, т.е. находятся на верхнем участке *S-образной кривой*, изображающей зависимость эффективности технологии от затраченных ресурсов, а новые технологии, которые позволят достичь значительного прироста эффективности, еще только зарождаются.

В гражданском авиастроении рассматриваются две основные группы перспективных технологий сокращения топливных затрат [14], в которых предусмотрен ряд сценариев будущих изменений цен авиатоплива и его суммарного потребления гражданской авиацией.

Во-первых, это уже упоминавшиеся технологии сокращения удельного расхода авиатоплива путем повышения КПД силовой установки, аэродинамического качества планера воздушных судов и их весового совершенства [8]. Помимо уже исчерпавших свой потенциал традиционных конструктивных решений и материалов рассматриваются революционные конструктивные и технологические новшества.

В то же время даже безотносительно к их низкой готовности и высоким инновационным рискам любые технологии сокращения удельного потребления ресурсов могут приводить к результатам, противоположным ожидавшимся, – в определенных условиях суммарное потребление авиатоплива может даже возрасти (и, следовательно, увеличатся объем вредных выбросов, спрос на горючее и его цена). Это называется *эффектом рикошета* [5, 17].

Во-вторых, можно попытаться сократить не столько удельный расход традиционного авиатоплива (оно состоит, главным образом, из керосина, получаемого в процессе перегонки нефти), сколько цену применяемого горючего путем поиска альтернативных его видов и источников, более доступных и дешевых по сравнению с нефтяным авиационным топливом (либо дорогостоящих, но замещающих его по мере исчерпания запасов нефти). Так, в работе [18] рассматриваются нефтяное горючее, но полученное из более сложных месторождений (битуминозные пески и т.п.); жидкое топливо, полученное из угля посредством процесса Фишера – Тропша, и некоторые виды биотоплива.

С учетом отмеченных тенденций на рынках нефти и авиатоплива в 2000-х гг. этот путь более перспективен на долгосрочных горизонтах планирования. Наблюдавшееся удорожание нефтяного авиатоплива было почти пятикратным менее чем за 10 лет, и вряд ли реально достижимые успехи на пути сокращения удельного расхода хотя бы теоретически позволят снизить его во столько же раз.

Кроме того, любое сокращение удельного расхода ресурсов отнюдь не снимает проблемы их ограниченности и угрозы исчерпания в перспективе, а в ряде случаев даже усугубляет их [5].

Таким образом, поиск альтернативных видов авиатоплива и технологий их применения на авиатранспорте является важным направлением инновационного развития гражданской авиационной промышленности. В этом направлении реализуется много программ исследований и разработок как в инициативном порядке самими авиа- и двигателестроительными компаниями, так и государственными научными центрами, в том числе в рамках крупных программ международного сотрудничества.

Не остаются в стороне и компании топливно-энергетического комплекса, желающие диверсифицировать свой бизнес в ожидании исчерпания традиционных источников ископаемых углеводородов. Наиболее вероятные «кандидаты» на роль альтернативных видов топлива для воздушных судов:

- жидкое биотопливо (как правило, биоэтанол или другие аналоги традиционного керосина, получаемые из различных видов биомассы);
- сжиженные природные газы, сконденсированное авиационное топливо [3];
- водород – сжиженный либо связанный иным образом (например, в металлогидридах).

Все эти альтернативы имеют разнообразные преимущества и недостатки. Так, жидкое биотопливо почти не требует переделок топливной системы и уже частично используется в смеси с керосином на коммерческих рейсах ведущими зарубежными авиакомпаниями (в том числе в рекламных целях) [1]. Однако пока ограничена ресурсная база для его производства, что не позволяет кардинально решить проблему удешевления авиатоплива и авиаперевозок.

Газообразные виды топлива нуждаются в гораздо более объемных топливных баках, чем жидкие, хотя углеводородное газовое топливо также не требует глубоких переделок двигателей.

Наиболее сложным является переход на криогенное топливо, например сжиженный водород. Следует подчеркнуть: хотя в настоящее время лидерами в освоении альтернативных видов топлива выступают зарубежные компании, именно отечественные авиационная промышленность и отраслевая наука были пионерами во многих из перечисленных направлений. Ту-155/156 – первый гражданский самолет, выполнявший полеты на водороде, а затем – на сжиженном углеводородном газе еще в 1988 г. [2, 13]. Причем была отработана целостная технология безопасного хранения криогенного топлива, его заправки и т.п. Полностью готовы к серийной реализации технологии перевода наиболее массовых отечественных вертолетов Ми-8/Ми-17 на авиационное сконденсированное топливо [3].

Имеющийся опыт использования альтернативных видов горючего приводит к следующему важному выводу для авиационной промышленности: даже если то или иное альтернативное авиатопливо способно принести экономию по сравнению с керосином и, на первый взгляд, не требует переделок конструкции воздушных судов и авиадвигателей, для полной реализации предоставляемых новым видом топлива преимуществ целесообразна оптимизация всего самолета, его конфигурации, размерности и прочих характеристик в расчете на это топливо [7, 11, 16].

Кроме того, сами инновационные исследования и разработки в гражданском авиастроении могли бы пойти по иному пути (а не по пути экономии топлива), если бы было известно, что авиатопливо будет намного доступнее и авиационная техника была бы оптимизирована с учетом иной системы цен. Значит, возможный переход на альтернативные виды горючего может привести к революционным изменениям не только на рынке авиатоплива, но и на рынках авиационной техники. Поэтому необходимо количественное прогнозирование возможных при таком переходе изменений конъюнктуры рынков авиатехники, авиаперевозок, авиатоплива в кратко- и долгосрочной перспективах. Такие прогнозы требуют соответствующих экономико-математических моделей.

В этой связи необходимо отметить работы отечественных и зарубежных ученых, посвященные прогнозированию (в том числе экономическому) перспектив использования альтернативных видов топлива на транспорте (не только воздушном [12]). В трудах исследователей весьма детально и корректно прогнозируются разнообразные экономические эффекты применения альтернативного горючего, причем рассматривается весь жизненный цикл изделий и технологий с учетом возможного экологического ущерба.

При этом изменения конъюнктуры рынков перевозок, как правило, предполагаются заданными экзогенно, в виде набора сценариев, и не учитыва-

ется, что цена топлива может существенно влиять на доступность перевозок и спрос на них. То же самое касается и трудов зарубежных ученых [14, 15, 16, 18]. Иначе говоря, не учитывается обратная связь между рынками авиатоплива и авиаперевозок – ученые ограничиваются однонаправленными прогнозами.

В данной работе предлагается методологический подход к эндогенному прогнозированию изменений конъюнктуры этих рынков в зависимости от обобщенных технико-экономических параметров новых топливных технологий и перспективных транспортных средств – таких, как удельный расход топлива, максимальный объем его выпуска и т.п.

Принципы экономико-математического моделирования рынков авиатоплива

Для оценки объемов реализации и цен традиционного и новых видов авиатоплива, а также параметров воздушных судов и авиадвигателей, предназначенных для использования того или иного вида топлива, необходимо построить модель системы взаимосвязанных рынков:

- авиатоплива обоих видов;
- воздушных судов, предназначенных для использования обоих видов горючего;
- авиаперевозок (будем считать, что этот рынок един, т.е. услуги, предоставляемые воздушными судами, использующими различные виды топлива, идентичны).

При наличии единственного вида топлива и, соответственно, авиационной техники в работе [4] была построена экономико-математическая модель равновесия в связанной системе рынков авиатоплива, воздушных судов и авиаперевозок. Она имеет определенную структуру.

Прежде всего строится структурная оптимизационная модель спроса на авиаперевозки [4], позволяющая оценить совокупную потребность с учетом расслоения населения по доходам, а также наличия конкурирующих видов наземного транспорта – возможно, менее скоростного, но и более дешевого.

Как правило, в таких моделях для каждой доходной группы определяется оптимальный вид транспорта по критерию минимальной стоимости пассажиро-километра с учетом стоимости времени, проведенного в пути. Более состоятельные пассажиры, чье время «дорого», при прочих равных условиях предпочтут более скоростной, хотя и более дорогостоящий вид транспорта.

Подобные модели могут быть более или менее подробными – например, могут учитывать распределение поездок по дальности и т.п. [10]. В конечном счете, такие схемы позволяют получить функцию спроса на авиаперевозки в определенной стране или мире в форме

$$W = W(p),$$

где W – пассажирооборот, млрд пасс.-км/год;
p – тариф, ден. ед./пасс.-км.

Далее необходимо связать себестоимость авиаперевозок и тариф с ценой топлива. Технико-экономические модели себестоимости авиаперевозок, как правило, имеют вид аддитивных функций. Себестоимость пассажиро-километра представляется в виде суммы приведенных к нему слагаемых полных затрат, в том числе расходов на авиатопливо, горюче-смазочные материалы (ГСМ), техобслуживание и ремонт авиатехники, ее амортизации, оплаты труда экипажей, аэропортовых и аэронавигационных сборов и т.п.

В рамках данной работы принципиально важно выделить именно слагаемое, соответствующее затратам на авиатопливо. Все прочие составляющие от цены авиатоплива в первом приближении не зависят. Итак,

$$c_{\text{ПКМ}} = c_{\text{ГСМ}} + c_{\text{пр}} = 10^{-6} p_{\text{ГСМ}} g + c_{\text{пр}},$$

где $c_{\text{ПКМ}}$ – средняя себестоимость пассажиро-километра, ден. ед./пасс.-км;
$c_{\text{пр}}$ – прочие, нетопливные составляющие себестоимости пассажиро-километра, ден. ед./пасс.-км;
$p_{\text{ГСМ}}$ – цена авиационного топлива, ден. ед./т;
g – удельный расход авиатоплива в расчете на пассажиро-километр, г/пасс.-км.

Разумеется, в реальности расход топлива за рейс отнюдь не пропорционален его длительности или протяженности, проявляются нелинейные эффекты – зависимость удельного расхода топлива от массы воздушного судна и дальности полета, наличие участков взлета, набора высоты, снижения и посадки, на которых мгновенный расход топлива многократно отличается от такового в крейсерском режиме, и др. То же самое касается и прочих слагаемых себестоимости авиаперевозок. Однако на макроуровне можно оперировать таким усредненным показателем, как удельный расход авиатоплива в расчете на пассажиро-километр. Его значение весьма устойчиво для данного типа воздушных судов на данной маршрутной сети и характеризует топливную эффективность авиационной техники.

Тариф можно представить в виде суммы себестоимости пассажиро-километра и фиксированной нормы прибыли π (на практике, как правило, небольшой):

$$p = (1+\pi)c_{\text{ПКМ}}.$$

Подставляя выражения для тарифа и себестоимости авиаперевозок в функцию спроса на авиаперевозки, получим зависимость пассажирооборота от цены авиатоплива:

$$W = W(p) = W\{(1+\pi)c_{\text{ПКМ}}\} =$$
$$= W\{(1+\pi)(10^{-6}p_{\text{ГСМ}}g + c_{\text{пр}})\} = W(p_{\text{ГСМ}}).$$

В то же время, умножив пассажирооборот на удельный расход топлива в расчете на пассажиро-километр, можно получить совокупный спрос на авиатопливо, который в конечном счете может быть выражен через его цену:

$$D = 10^{-3}g \cdot W = 10^{-3}g \cdot W(p_{\text{ГСМ}}) = D(p_{\text{ГСМ}}),$$

где D – совокупный спрос гражданской авиации на авиатопливо, млн т/год.

Таким образом, можно построить функцию совокупного спроса на авиатопливо. Остается сопоставить ее с функцией предложения авиатоплива $S(p_{\text{ГСМ}})$ и из условия их равенства оценить равновесные значения цены авиатоплива $p^*_{\text{ГСМ}}$, объема его реализации $Q^* = D(p^*_{\text{ГСМ}}) = S(p^*_{\text{ГСМ}})$, а также достигаемого при этом пассажирооборота воздушного транспорта, млрд пасс.-км/год:

$$W^* = \frac{10^3}{g}Q^*.$$

В данной работе необходимо строить модель уже для двухсекторных рынков авиатоплива и, соответственно, авиационной техники. Нахождение равновесия в такой системе рынков представляет собой проблему, допускающую несколько возможных решений – более или менее корректных, но и сложных или простых соответственно.

Модель стационарного равновесия на рынках традиционного и альтернативного авиатоплива

Если предположить, что оба вида авиатоплива (и воздушных судов, предназначенных для их использования) длительное время сосуществуют на рынках в стационарном режиме, тогда – поскольку рынок авиаперевозок предполагается единым – условием равновесия будет равенство себестоимостей авиаперевозок (в расчете на пассажиро-километр), выполняемых на традиционном и новом видах авиатоплива:

$$c^{\text{трад}}_{\text{ПКМ}} = c^{\text{нов}}_{\text{ПКМ}} = c_{\text{ПКМ}}.$$

Себестоимость авиаперевозок может быть выражена через цену ГСМ и их удельный расход:

$$c_{\text{ПКМ}} = 10^{-6}p^{\text{трад}}_{\text{ГСМ}}g^{\text{трад}} + c^{\text{трад}}_{\text{пр}} = 10^{-6}p^{\text{нов}}_{\text{ГСМ}}g^{\text{нов}} + c^{\text{нов}}_{\text{пр}},$$

где $g^{\text{трад}}$ и $g^{\text{нов}}$ – удельный расход топлива на пассажиро-километр для воздушных судов, использующих, соответственно, традиционное и новое авиатопливо, ден. ед./пасс.-км;

$c^{\text{трад}}_{\text{пр}}$ и $c^{\text{нов}}_{\text{пр}}$ – прочие (нетопливные) составляющие себестоимости пассажиро-километра для воздушных судов, использующих, соответственно, традиционное и новое авиатопливо, ден. ед./пасс.-км.

При заданной себестоимости авиаперевозок можно восстановить соответствующие ей цены обоих видов авиатоплива ($p^{\text{трад}}_{\text{ГСМ}}$ и $p^{\text{нов}}_{\text{ГСМ}}$):

$$p^{\text{трад}}_{\text{ГСМ}} = 10^6\frac{c_{\text{ПКМ}} - c^{\text{трад}}_{\text{пр}}}{g^{\text{трад}}},$$

$$p^{\text{нов}}_{\text{ГСМ}} = 10^6\frac{c_{\text{ПКМ}} - c^{\text{нов}}_{\text{пр}}}{g^{\text{нов}}}.$$

Они, очевидно, будут различаться, причем вероятнее всего $c^{\text{нов}}_{\text{пр}} > c^{\text{трад}}_{\text{пр}}$, поскольку, как уже отмечено, эффективный переход на альтернативные виды авиатоплива потребует масштабных изменений конструкции воздушных судов, возможно – технологий эксплуатации, технического обслуживания и ремонта. Однако это, как ожидается, будет компенсировано более низкими затратами на ГСМ.

Особо подчеркнем, что сами по себе значения удельного расхода, как и цен авиатоплива различных видов, могут значительно различаться. Например, при использовании сжиженных углеводородных газов, водорода и других газов ввиду отличия их теплотворной способности от таковой у керосина их удельные расходы могут быть существенно меньше или больше, чем удельный расход керосина. Однако на рынках, близких к равновесию, это обычно компенсируется различием цен в противоположную сторону.

В свою очередь, при заданных ценах каждого вида авиатоплива можно оценить объемы их равновесного предложения (и одновременно – равновесные объемы реализации):

$$Q^{\text{трад}} = S^{\text{трад}}(p^{\text{трад}}_{\text{ГСМ}}),$$
$$Q^{\text{нов}} = S^{\text{нов}}(p^{\text{нов}}_{\text{ГСМ}}).$$

В то же время эти объемы реализации авиатоплива однозначно связаны – посредством удельного расхода топлива на пассажиро-километр – с объемом транспортной работы, т.е. пассажирооборотом, выполняемым на данном виде топлива:

$$W^{\text{трад}*} = \frac{10^3}{g^{\text{трад}}} Q^{\text{трад}*},$$

$$W^{\text{нов}*} = \frac{10^3}{g^{\text{нов}}} Q^{\text{нов}*}.$$

При этом суммарный пассажирооборот воздушного транспорта однозначно определяется с помощью модели спроса на авиаперевозки ценой (тарифом) за пассажиро-километр:

$$W^* = W^{\text{трад}*} + W^{\text{нов}*} = W(p^*).$$

Как и ранее, тариф в стационарном состоянии представим в виде суммы себестоимости и нормы прибыли:

$$p = (1+\pi)c_{\text{ПКМ}}.$$

Таким образом, равновесие в описанной системе взаимосвязанных рынков определяется следующей системой уравнений:

$$W^{\text{трад}*} + W^{\text{нов}*} = W\{(1+\pi)c^*_{\text{ПКМ}}\},$$

$$W^{\text{трад}*} = \frac{10^3}{g^{\text{трад}}} S^{\text{трад}}(p^{\text{трад}*}_{\text{ГСМ}}),$$

$$W^{\text{нов}*} = \frac{10^3}{g^{\text{нов}}} S^{\text{нов}}(p^{\text{нов}*}_{\text{ГСМ}}),$$

$$p^{\text{трад}*}_{\text{ГСМ}} = 10^6 \frac{c^*_{\text{ПКМ}} - c^{\text{трад}}_{\text{пр}}}{g^{\text{трад}}},$$

$$p^{\text{нов}*}_{\text{ГСМ}} = 10^6 \frac{c^*_{\text{ПКМ}} - c^{\text{нов}}_{\text{пр}}}{g^{\text{нов}}}.$$

Как правило, она не решается аналитически хотя бы в силу того, что структурная модель спроса на авиаперевозки обычно не имеет простого аналитического выражения. Однако решение может быть найдено численно, путем последовательного изменения значения себестоимости пассажиро-километра. Важен вопрос существования и единственности равновесия. Проанализируем качественные свойства функциональных зависимостей, входящих в приведенную модель.

Согласно принятым допущениям, предложение топлива (любого вида) с ростом его цены возрастает или, по крайней мере, не убывает, если полностью задействованы мощности по добыче и переработке топливного сырья: $\frac{\partial S}{\partial p_{\text{ГСМ}}} \geq 0$. Спрос на авиаперевозки падает (или, по крайней мере, не возрастает, если уже упал до нуля) с ростом тарифа: $\frac{\partial W}{\partial p} \leq 0$. В свою очередь тариф пропорционален себестоимости пассажиро-километра, которая возрастает с ростом цен авиатоплива.

Таким образом, с одной стороны, спрос на авиаперевозки падает с ростом себестоимости перевозок, а с другой – с ее ростом возрастает предложение перевозок, обеспеченное авиатопливом обоих видов. Если равновесие достижимо, оно единственно. Его существование определяется начальным состоянием системы: пока альтернативных видов топлива не было, при некоторых значениях $p^{\text{трад}0}_{\text{ГСМ}}$ и $c^0_{\text{ПКМ}}$ предложение авиаперевозок удовлетворяло спрос на них.

Тогда при появлении второго сегмента рынка авиатоплива (если его предложение при цене $p^{\text{нов}}_{\text{ГСМ}} = 10^6 \frac{c^0_{\text{ПКМ}} - c^{\text{нов}}_{\text{пр}}}{g^{\text{нов}}}$ положительно) предложение авиаперевозок по меньшей мере не падает, и установится новое равновесие, описываемое построенной выше системой уравнений.

Таким образом, при разумных, экономически обоснованных допущениях о зависимостях, входящих в модели, равновесие существует, и оно единственно.

Прогнозирование влияния появления нового вида авиатоплива на доступность авиаперевозок и пассажирооборот воздушного транспорта

При появлении нового вида авиатоплива равновесная себестоимость авиаперевозок сократится, вызывая снижение цены и традиционного горючего. Практически важными являются следующие вопросы:

- на сколько сократятся цена и равновесный объем реализации традиционного авиатоплива?
- останется ли оно на рынке или будет окончательно вытеснено альтернативными?
- какими будут равновесные цена и объем реализации нового вида авиатоплива?
- на сколько увеличится совокупный пассажирооборот воздушного транспорта и на сколько сократятся тарифы?
- какие доли общего пассажирооборота будут выполняться на традиционном и на новом

авиатопливе и на соответствующих типах воздушных судов?

Потребная численность самолетов может быть далее оценена с использованием значений годовой производительности соответствующих типов воздушных судов (в млн пасс.-км/год на одно воздушное судно).

Очевидно, что ответы на эти вопросы во многом зависят от наименее определенной в настоящее время зависимости – функции предложения нового вида авиатоплива $S^{нов}(p^{нов}_{ГСМ})$. Она зависит от технологий получения этого продукта, от потенциально доступной ресурсной базы.

В ряде случаев существуют естественные ограничения выпуска топлива независимо от предлагаемой за него цены, т.е. предложение становится при превышении некоторой цены абсолютно неэластичным.

Строго говоря, предложение авиатоплива – как традиционного, так и нового – может зависеть не только от цены. В работе [20] строятся многопараметрические модели предложения новых видов авиатоплива, учитывающие возможности производства из того же сырья и на тех же мощностях других видов топлива и химических продуктов.

При значительной неопределенности функции предложения нового вида авиатоплива целесообразно провести сценарно-параметрический анализ, рассмотрев несколько видов этой функции с несколькими характерными значениями параметров. Пусть, например, функции предложения обоих видов авиатоплива имеют следующий вид:

- до некоторой минимальной цены предложение равно нулю, так как данный вид топлива невыгодно производить;
- далее предложение растет по мере увеличения цены линейно с некоторым коэффициентом (углом наклона кривой предложения), тонн в год/руб. за тонну;
- наконец, предложение достигает уровня насыщения, максимального объема, который не удастся превзойти в рамках рассматриваемой технологии (по причине ограниченности ресурсной базы), какую бы цену ни предлагали.

Исходные данные и результаты расчетов (пример)

Показатель	Традиционное топливо	Новое топливо
Параметры самолетов на различных видах топлива		
Нетопливные составляющие себестоимости перевозок, руб./пасс.-км	1,8	2
Удельный расход топлива, г/пасс.-км	35	50
Параметры моделей рынков авиатоплива		
Минимальная цена предложения, руб./т	20 000	5 000
Чувствительность предложения к росту цен, млн т/год / руб./т	0,0004	0,001
Максимальный объем производства, млн т/год	10	20
Равновесная цена топлива, руб./т	20 286	10 200
Объем производства при данной цене, млн т/год	0,11	5,20
Ограничения предложения перевозок по топливу		
Объем авиаперевозок на данном топливе, млрд пасс.-км/год	3	104
Выручка топливной отрасли, млрд руб./год	2,32	53,04

Пример исходных данных, необходимых для проведения расчетов по предложенной модели, и результаты расчета приведены в таблице.

Наглядно соответствующие кривые предложения изображены на рис. 1. В данном примере предполагается, что новый тип топлива в несколько раз дешевле традиционного в производстве и ресурсная

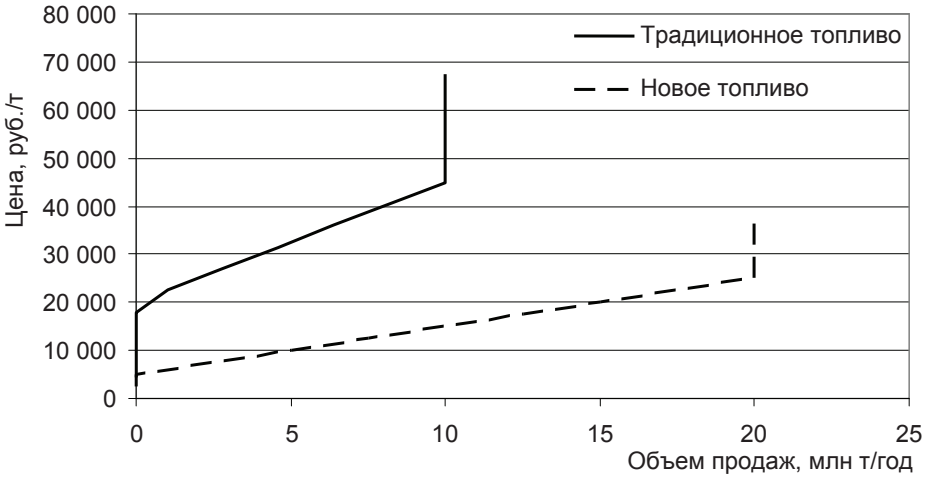

Рис. 1. Кривые предложения авиатоплива двух видов (пример)

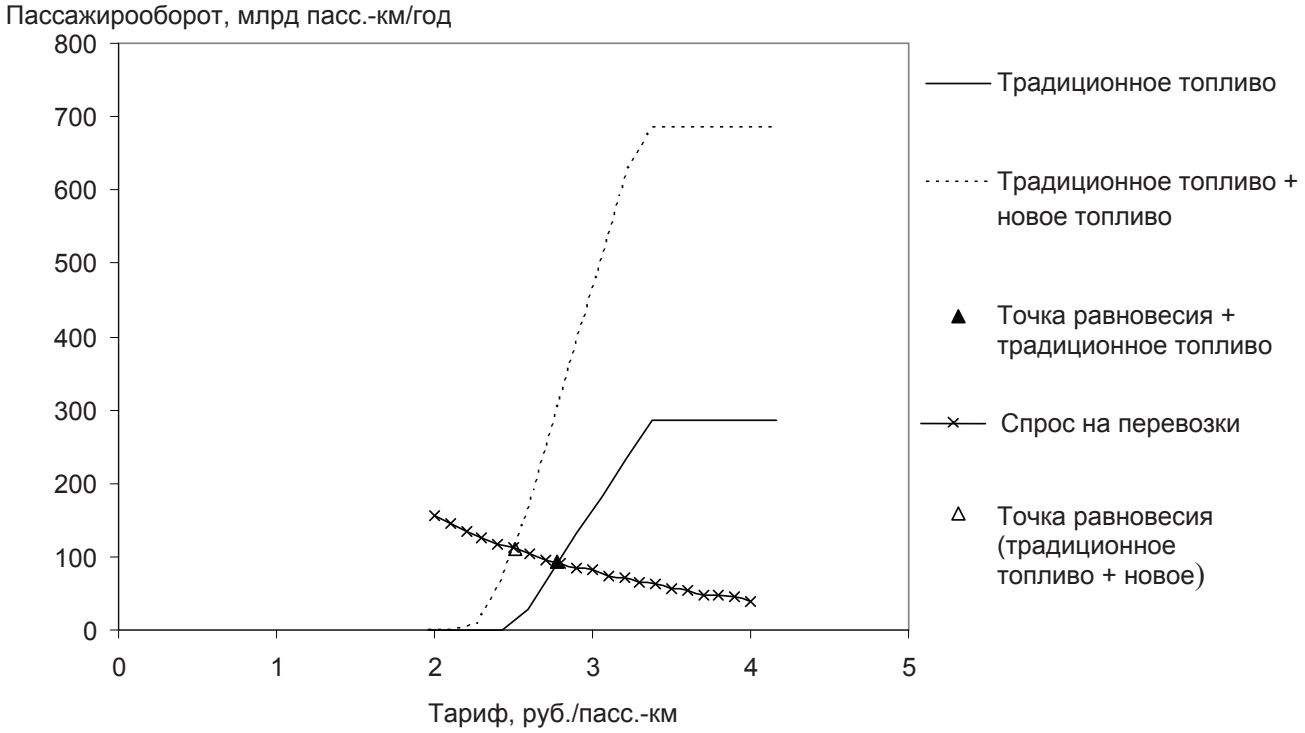

Рис. 2. Кривые предложения авиаперевозок и равновесие на рынках авиаперевозок (исходный пример)

база его производства вдвое превосходит таковую для традиционного авиатоплива.

Кривые предложения перевозок на данном виде топлива изображены на рис. 2 – только при наличии традиционного авиатоплива (сплошная линия) и при наличии помимо традиционного также нового вида топлива (штриховая линия). Объемы их предложения при данном уровне тарифа суммируются, поэтому кривая предложения авиаперевозок при наличии нового вида топлива является результатом сложения по вертикали кривых предложения авиаперевозок на обоих видах топлива.

Маркированной линией изображена кривая спроса на авиаперевозки, построенная на основе структурной оптимизационной модели (с учетом выбора различными доходными группами вида транспорта между самолетом и поездом)[1]. Треугольными маркерами обозначены точки равновесия на рынке авиаперевозок (маркер с заливкой соответствует равновесию на рынке при наличии лишь традиционного авиатоплива, маркер без заливки – равновесию при наличии помимо традиционного также нового вида авиатоплива).

До появления на рынке нового вида авиатоплива равновесный тариф составлял 2,78 руб./пасс.-км (см. рис. 2), а пассажирооборот воздушного транспорта – приблизительно 93 млрд пасс.-км/год. При появлении на рынке наряду с традиционным также и нового вида авиатоплива, предложение которого соответствует данным таблицы и кривой предложения, изображенной на рис. 1, равновесный тариф сокращается примерно до 2,51 руб./пасс.-км (т.е. на 10%), и перелеты осуществляются почти полностью на новом топливе (см. результаты расчетов в таблице). Пассажирооборот воздушного транспорта возрастет примерно до 110 млрд пасс.-км/год (т.е. на 18%).

Таким образом, при низком спросе на авиаперевозки вполне возможно, что даже возможности массового производства альтернативного авиатоплива, существенно более дешевого, чем традиционное, повысят доступность авиаперевозок лишь в незначительной степени. В то же время альтернативное топливо скорее призвано избежать сокращения доступности авиаперевозок при сокращении возможностей производства и удорожании традиционного авиатоплива.

Как изменится роль новых видов авиатоплива при гипотетическом повышении спроса на авиаперевозки? Рис. 3 аналогичен рис. 2, однако кривая спроса на авиаперевозки построена в предположении, что доходы всех доходных групп в структурной

[1] Модель калибрована для рынка дальних перевозок в России по состоянию на 2007 г., подробнее см. работу [4].

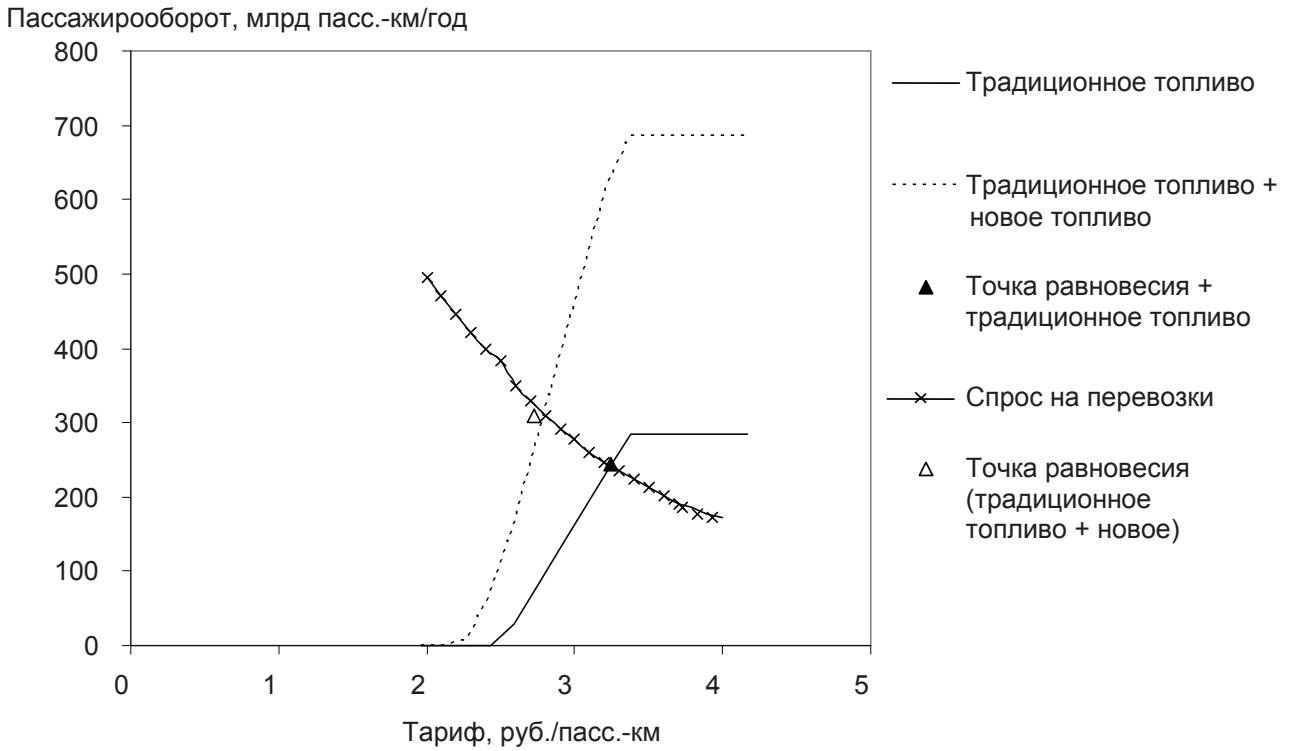

Рис. 3. Кривые предложения авиаперевозок и равновесие на рынках авиаперевозок (удвоение доходов населения)

модели, предложенной в книге [4], возросли вдвое, без изменения прожиточного минимума и других параметров модели. Спрос на авиаперевозки при этом выше, чем на рис. 2. Соответственно, до появления на рынке нового вида авиатоплива равновесный тариф составлял 3,24 руб./пасс.-км (см. рис. 3), а пассажирооборот воздушного транспорта – приблизительно 244 млрд пасс.-км/год.

При появлении на рынке наряду с традиционным также и нового вида авиатоплива, предложение которого соответствует данным таблицы и кривой предложения, изображенной на рис. 1, равновесный тариф сокращается примерно до 2,79 руб./пасс.-км (т.е. на 14%), и перелеты осуществляются почти полностью на новом топливе (см. результаты расчетов в таблице). Пассажирооборот воздушного транспорта возрастет примерно до 310 млрд пасс.-км/год (т.е. на 27%).

Еще более ярко выражен прирост доступности авиаперевозок при дальнейшем повышении спроса на них. Рис. 4 аналогичен рис. 2 и 3, но теперь предполагается, что доходы всех граждан пропорционально возросли втрое относительно первоначального уровня.

До появления на рынке нового вида авиатоплива равновесный тариф (см. рис. 4) составлял 4,45 руб./пасс.-км, а пассажирооборот воздушного транспорта – приблизительно 285 млрд пасс.-км/год. При появлении на рынке наряду с традиционным также и нового вида авиатоплива, предложение которого соответствует данным таблицы и кривой предложения, изображенной на рис. 1, равновесный тариф сокращается примерно до 3,05 руб./пасс.-км (т.е. на 31%). Пассажирооборот воздушного транспорта возрастет примерно до 510 млрд пасс.-км/год (т.е. на 80%).

Интересно отметить, что при этом объем производства традиционного авиатоплива составит 6,4 млн т/год, а нового – 16,2 млн т/год, т.е. на нем будет выполняться менее 2/3 авиаперевозок, тогда как в случае, показанном на рис. 2, – свыше 97%. Рост спроса на авиаперевозки в рассматриваемых примерах приведет к тому, что наряду с более доступным новым видом авиатоплива придется в большей мере использовать и традиционное.

Таким образом, при повышении спроса на авиаперевозки (например, благодаря росту благосостояния населения) наличие альтернативного, более дешевого и доступного авиатоплива позволит более существенно расширить рамки ресурсных ограничений роста доступности услуг воздушного транспорта.

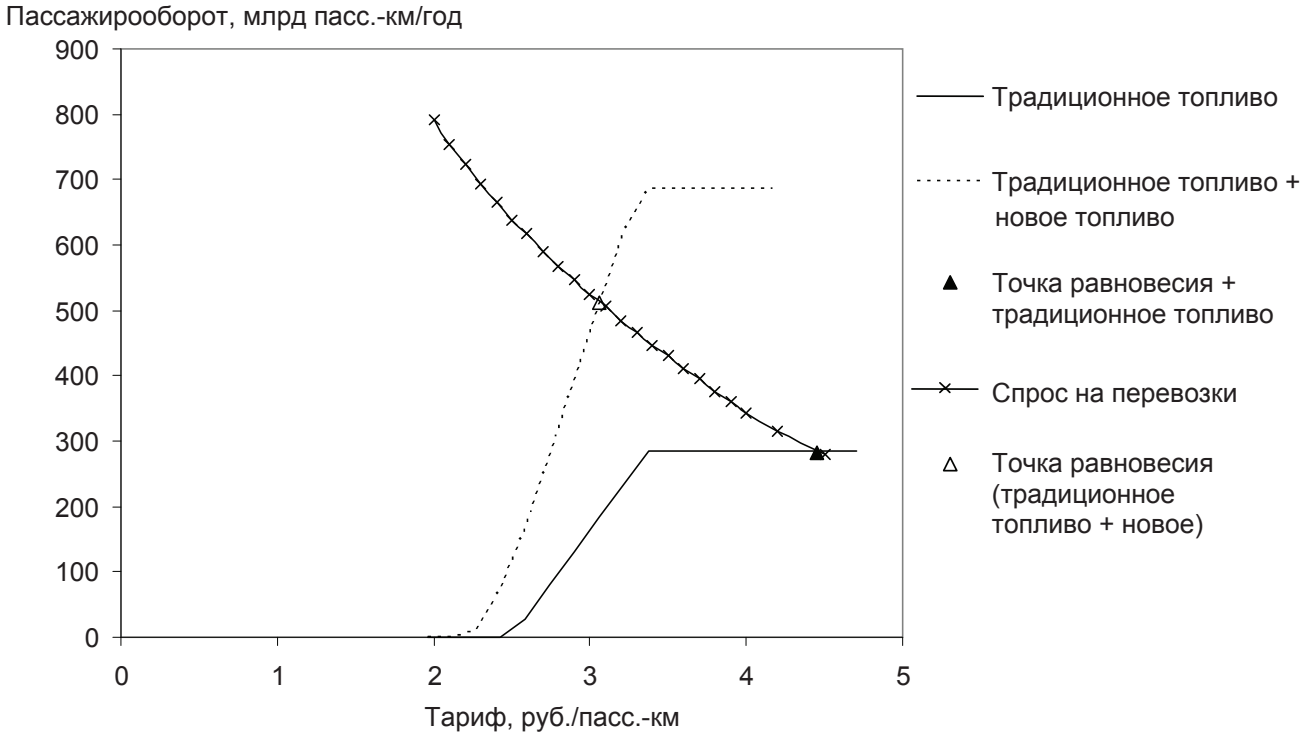

Рис. 4. Кривые предложения авиаперевозок и равновесие на рынках авиаперевозок (утроение доходов населения)

Анализ альтернативных путей инновационного развития гражданской авиационной техники при появлении доступных новых видов авиатоплива. При наличии более дешевого и доступного авиатоплива, возможно, будет целесообразным создание в перспективе более дешевой в производстве и обслуживании, хотя и менее экономичной (в смысле удельного расхода топлива) авиатехники, что позволит эффективнее использовать новые возможности.

Предложенная модель позволяет проанализировать эффективность различных стратегий инновационного развития гражданского авиастроения, согласованных с перспективами производства авиатоплива. Создание нового типа гражданских воздушных судов, адаптированных под более дешевое и доступное авиационное топливо, окажет благотворное влияние на доступность авиаперевозок, если «предложение авиаперевозок на новом виде авиатоплива» увеличится. Согласно ранее полученным зависимостям

$$W^{\text{нов}}(p) = W^{\text{нов}}[(1+\pi)c_{\text{ПКМ}}] = \frac{10^3}{g^{\text{нов}}} S^{\text{нов}}(p^{\text{нов}}_{\text{ГСМ}}) = \frac{10^3}{g^{\text{нов}}} S^{\text{нов}}\left(10^6 \frac{c_{\text{ПКМ}} - c^{\text{нов}}_{\text{пр}}}{g^{\text{нов}}}\right).$$

Если альтернативный тип воздушного судна, адаптированный под более дешевое авиатопливо, обладает более высоким его удельным расходом: $g^{\text{нов}'} > g^{\text{нов}}$, но более низкими значениями прочих удельных затрат: $c^{\text{нов}'}_{\text{пр}} < c^{\text{нов}}_{\text{пр}}$ [2], то при заданных уровне тарифа p и, следовательно, себестоимости авиаперевозок $c_{\text{ПКМ}}$ создание такого адаптированного типа будет целесообразным при условии

$$W^{\text{нов}'}(p) = W^{\text{нов}'}[(1+\pi)c_{\text{ПКМ}}] > W^{\text{нов}}(p) = W^{\text{нов}}[(1+\pi)c_{\text{ПКМ}}]$$

или

$$\frac{10^3}{g^{\text{нов}'}} S^{\text{нов}}\left(10^6 \frac{c_{\text{ПКМ}} - c^{\text{нов}'}_{\text{пр}}}{g^{\text{нов}'}}\right) > \frac{10^3}{g^{\text{нов}}} S^{\text{нов}}\left(10^6 \frac{c_{\text{ПКМ}} - c^{\text{нов}}_{\text{пр}}}{g^{\text{нов}}}\right).$$

[2] В этой величине заключены в том числе амортизация воздушного судна и стоимость его технического обслуживания и ремонта. Иначе говоря, более низкое значение прочих, нетопливных эксплуатационных расходов может отражать в том числе и более низкую цену, которая в свою очередь отражает меньшие затраты на исследования и разработки, нацеленные на повышение топливной экономичности самолета. Если новое авиатопливо более доступно, то, на первый взгляд, актуальность таких исследований и разработок снижается.

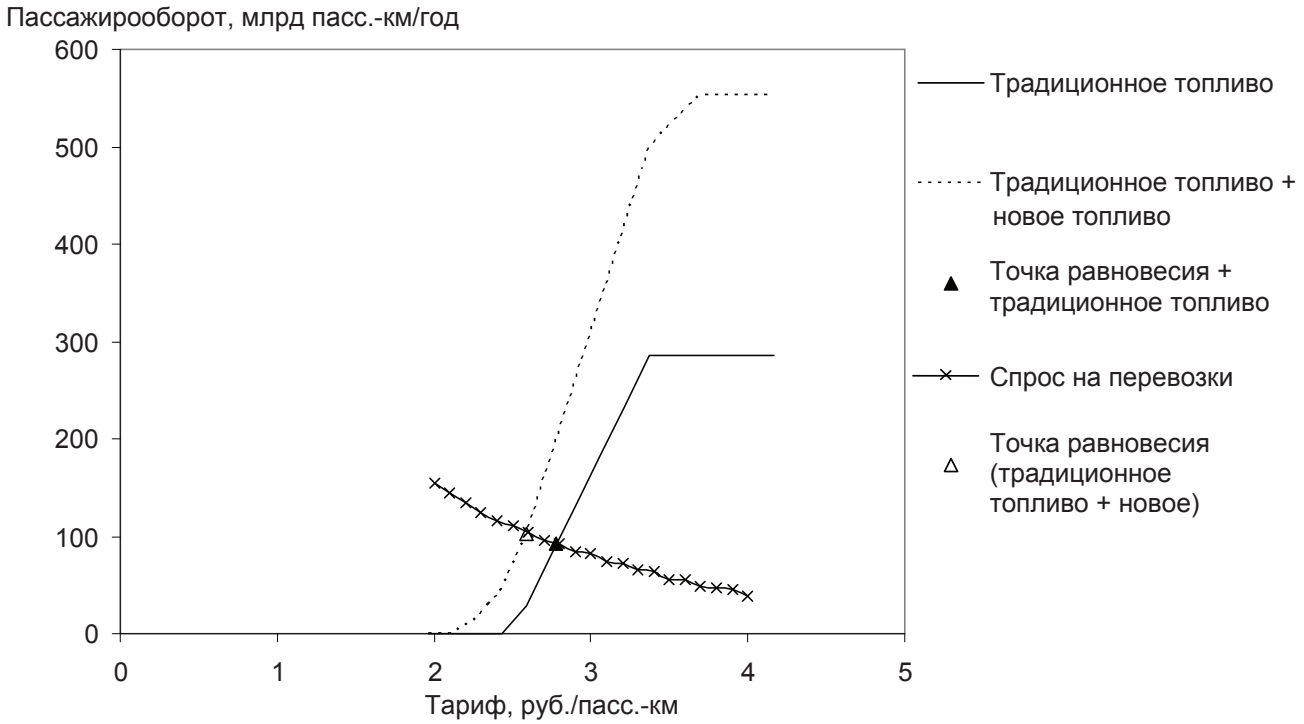

Рис. 5. Кривые предложения авиаперевозок и равновесие на рынках авиаперевозок (исходный уровень доходов населения, альтернативный проект воздушного судна № 1)

Необходимым, но недостаточным условием выполнения этого неравенства является прирост цены спроса на новый вид авиатоплива при заданной себестоимости пассажиро-километра:

$$\frac{c_{\text{ПКМ}} - c_{\text{пр}}^{\text{нов}'}}{g^{\text{нов}'}} > \frac{c_{\text{ПКМ}} - c_{\text{пр}}^{\text{нов}}}{g^{\text{нов}}} \text{ или}$$

$$\frac{g^{\text{нов}'}}{g^{\text{нов}}} < \frac{c_{\text{ПКМ}} - c_{\text{пр}}^{\text{нов}'}}{c_{\text{ПКМ}} - c_{\text{пр}}^{\text{нов}}}.$$

Если это условие не выполняется, повышение доступности авиаперевозок при выборе альтернативного проекта воздушного судна заведомо недостижимо. В рамках примера, представленного на рис. 1 и 2, рассмотрим также альтернативный проект, приспособленный к использованию нового вида авиатоплива. Пусть он обеспечивает значение прочих эксплуатационных расходов на уровне, характерном для воздушного судна, использующего традиционное авиатопливо, т.е. $c_{\text{пр}}^{\text{нов}'} = 1{,}8$ руб./пасс.-км, а удельный расход нового вида авиатоплива – на уровне 75 г/пасс.-км.

Соответствующая этому набору параметров ситуация изображена на рис. 5, идентичном рис. 2. До появления на рынке нового вида авиатоплива (см. рис. 5) равновесный тариф составлял 2,78 руб./пасс.-км, а пассажирооборот воздушного транспорта – приблизительно 93 млрд пасс.-км/год. При появлении на рынке наряду с традиционным также и нового вида авиатоплива, предложение которого соответствует данным таблицы и кривой предложения, изображенной на рис. 1, а также при выборе описанного альтернативного проекта воздушного судна, рассчитанного на использование нового вида топлива, равновесный тариф сокращается примерно до 2,59 руб./пасс.-км (т.е. на 7% против 10%), а пассажирооборот воздушного транспорта возрастет примерно до 103 млрд пасс.-км/год (т.е. на 11% против 18%). Следовательно, такой альтернативный проект неэффективен[3], и предпочтительнее тот проект воздушного судна, рассчитанного на использование нового вида авиатоплива, который был рассмотрен в таблице и на рис. 2.

Иная ситуация имеет место, если альтернативный проект воздушного судна обеспечивает значение прочих эксплуатационных расходов на уровне

[3] Прежде всего с социально-экономической точки зрения. Что касается коммерческой эффективности для разработчиков и производителей, меньшие объемы производства такой техники (в силу меньшего спроса на авиаперевозки) следует сопоставить с меньшими затратами на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы и, возможно, меньшими удельными расходами на производство каждого экземпляра таких «упрощенных» изделий.

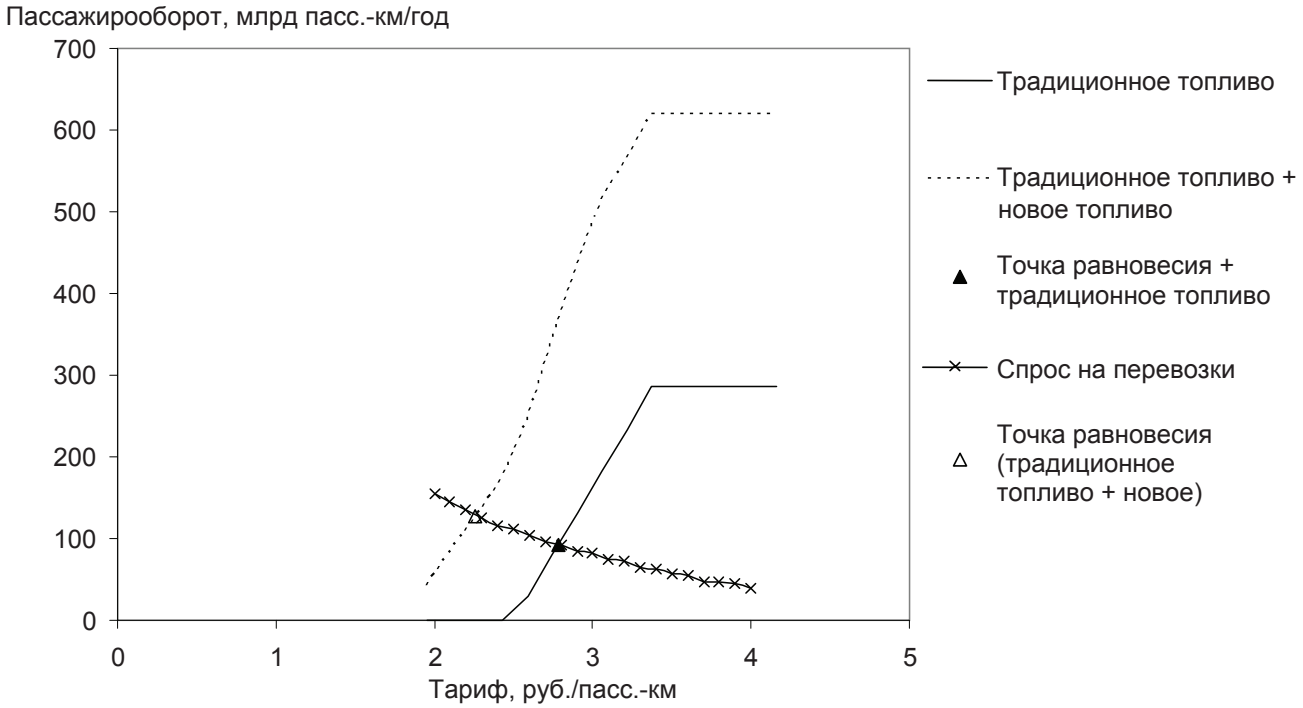

Рис. 6. Кривые предложения авиаперевозок и равновесие на рынках авиаперевозок (исходный уровень доходов населения, альтернативный проект воздушного судна № 2)

$c_{\text{пр}}^{\text{нов}''}$ = 1,5 руб./пасс.-км, а удельный расход нового вида авиатоплива – на уровне $g^{\text{нов}''}$ = 60 г/пасс.-км. Соответствующая этому набору параметров ситуация изображена на рис. 6, идентичном рис. 2 и 5.

В этом случае при появлении на рынке наряду с традиционным также и нового вида авиатоплива равновесный тариф сокращается примерно до 2,26 руб./пасс.-км (т.е. почти на 19% против 10%), а пассажирооборот воздушного транспорта возрастет примерно до 128 млрд пасс.-км/год (т.е. на 38% против 18%). Следовательно, такой альтернативный проект предпочтительнее, чем исходный проект воздушного судна, рассчитанный на использование нового вида авиатоплива, параметры которого были представлены в таблице.

Выводы

1. Влияние появления новых источников авиационного топлива на доступность авиаперевозок существенно зависит от социально-экономической ситуации. При относительно низком спросе на авиаперевозки, когда их доступность не превышает 10–20% населения (что характерно для современной России, а также для мира в целом), даже при появлении существенно более дешевого источника авиационного топлива с потенциальными объемами производства вдвое выше, чем у традиционного авиатоплива, и минимальной ценой предложения вчетверо ниже тарифы сократятся приблизительно на 10%, а пассажирооборот воздушного транспорта возрастет менее чем на 20%.

Лишь при повышении доходов населения в 2–3 раза можно ожидать, что появление более дешевого авиатоплива позволит сократить тарифы на 15–30%, а пассажирооборот воздушного транспорта увеличить на 30–80%. Таким образом, альтернативные виды авиатоплива призваны, скорее, заместить традиционное по мере исчерпания нефтяных запасов и удорожания добычи нефти.

Особую роль играют местные топливные ресурсы (например, авиатопливо из попутного нефтяного газа) в районах Крайнего Севера, так как их использование позволяет избежать доставки в эти регионы традиционного авиатоплива, приводящей к его 2-3-кратному удорожанию.

2. Поскольку современная гражданская авиационная техника спроектирована в значительной степени по критерию снижения удельного расхода авиатоплива, повышение доступности последнего позволит в долгосрочной перспективе, изменив критерии проектирования воздушных судов и авиадви-

гателей, дополнительно сократить себестоимость авиаперевозок и повысить их доступность.

Если удастся сократить прочие, не связанные с потреблением топлива эксплуатационные затраты на 25%, то даже при повышении удельного расхода более дешевого авиатоплива на 20% (относительно исходного уровня, в 1,5 раза превышавшего удельный расход традиционного авиатоплива), можно рассчитывать в нынешней социально-экономической ситуации на прирост пассажирооборота воздушного транспорта на 30–40% вместо 15–20%.

Список литературы

1. *Белова С.* Финский самолет пролетел более восьми часов на фритюрном масле. URL: http://www.kommersant.ru/doc/2580338.

2. *Даффи П., Кандалов А.И.* А.Н. Туполев – человек и его самолеты. М.: Московский рабочий, 1999. 264 с.

3. *Дутов А.В., Маврицкий В.И., Зайцев В.П.* Перевод авиации на газ: варианты решения транспортной проблемы северных и арктических регионов // Арктика: экология и экономика. № 3. 2011. С. 80–89.

4. *Клочков В.В.* Управление инновационным развитием гражданского авиастроения. М.: МГУЛ, 2009. 280 с.

5. *Клочков В.В., Ратнер С.В.* Управление развитием «зеленых» технологий: экономические аспекты. М.: ИПУ РАН, 2013. 292 с.

6. *Комаров Н.Н., Потапов И.И., Карцева Е.В.* Авиационный транспорт: перспективы перевозок, безопасность и охрана окружающей среды // Экономика природопользования. 2009. № 5. С. 44–51.

7. *Луковников А.В., Разносчиков В.В., Яновская М.Л.* Выбор и оптимизация состава авиационных газовых и сконденсированных топлив по критериям эффективности летательного аппарата. URL: http://www.mai.ru/upload/iblock/57a/57af3026f6cafcdf70c24b56ce37b0da.rar.

8. *Михайлов Ю.С., Петров А.В.* Проблемы формирования аэродинамических компоновок самолетов-криопланов. URL: http://www.mstuca.ru/scientific_work/research_herald/content/175.pdf.

9. *Нижегородцев Р.М.* Экономика инноваций / Краснодар: КубГАУ, 2014. 140 с.

10. *Позамантир Э.И.* Модели спроса на перевозки / Экономико-математический энциклопедический словарь. М.: Большая Российская энциклопедия, 2003. С. 506–508.

11. *Разносчиков В.В.* Анализ эффективности транспортных самолетов на альтернативных видах топлива // Наука и транспорт. Гражданская авиация. 2012. № 1. С. 26–30.

12. *Синяк Ю.В., Колпаков А.Ю.* Экономические оценки использования в автотранспорте альтернативных моторных топлив на базе природного газа // Проблемы прогнозирования. 2012. № 2. С. 34–47.

13. Энциклопедия «Авиация». М.: Большая Российская энциклопедия, 1994. 736 с.

14. Analysis of aviation & fuel price scenatious for U.S. participation in the ICAO group on international aviation and climate change. Report for the U.S. Federal Aviation Administration GIACC/4-IP/12. Washington DC, U.S. Department of Housing and Urban Development, Office of environment and Energy, May 2009, 80 p.

15. *Chevallier Julien & Chuze Benoot & Gastineau Pascal.* Forecasting world and regional aviation Jet-Fuel demands to the mid term (2025). URL: http://econpapers.repec.org/article/eeeenepol/v_3a39_3ay_3a2011_3ai_3a9_3ap_3a5147-5158.htm.

16. *Daggett D., Hadaller O., Hendricks R., Walther R.* Alternative Fuels and Their Potential Impact on Aviation. URL: http://www.obsa.org/Lists/Documentacion/Attachments/41/Alternative_Fuel_Potencial_Impact_Aviation_EN.pdf.

17. *Herring H.* Rebound effect in: Encyclopedia of Earth. Eds. Cutler J. Cleveland. URL: http://www.eoearth.org/article/Rebound_effect.

18. *James I. Hileman, David S. Ortiz, James T. Bartis, Hsin Min Wong, Pearl E. Donohoo, Malcolm A. Weiss, Ian A. Waitz.* Near-Term Feasibility of Alternative Jet Fuels. URL: http://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/technical_reports/2009/RAND_TR554.pdf.

19. Technology Readiness Assessment (TRA) Guidance. US Department of Defense, 2011, 156 p.

20. *Winchester N., D. McConnachie, C. Wollersheim and I.A. Waitz.* Market Cost of Renewable Jet Fuel Adoption in the United States. URL: http://globalchange.mit.edu/files/document/MITJPSPGC_Rpt238.pdf.

Financial analytics: science and experience
ISSN 2311-8768 (Online)
ISSN 2073-4484 (Print)

Issues on economics

SIMULATION OF AVIATION MARKET DEVELOPMENT AND THE INTRODUCTION OF NEW AVIATION FUELS

Vladislav V. KLOCHKOV,
Bayaz A. BAGIR-ZADE

Abstract

Importance The long-term trend of oil price increase, as well the inevitable reduction of oil supplies, make the global civil aviation (and the aircraft industry and energy supply sector as well) search for alternative types of fuel, which could be able to compete with the traditional fuels. This article deals with the problem of forecasting the economic perspectives of the new jet fuel development. The paper considers several "candidates" for alternative fuels and provides a brief comparison of their characteristics. We provide a structure of economic-mathematical equilibrium models in the system of interconnected aviation fuel, aircraft and air transportation markets, if only one type of fuel is available.

Objectives The paper mainly discusses the development of a stationary equilibrium model on the two-sector market: traditional and alternative fuels. It is proved, that such equilibrium does really exist under certain assumptions about the specifics of dependences included in models.

Methods Practically important is the question what place will traditional fuel take, whether it would be superseded by the alternative fuel. In order to answer these and others questions, we carry out a scenario-parametric analysis. We consider the example of some alternative fuel with given generalized techno-economic parameters (in particular, the specific consumption per passenger-km ratio, as well as the supply function coefficients). The offered model allows evaluating and demonstrating the equilibrium production of both types of jet fuel, as well as parameters of equilibrium on passenger air transportation service markets.

Results In the long run, the process of directions of adaptation of new types of aircraft to alternative fuel that enables to use its ability more efficiently assumes its relevance.

Conclusions and Relevance In the process of parametric calculation, the paper considers alternative projects of aircraft (a level of generalized technical and economic parameters, including specific fuel consumption and a level of other operational costs), that would use new fuel, and it also shows the method of their effectiveness comparison.

Keywords: jet fuel, alternative aero fuels, forecasting, multi-sector market, equilibrium, efficiency

References

1. Belova S. *Finskii samolet proletel bolee 8 chasov na frityurnom masle* [A Finnish aircraft flew more than eight hours on frying oil]. Available at: http://www.kommersant.ru/doc/2580338. (In Russ.)

2. Daffi P., Kandalov A.I. *A.N. Tupolev – chelovek i ego samolety* [Tupolev A.N.: the man and his aircraft]. Moscow, Moskovskii rabochii Publ., 1999, 264 p.

3. Dutov A.V., Mavritskii V.I., Zaitsev V.P. Perevod aviatsii na gaz: varianty resheniya transportnoi problemy severnykh i arkticheskikh regionov [Conversion of aviation to natural gas: solution options for the Northern and Arctic regions' transportation problem]. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: ecology and economics*, no. 3, 2011, pp. 80–89.

4. Klochkov V.V. *Upravlenie innovatsionnym razvitiem grazhdanskogo aviastroeniya* [Innovation development management of the civil aircraft industry]. Moscow, MSFU Publ, 2009, 280 p.

5. Klochkov V.V., Ratner S.V. *Upravlenie razvitiem "zelenykh" tekhnologii: ekonomicheskie aspekty* [Management of green technologies' development: economic aspects]. Moscow, Institute of Control Sciences of RAS Publ., 2013, 292 p.

6. Komarov N.N., Potapov I.I., Kartseva E.V. Aviatsionnyi transport: perspektivy perevozok, bezopasnost' i okhrana okruzhayushchei sredy [Aviation transport: prospects of transport, security and environmental protection]. *Ekonomika prirodopol'zovaniya = Economics of natural resource management*, 2009, no. 5, pp. 44–51.

7. Lukovnikov A.V., Raznoschikov V.V., Yanovskaya M.L. *Vybor i optimizatsiya sostava avi-*

atsionnykh gazovykh i skondensirovannykh topliv po kriteriyam effektivnosti letatel'nogo apparata [Selection and content optimization of aviation gaseous and condensed fuels by criteria of aircraft efficiency]. Available at: http://www.mai.ru/upload/iblock/57a/57af3026f6cafcdf70c24b56ce37b0da.rar. (In Russ.)

8. Mikhailov Yu.S., Petrov A.V. *Problemy formirovaniya aerodinamicheskikh komponovok samoletov-krioplanov* [Problems of the forming of aerodynamic design components of hydrogen aircraft]. Available at: http://www.mstuca.ru/scientific_work/research_herald/content/175.pdf. (In Russ.)

9. Nizhegorodtsev R.M. *Ekonomika innovatsii* [Economics of innovation]. Krasnodar, Kuban State Agricultural University Publ., 2014, 140 p.

10. Pozamantir E.I. *Modeli sprosa na perevozki. In: Ekonomiko-matematicheskii entsiklopedicheskii slovar'* [Models of transportation demand. In: Encyclopedic Dictionary of Economics and Mathematics]. Moscow, Bol'shaya Rossiiskaya entsiklopediya Publ., 2003, pp. 506–508.

11. Raznoschikov V.V. Analiz effektivnosti transportnykh samoletov na al'ternativnykh vidakh topliva [An analysis of the efficiency of transport aircraft using alternative fuels]. *Nauka i transport. Grazhdanskaya aviatsiya = Science and transport. Civil aviation*, 2012, no. 1, pp. 26–30.

12. Sinyak Yu.V., Kolpakov A.Yu. Ekonomicheskie otsenki ispol'zovaniya v avtotransporte al'ternativnykh motornykh topliv na baze prirodnogo gaza [Economic evaluations of the use of alternative motor fuels on the basis of natural gas]. *Problemy prognozirovaniya = Studies on Russian Economic Development*, 2012, no. 2, pp. 34–47.

13. *Entsiklopediya "Aviatsiya"* [The Aviation Encyclopedia]. Moscow, Bol'shaya Rossiiskaya entsiklopediya Publ., 1994, 736 p.

14. Analysis of aviation & fuel price scenarios for U.S. participation in the ICAO group on international aviation and climate change. Report for the U.S. Federal Aviation Administration GIACC/4-IP/12. Washington DC, U.S. Department of Housing and Urban Development, Office of Environment and Energy, May 2009, 80 p.

15. Chevallier J., Chèze B., Gastineau P. Forecasting world and regional aviation Jet-Fuel demands to the mid-term (2025). Available at: http://econpapers.repec.org/article/eeeenepol/v_3a39_3ay_3a2011_3ai_3a9_3ap_3a5147-5158.htm.

16. Daggett D., Hadaller O., Hendricks R., Walther R. Alternative Fuels and Their Potential Impact on Aviation. Available at: http://www.obsa.org/Lists/Documentacion/Attachments/41/Alternative_Fuel_Potencial_Impact_Aviation_EN.pdf.

17. Herring H. Rebound effect in: Encyclopedia of Earth. Eds. Cutler J. Cleveland. Available at: http://www.eoearth.org/article/Rebound_effect.

18. James I. Hileman, David S. Ortiz, James T. Bartis, Hsin Min Wong, Pearl E. Donohoo, Malcolm A. Weiss, Ian A. Waitz. Near-Term Feasibility of Alternative Jet Fuels. Available at: http://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/technical_reports/2009/RAND_TR554.pdf.

19. Technology Readiness Assessment (TRA) Guidance. US Department of Defense, 2011, 156 p.

20. Winchester N., McConnachie D., Wollersheim C., Waitz I.A. Market Cost of Renewable Jet Fuel Adoption in the United States. Available at: http://globalchange.mit.edu/files/document/MITJPSPGC_Rpt238.pdf.

Vladislav V. KLOCHKOV
Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
vlad_klochkov@mail.ru

Bayaz A. BAGIR-ZADE
Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Moscow, Russian Federation
jasmin_bella@mail.ru

Acknowledgments
The work was funded by the Russian Foundation for Basic Research, project No. 13-06-00169 "Modeling of strategies for the energy clusters development during the technological gap".