

DOI:

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ РЕГУЛЯРНЫХ МЕСТНЫХ ВОЗДУШНЫХ ПЕРЕВОЗОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СКОРОСТНЫХ ВИНТОКРЫЛЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Карпов А.Е., Клочков В.В.

НИЦ Институт им. Н.Е. Жуковского, Россия, г. Жуковский

ул. Жуковского, д. 1

karpovae@mail.ru, vlad_klochkov@mail.ru

Аннотация: В работе анализируются перспективы применения скоростных винтокрылых летательных аппаратов как альтернативного варианта организации местных авиaperезовок в малонаселенных регионах РФ. С помощью предложенной модели в рамках сценарных расчетов проведена оценка требований к основным технико-экономическим характеристикам скоростных винтокрылых летательных аппаратов.

Ключевые слова: авиастроение, скоростной винтокрылый летательный аппарат, авиатранспортная система, пассажироперевозки, местные воздушные линии, себестоимость перевозки, транспортная работа

Введение

Как показано в работе [1], в малонаселенных регионах РФ в силу неравномерности расселения часто возникают ситуации, когда малые и редко расположенные населенные пункты находятся вдали от регионального центра (в крупнейших регионах такого рода по площади общей территории, например, в Якутии – на расстояниях 1000-1500 км), тогда как ближе к региональному центру плотность населения и расположения населенных пунктов, а также их масштабы, возрастают. Однако, редко расположенные населенные пункты, удаленные от регионального центра, также должны быть связаны регулярным пассажирским авиасообщением, по меньшей мере, со столицей региона. Причем, в первую очередь, это обуславливается отсутствием альтернатив воздушному транспорту на рассматриваемых территориях.

Создание современной наземной транспортной инфраструктуры в таких условиях является слишком дорогой альтернативой. В текущих условиях и в среднесрочной перспективе создание и поддержание работы авиационной инфраструктуры (аэропортов низкого класса) возможно лишь в ограниченном количестве населенных пунктов. Они сильно удалены от регионального центра, и обеспечение приемлемого качества транспортного обслуживания, измеряемого прежде всего общим временем в пути, требует высокой скорости полета. Например, при дальности 1000-1500 км крейсерские скорости 300-350 км/ч, характерные для современных самолетов МВЛ, приводят к тому, что только общая продолжительность полета составит более 3,5 часов от регионального центра только до ближайшего аэропорта. В таких условиях пассажиру требуется еще добраться непосредственно до населенного пункта и время в пути в большинстве случаев будет превышать 5 часов, для перспективной авиатранспортной системы такой уровень услуг можно считать неприемлемым [2]. Плюс ко всему, для обслуживания описанных маршрутов с обеспечением определенного уровня регулярности рейсов самолеты должны иметь малую вместимость (согласно исследованию [1] вплоть до 3-5 мест) и соответствующие габариты салона, в значительной степени негативно влияющие на комфорт при транспортировке. Таким образом, желательное повышение крейсерской скорости до уровня не менее 400-450 км/ч, что выходит за рамки возможностей современных вертолетов.

Достичь таких значений скорости и дальности могут либо самолеты, либо скоростные винтокрылые летательные аппараты (ВКЛА), например, конвертируемые, и ВКЛА других схем, которые в настоящее время разрабатываются и находятся на низких уровнях готовности. Однако, малый пассажиропоток на описанных дальних маршрутах делает невыгодным строительство и содержание аэропортов в каждом отдаленном населенном пункте. В таких условиях скоростные ВКЛА могут иметь преимущество, в том числе и потому что они менее требовательны к авиационной инфраструктуре.

Уже в среднесрочной перспективе в мире ожидается освоение серийного производства скоростных ВКЛА гражданского назначения [3]. В разрабатываемых концепциях конвертируемых ВКЛА предполагается почти двукратное увеличение крейсерской скорости полета по сравнению с современными вертолетами. Такое потенциальное улучшение качества транспортных услуг вместе с возможностью вертикального взлета и посадки (сокращение инфраструктурных расходов) определяют актуальность оценки целесообразности организации системы местных воздушных перевозок с применением скоростных ВКЛА, выполняющих прямые рейсы в малые населенные пункты, по сравнению с маршрутной сетью, в которой транспортировка пассажиров выполняется с помощью

самолета до периферийного аэродрома (удаленного от регионального центра), а дальнейший их развоз осуществляется на классическом вертолете (с относительно малой крейсерской скоростью) до конечных пунктов назначения – малых населенных пунктов. Описанную маршрутную сеть, в которой используется несколько видов воздушного транспорта, будем далее называть звездообразной. Построив экономико-математическую модель организации звездообразной маршрутной сети, можно определить требования к характеристикам скоростных ВКЛА относительно перспективных характеристик гражданских самолетов для местных воздушных линий (МВЛ) и вертолетов классических схем.

В работе моделируется звездообразная транспортная сеть, в которой оптимизируется расположение периферийных аэропортов в зависимости от удаленности от столицы региона с учетом плотности и подвижности населения и ряда других факторов. В модели вводится временное ограничение, характеризующее качество предоставляемых транспортных услуг, которое определяется необходимостью выполнения определенного транспортного стандарта. При расчете полного времени поездки учитывается интервал между рейсами, учет которого позволяет сформировать требование к вместимости летательных аппаратов для звездообразной маршрутной сети. Вместимость скоростного ВКЛА определяется из условия, что общее время транспортной операции не должно превышать аналогичный показатель для звездообразной сети, также предлагается оценить влияние скорости ВКЛА на требование к его вместимости. С помощью модели оценивается стоимость выполнения единицы транспортной работы ВКЛА, при которой в рамках модели их эксплуатация будет эффективнее авиатранспортной системы со звездообразной маршрутной сетью. Таким образом, в работе предлагается сформировать требования к дальности, скорости, вместимости и стоимости кресло-километра перевозки перспективного скоростного ВКЛА для авиатранспортной системы в регионах с малыми населенными пунктами, удаленными от центра субъекта РФ.

1. Моделирование применения скоростных винтокрылых летательных аппаратов для регулярных местных пассажирских авиаперевозок

В модели рассматривается две схемы организации перевозок (см. рис. 1), представляющие собой полеты с помощью скоростного ВКЛА в любой населенный пункт (в каждом из них может быть оборудована вертолетная площадка) или перевозку самолетом до периферийного мини-аэродрома, охватывающего несколько населенных пунктов, с дальнейшим развозом пассажиров по окрестностям с помощью классического вертолета.

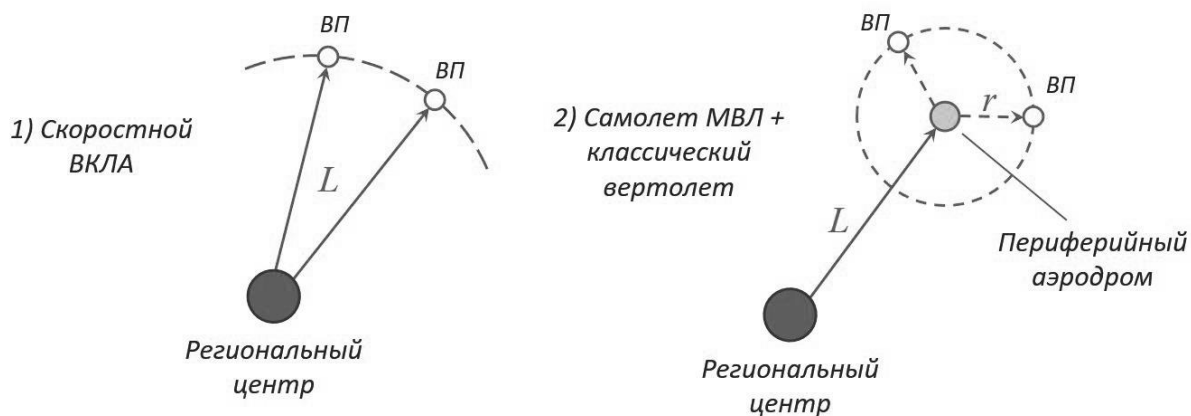


Рис. 1. Схемы организации перевозок в отдаленные населенные пункты

Сопоставим описанные альтернативы организации авиасообщения регионального центра с отдаленными населенными пунктами по общим затратам в расчете на одного пассажира, построив соответствующие экономико-математические модели. Обозначим L как характерное расстояние от регионального центра до населенного пункта, q – характерный годовой пассажиропоток между этим населенным пунктом и региональным центром. Стоимость кресло-километра летательных аппаратов обозначим $c_{ккм}$ (характеристики различных типов летательных аппаратов далее отличаются по верхнему индексу). Инфраструктурные расходы $C_{инфр}$ (в среднем в год) представим в виде затрат на создание взлетно-посадочной площадки $C_{пост} / T$ (взлетно-посадочной полосы для самолета МВЛ и

вертолетной площадки для скоростного ВКЛА, T – длительность эксплуатации, по истечении которой требуется модернизация авиационной инфраструктуры) и стоимости ее годового обслуживания $C_{обсл}$.

В силу технических особенностей рассмотренных воздушных судов (ВС) выделенные стоимостные параметры соотносятся следующим образом: $c_{ккм}^{ВКЛА} > c_{ккм}^{сам}$; $C_{инфр}^{ВКЛА} < C_{инфр}^{сам}$. ВКЛА имеют преимущество перед самолетами при низких значениях пассажиропотока, что характерно именно для таких, значительно удаленных от регионального центра, населенных пунктов. Однако с ростом дальности полета растет преимущество самолета как более экономичного в крейсерском полете. Налицо противоречие между технико-экономическими особенностями различных технических концепций авиационной техники и экономико-географическими особенностями малонаселенных регионов.

Теоретически это противоречие может быть разрешено за счет создания в малонаселенных регионах звездообразной маршрутной сети. Пусть для таких перевозок требуется такая же наземная инфраструктура, что и для эксплуатации скоростных ВКЛА и стоимостные параметры $C_{инфр}^{ВКЛА}$ и $C_{инфр}^{верт}$ равны. При этом стоимость кресло-километра для классических вертолетов $C_{ккм}^{верт}$ может значительно отличаться от аналогичного параметра для скоростных ВКЛА $c_{ккм}^{ВКЛА}$.

1.1 Оптимизация размещения аэропортов

Периферийный аэропорт охватывает n малых населенных пунктов, и суммарный годовой пассажиропоток через него в региональный центр составит

$$(1) q = \rho \cdot R^2 \cdot \gamma = \rho \cdot n \cdot r^2 \cdot \gamma$$

- где r – характерное расстояние между малыми населенными пунктами;
- R – характерное расстояние между периферийными аэропортами;
- ρ – средняя плотность населения в окрестности периферийного аэропорта;
- γ – годовая подвижность населения.

Будем считать, что обслуживаемые населенные пункты расположены равномерно, а расстояние между аэропортами может меняться в зависимости от удаленности от регионального центра. Пусть один аэропорт обслуживает территорию, примерно равную R^2 кв. км. Аналогичный подход используется в простейших моделях авиатранспортных систем в малонаселенных регионах [4,5]. Развоз пассажиров вертолетом выполняется за один вылет с промежуточными посадками, т.к. эксплуатация нескольких таких ВС одновременно на выделенных территориях будет заведомо нерациональна при малых пассажиропотоках. В отличие от самолетов, при большом удалении от регионального центра классические вертолеты проблематично задействовать на других маршрутах. Поэтому даже с учетом того, что их могут использовать для выполнения иных авиационных работ в народном хозяйстве, стоимость летного часа таких ВС будет значительно выше, чем при годовом налете от 500-600 летных часов. Если исходные данные для себестоимости транспортной работы принимаются без учета данного фактора, то необходимо уточнять, что полученные оценки являются оптимистичными. Таким образом, полную стоимость перевозки одного пассажира в региональный центр для рассматриваемой смешанной альтернативы (самолет плюс вертолет) упрощенно можно представить в виде формулы (2):

$$(2) c_{пасс}^{звезд} = c_{ккм}^{сам} \cdot L + c_{ккм}^{верт} \cdot \frac{(n-1) \cdot R}{2\sqrt{n}} + \frac{C_{инфр}^{сам} + (n-1) \cdot C_{инфр}^{верт}}{\rho \cdot R^2 \cdot \gamma}$$

Заметим, что два слагаемых, соответствующих стоимости содержания периферийного аэропорта и стоимости полета на вертолете, зависят от характерного расстояния между периферийными аэропортами R , т.е. от плотности их размещения. Причем, если затраты на содержание аэропорта в цене билета увеличиваются с ростом плотности размещения аэропортов, то стоимость полета на вертолете сокращается, и наоборот. Следовательно, целесообразно оптимизировать плотность размещения периферийных аэропортов, сокращая стоимость перевозки для такой альтернативы. Оптимальное расстояние между аэропортами определяется из условия (3) по формуле (4) (такой подход не учитывает реальную географию поселений, поэтому здесь для простоты считается, что число обслуживаемых малых населенных пунктов n – фиксировано).

$$(3) \frac{d}{dR} c_{пасс}^{звезд} = 0$$

$$(4) R^* = \sqrt[3]{\frac{4\sqrt{n} \cdot (C_{инфр}^{сам} + (n-1) \cdot C_{инфр}^{верт})}{(n-1) \cdot c_{ккм}^{верт} \cdot \rho \cdot \gamma}}$$

В приведенном выше выражении видно, что оптимальное расстояние между аэропортами зависит от показателей плотности и подвижности населения для рассматриваемых территорий. В дальнейшем предполагается, что плотность населения меняется по мере увеличения удаленности L населенного пункта от регионального центра. Тогда минимально достижимая стоимость перевозки пассажира при описанной организации маршрутной сети, которую следует сравнивать со стоимостью перевозки на скоростных ВКЛИА составит:

$$(5) c_{пасс}^{звезд} (L) = c_{ккм}^{сам} \cdot L + c_{ккм}^{верт} \cdot \frac{(n-1) \cdot R^* (L)}{2\sqrt{n}} + \frac{C_{инфр}^{сам} + (n-1) \cdot C_{инфр}^{верт}}{\rho(L) \cdot (R^* (L))^2 \cdot \gamma}$$

1.2 Определение приемлемой вместимости скоростного винтокрылого летательного аппарата

В приведенных формулах для звездообразной транспортной сети предполагалось, что стоимость выполнения транспортной работы ВС задается экзогенно. Но данная величина зависит от вместимости и скорости летательного аппарата, что будет учтено далее.

Определив оптимальную густоту аэропортов, мы можем оценить годовой пассажиропоток $q^* (L)$ через один из них в зависимости от его удаленности от регионального центра. Для перевозки такого числа пассажиров может потребоваться разное количество рейсов при выборе парков летательных аппаратов с отличающейся вместимостью. Однако предоставляемые со стороны авиаперевозчиков транспортные услуги должны быть не ниже определенного уровня качества, которое в первую очередь измеряется временем, проведенным в пути. Важное значение следует уделить не только времени непосредственно самого полета, ведь если рейсы совершаются, например, только один раз в неделю ряд пассажиров будут вынуждены ждать несколько дней, что неприемлемо, даже если рассчитывать на гибкость пользователей транспортных услуг и их возможность подстроиться под такое расписание. Таким образом, время выполнения транспортной операции будет оцениваться с учетом интервала между рейсами.

Установим транспортный стандарт, при котором осуществляется ежедневное авиасообщение между населенными пунктами и региональным центром, причем в каждую сторону. При выполнении среднесрочных и долгосрочных прогнозных оценок принимать менее жесткие ограничения нецелесообразно даже с учетом небольшого вклада малой авиации в общий объем перевозок в стране. В таком случае интервал между выполняемыми рейсами не должен превышать максимальное значение $t_{межр}^{макс} = 24$ часа, а среднее время ожидания между рейсами соответственно будет не более 12 часов. Тогда для звездообразной транспортной сети максимальная вместимость самолета определяется по формуле (6), в которой выбор нижней границы позволяет обеспечить выполнение заданного транспортного стандарта.

$$(6) m^{сам} (L) = \left\lfloor \frac{q^* (L)}{2} \cdot \frac{t_{межр}^{макс}}{365 \cdot 24 \cdot k} \right\rfloor$$

Здесь k - коэффициент заполняемости кресел, его учет повысит потребное количество рейсов в год и, следовательно, увеличит максимальное значение вместимости, которое будет рациональным при заданных условиях.

Полные временные затраты при перевозке пассажиров в звездообразной транспортной сети помимо межрейсового интервала будем рассчитывать с учетом следующих составляющих:

- $t_{пол}$ - время ВС в полете;
- $t_{пост}$ - потери за счет взлетно-посадочных операций;
- $t_{аэр}$ - время пересадки пассажира с подвозящего вертолета на самолет (и наоборот).

Предполагаем, что ожидание подвозящего транспорта не превышает ожидание перевозок на самолете, а наличие периферийного аэропорта в одном из населенных пунктов снижает максимальную вместимость подвозящего транспорта (см. формулу (7)).

$$(7) m^{верт} = \left\lfloor \frac{n-1}{n} \cdot m^{сам} \right\rfloor$$

Вертолет совершит $n - 1$ остановок, что повлияет на общее время пассажиров в пути. Тогда полное время поездки для звездообразной маршрутной сети определяется следующим выражением:

$$(8) t_{\text{пасс}}^{\text{звезд}} = \frac{t_{\text{междр}}(m^{\text{сам}})}{2} + t_{\text{пост}}^{\text{сам}} + \frac{L}{V_{\text{кр}}^{\text{сам}}} + t_{\text{аэр}} + \frac{(n-1)}{2} \cdot t_{\text{пост}}^{\text{верт}} + \frac{(n-1) \cdot R^*(L)}{2\sqrt{n} \cdot V_{\text{кр}}^{\text{верт}}}$$

Для формирования требований к вместимости скоростных ВКЛА предполагается, что общее время поездки на таких летательных аппаратах должно быть меньше, чем в случае звездообразной транспортной сети. Дополнительно отметим, что при равных временных затратах для пассажира будет предпочтительнее транспортировка с помощью скоростных ВКЛА по причине отсутствия пересадок, что также является одним из важных из показателей качества предоставляемых услуг. Максимальная вместимость скоростного ВКЛА определяется формулой (9):

$$(9) m^{\text{ВКЛА}}(L) = \left[\frac{q^*(L)}{365 \cdot 24 \cdot n \cdot k} \left(t_{\text{пасс}}^{\text{звезд}} - t_{\text{пост}}^{\text{ВКЛА}} - \frac{L}{V_{\text{кр}}^{\text{ВКЛА}}} \right) \right]$$

Т.к. скоростной ВКЛА развозит пассажиров напрямую в малые населенные пункты, их вместимость должна быть меньше, чем у самолетов, но дополнительно определим, что она не может опускаться ниже определенного значения $m_{\text{мин}}^{\text{ВКЛА}}$. В противном случае при малых пассажиропотоках оптимальной вместимостью были бы ВС на 1-2 пасс., что нецелесообразно с точки зрения топливной эффективности. При большой дальности полета и стагнации отрасли в технологическом развитии топливная эффективность может быть низкой и при большей пассажироместимости, но вопрос достижимости характеристик не является предметом данной работы. Здесь предлагается установить минимальный порог на уровне 4 пассажиров, полученные значения требований могут быть скорректированы при согласовании с достижимыми значениями характеристик перспективных скоростных ВКЛА.

Если же минимальный порог не выполняется, пусть скоростной ВКЛА осуществляет развоз по всем населенным пунктам, которые охватывает периферийный аэропорт в звездообразной маршрутной сети, объединяя таким образом в себе функции самолета и классического вертолета. В описанном случае в расчете на одного пассажира увеличится среднее время в пути для таких транспортных систем.

$$(10) m^{\text{ВКЛА}}(L) = \left[\frac{q^*(L)}{365 \cdot 24 \cdot k} \cdot \left(t_{\text{пасс}}^{\text{звезд}} - \frac{n+1}{2} \cdot t_{\text{пост}}^{\text{ВКЛА}} - \frac{L}{V_{\text{кр}}^{\text{ВКЛА}}} - \frac{(n-1) \cdot R^*(L)}{2\sqrt{n} \cdot V_{\text{кр}}^{\text{ВКЛА}}} \right) \right]$$

Полученные в разделе зависимости приемлемой вместимости самолетов и вертолетов от дальности в то же время повлияют на требование к себестоимости единицы транспортной работы в звездообразной маршрутной сети и, следовательно, на требования к аналогичному показателю для скоростного ВКЛА.

1.3 Метод формирования требований к стоимости выполнения единицы транспортной работы для скоростного винтокрылого летательного аппарата

Анализ распределения населения по мере удаления от регионального центра в субъектах РФ с труднодоступными и малонаселенными территориями, выполненный в работе [1], позволил построить зависимость плотности населения от расстояния:

$$(11) \rho(L) \approx \frac{a}{L^{2,65}}; \quad a = 1,5 \cdot 10^7$$

Полученные результаты (формула (11)) показывают, что при удаленности от регионального центра более 500 км плотность населения составляет менее 1 чел./кв. км и убывает с ростом дальности быстрее, чем в квадратичной пропорции. Приведенная зависимость будет использоваться в дальнейших расчетах.

Тогда формулу (4) для оптимального расстояния между аэропортами можно переписать в виде:

$$(12) R^*(L) \approx L^{\frac{2,65}{3}} \cdot \sqrt[3]{\frac{4\sqrt{n} \cdot (C_{\text{инфр}}^{\text{сам}} + (n-1) \cdot C_{\text{инфр}}^{\text{верт}})}{(n-1) \cdot c_{\text{ккм}}^{\text{верт}} \cdot a \cdot \gamma}} = L^{60} \cdot b$$

Теперь выпишем выражение, при котором скоростные ВКЛА окажутся предпочтительнее смешанной альтернативы, что позволяет формировать требование к стоимости кресло-километра перевозки скоростного ВКЛА:

$$(13) c_{\text{ккм}}^{\text{ВКЛА}} \cdot \left(L + \frac{(n-1) \cdot R^*(L)}{2\sqrt{n}} \cdot I\{m^{\text{ВКЛА}} < m_{\text{мин}}^{\text{ВКЛА}}\} \right) + \frac{n \cdot C_{\text{инфр}}^{\text{верт}}}{\rho(L) \cdot (R^*(L))^2 \cdot \gamma} < c_{\text{ккм}}^{\text{зезд}}(R^*, L)$$

В левой части неравенства вводится индикаторная функция, соответствующая вариантам организации перевозок из регионального центра с помощью скоростных ВКЛА напрямую в населенные пункты (равна 0) или с развозом в пределах территории с промежуточными посадками (как и для классического вертолета в звездообразной маршрутной сети, но без пересадки в другое транспортное средство), охватываемой периферийным аэропортом (равна 1). Далее, подставив в (13) формулы (5), (11), (12) и выразив стоимость кресло-километра скоростного ВКЛА в итоге получим:

$$(14) c_{\text{ккм}}^{\text{ВКЛА}} < \left(c_{\text{ккм}}^{\text{сам}} + L^{\frac{7}{60}} \cdot \left(c_{\text{ккм}}^{\text{верт}} \cdot \frac{(n-1) \cdot b}{2\sqrt{n}} + \frac{(C_{\text{инфр}}^{\text{сам}} - C_{\text{инфр}}^{\text{верт}})}{a \cdot b^2 \cdot \gamma} \right) \right) \cdot \left(1 + L^{\frac{7}{60}} \cdot \frac{(n-1) \cdot b}{2\sqrt{n}} \cdot I\{m^{\text{ВКЛА}} < m_{\text{мин}}^{\text{ВКЛА}}\} \right)^{-1}$$

В то же время, если известны достижимые значения характеристик скоростного ВКЛА, а именно показателя стоимости единицы транспортной работы, то из последнего выражения видно, что смешанная схема авиатранспортного обслуживания периферийных районов становится предпочтительнее начиная с некоторого порогового расстояния от регионального центра (решая это уравнение, следует учитывать, что значение индикаторной функции зависит от L):

$$(15) L_0 = \left(\left(c_{\text{ккм}}^{\text{верт}} - c_{\text{ккм}}^{\text{ВКЛА}} \cdot I\{m^{\text{ВКЛА}} < m_{\text{мин}}^{\text{ВКЛА}}\} \right) \cdot \frac{(n-1) \cdot b}{2\sqrt{n}} + \frac{(C_{\text{инфр}}^{\text{сам}} - C_{\text{инфр}}^{\text{верт}})}{a \cdot b^2 \cdot \gamma} \right) \cdot \left(c_{\text{ккм}}^{\text{ВКЛА}} - c_{\text{ккм}}^{\text{сам}} \right)^{-1} \right)^{\frac{60}{7}}$$

Вблизи регионального центра при более высокой плотности населения и меньшем расстоянии для ряда населенных пунктов может оказаться целесообразным как использование вертолетов классических схем, так и строительство современной наземной транспортной инфраструктуры (при высоких потоках пассажиров и грузов). Скоростные ВКЛА потенциально могут занять на рынке местных авиаперевозок нишу в промежуточном диапазоне расстояний от регионального центра или, при определенных потоках пассажиров, выиграть конкуренцию у самолетов МВЛ и на самых дальних рейсах внутри рассматриваемых регионов. Поэтому на этапе формирования облика при разработке перспективных концепций летательных аппаратов для оценки перспектив скоростных ВКЛА новых схем можно определять вышеописанный верхний порог и сравнивать его с характерными расстояниями до периферийных районов малонаселенных регионов России.

2 Формирование требований к характеристикам скоростных винтокрылых летательных аппаратов

2.1 Исходные данные для расчетов

Для выполнения модельных расчетов необходимо задать исходные данные, прежде всего, для характеристик самолетов МВЛ и классических вертолетов. Рынок самолетов малой авиации можно разделить на два сегмента по вместимости ВС: до 9 мест и до 19 мест.

Пассажировместимость на 9 мест соответствует максимальной вместимости при разработке самолетов по однодвигательным схемам и обеспечивает допустимый нормами уровень безопасности полетов. Причем ВС таких схем существенно экономичнее двухдвигательных при аналогичной вместимости, поэтому спрос на однодвигательные летательные аппараты на мировых рынках в данном классе вместимости в последние годы близок к 100%.

Применяемый на МВЛ в России самолет L-410 (разработан в Чехословакии, производство локализовано на Уральском заводе гражданской авиации), рассчитанный на перевозку до 19 пассажиров, при нынешних своих характеристиках на расстояние 1000 км сможет перевезти лишь 13 пассажиров при крейсерской скорости до 350 км/ч [6]. При фиксированной средней стоимости летного часа это соответствует 17-20 руб./ккм (с 19 чел. оценивается в 12-14 руб./ккм). Зарубежный самолет Cessna 208B Grand Caravan, рассчитанный на 9 мест, преодолеет (по данным производителя) то же расстояние только с 6 пассажирами на борту. Таким образом, себестоимость кресло-километра перевозки увеличивается с 15-16 руб. (9 пасс.) до 22-25 руб. (6 пасс.).

В рамках работ ФГБУ «НИЦ «Институт имени Н.Е. Жуковского» по формированию облика перспективных самолетов малой авиации показано, что наиболее рациональностью будет максимальная вместимость ВС в данных сегментах [7]. Но в таком случае на линиях с малыми пассажиропотоками, когда самолеты будут частично заполнены и выбранная вместимость окажется избыточной, важным требованием является возможность оперативного переоборудования части салона в грузопассажирский (до 30-40% от общей вместимости). Также предполагается, что перспективные самолеты МВЛ обеспечат:

- увеличение дальности при максимальной загрузке ВС до 1500 км и более (таким образом в рамках модельных расчетов можно не учитывать зависимость грузоподъемности ВС от дальности полета);
- увеличение крейсерской скорости на заданные дальности до 400-450 км/ч, что необходимо для повышения качества услуг по перевозке пассажиров (сокращения длительности).

Тогда при условии сохранения текущей стоимости летного часа относительно современных летательных аппаратов (здесь и далее все стоимостные параметры рассматриваются без учета инфляции) для 9-местного ВС (45000 руб./л.ч.) требование к стоимости кресло-километра составит 12-13 руб./ккм, а для 19-местного самолета (80000 руб./л.ч.) – 9-10 руб./ккм. Считается, что следующее поколение самолетов должно быть на 20% экономичнее современных, полученные оценки для перспективных ВС МВЛ соответствуют данному утверждению. С точки зрения стоимости выполнения транспортной работы 19-местный самолет будет заведомо предпочтительнее 9-местного, однако учет временного ограничения в модели позволит определить области, в которых будет целесообразно использование 9-местного ВС.

В модельных расчетах принимаем, что возможно уменьшение вместимости ВС с 19 до 15 и с 9 до 6 пассажиров с пропорциональным увеличением стоимости кресло-километра перевозки (т.к. рассматриваются именно два приведенных выше типа самолета, но с неполной загрузкой). Если оптимальная пассажировместимость будет от 10 до 14 пассажиров, то при выбранных параметрах использование 9-местного самолета предпочтительнее незаполненного 19-местного по себестоимости выполнения транспортной работы и осуществляется переход (скачок на графике) к менее вместительному ВС.

Для классических вертолетов в качестве опорных рассматриваются характеристики вертолетов АНСАТ и Ка-62 максимальной вместимостью 7 и 15 пассажиров соответственно. Для них из расчета 1700/4300 долл./л.ч. при курсе 60-65 рублей за доллар с учетом сокращения стоимости летного часа на 10% в среднесрочной перспективе примем стоимость выполнения транспортной работы классических вертолетов около 55-60 руб./ккм. Но в зависимости от полученных значений приемлемой вместимости для данных типов летательных аппаратов стоимость кресло-километра перевозки может увеличиваться.

В таблице 1 приведены исходные данные для сравнения двух альтернатив организации транспортного сообщения в малонаселенных регионах и определения требований к характеристикам скоростных ВКЛА. Значения для инфраструктурных расходов приняты на основе данных Министерства транспорта РФ.

Таблица 1. Входные параметры модели

$V_{кр}^{сам}$, км/ч	400	450	$C_{ВПИ}^{пост}$, млн руб.	200
$m^{сам}$, мест	6-9	15-19	$C_{ВПИ}^{обсл}$, млн руб.	5
$c_{л.ч.}^{сам}$, тыс. руб.	45	80	$C_{ВИ}^{пост}$, млн руб.	40
$V_{кр}^{верт}$, км/ч	250	290	$C_{ВИ}^{обсл}$, млн руб.	1
$m^{верт}$, мест	4-7	8-15	T, лет	20
$c_{л.ч.}^{верт}$, тыс. руб.	100	250	$t_{пост}^{сам}$, ч	0,25
$V_{кр}^{ВКЛА}$, км/ч	[450 ; 600]		$t_{пост}^{верт}$, ч	0,15
L, км	[300 ; 1600]		$t_{пост}^{ВКЛА}$, ч	0,2
$m_{мин}^{ВКЛА}$, мест	4		$t_{аэр}$, ч	0,5
n, ед.	3		k, %	80%

Принятый диапазон дальностей объясняется следующими соображениями. На более коротких расстояниях предпочтительнее наземные виды транспорта, о чем свидетельствуют данные на рис. 3. Из 80 аэродромов, удаленных менее, чем на 200 км от регионального центра, только 1-2 используются для регулярных пассажирских перевозок. Верхнюю границу диапазона в расчетах принимаем на уровне максимального расстояния между населенным пунктом и региональным центром в Якутии (около 1620 км).

В работе [1] принято, что подвижность населения линейно возрастает при увеличении расстояния до столицы региона. В рамках выбранного сценария примем функцию подвижности для перспективной авиатранспортной системы местных воздушных линий, приведенную в формуле (16). Данное выражение описывает следующую ситуацию: в среднесрочной перспективе в пределах дальности 600 км наблюдается линейный рост подвижности населения, т.к. в этом диапазоне присутствует конкуренция между наземным и воздушным транспортом, а при больших дальностях воздушный транспорт является безальтернативным, в таком случае значение показателя подвижности будет сравнимо с общемировыми значениями.

$$(16) \gamma = \begin{cases} \frac{L}{400} + 0,5, & \text{при } 300 \geq L \geq 600 \\ 2 & , \text{при } L \geq 600 \end{cases}$$

2.2 Результаты модельных расчетов

На рис. 2. приведен график зависимости оптимального расстояния между аэропортами от удаленности от регионального центра, полученный в результате минимизации полных затрат в расчете на одного пассажира для звездообразной маршрутной сети.

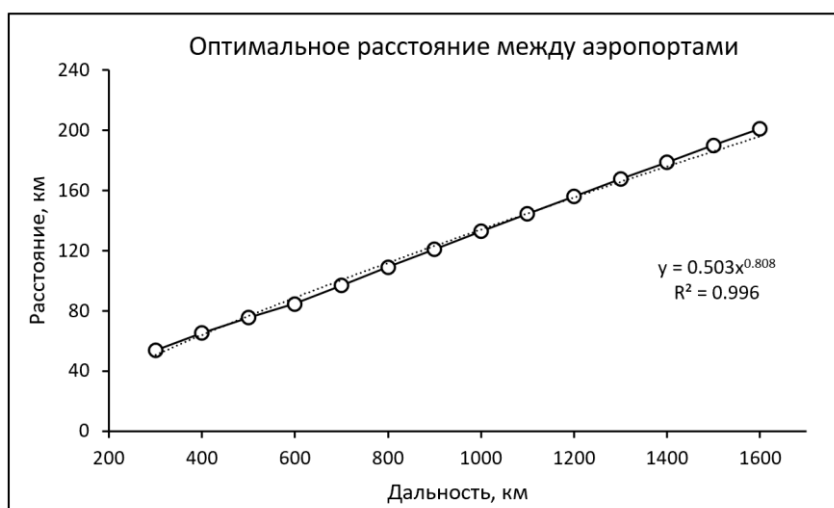


Рис. 2. Оптимизация размещения аэропортов для случая звездообразной маршрутной сети в зависимости от удаленности населенных пунктов от регионального центра

На графике видно, что в расчетном примере с ростом дальности растет охват территории периферийным аэропортом, для принятых диапазонов дальности оптимальное расстояние между ними растет с 50 до 200 км. Линия тренда демонстрирует, что уменьшение подвижности населения в более близких зонах относительно регионального центра (до 600 км) слабо влияет на общие результаты. Показано, что при удалении дополнительно на 100 км целесообразно увеличить радиус охвата аэропорта на 5-6 км (или расстояние между аэропортами на 10-12 км).

Далее оценим годовые потоки пассажиров на основе оптимизированного охвата территорий при размещении аэропортов и сравним полученные результаты с реальными данными пассажиропотоков на местных воздушных линиях (по данным Росавиации). Приведенные ниже столбцы соответствуют среднему количеству пассажиров в 2015 году, обслуживаемых в расчете на один аэропорт в зависимости от его удаленности от регионального центра.

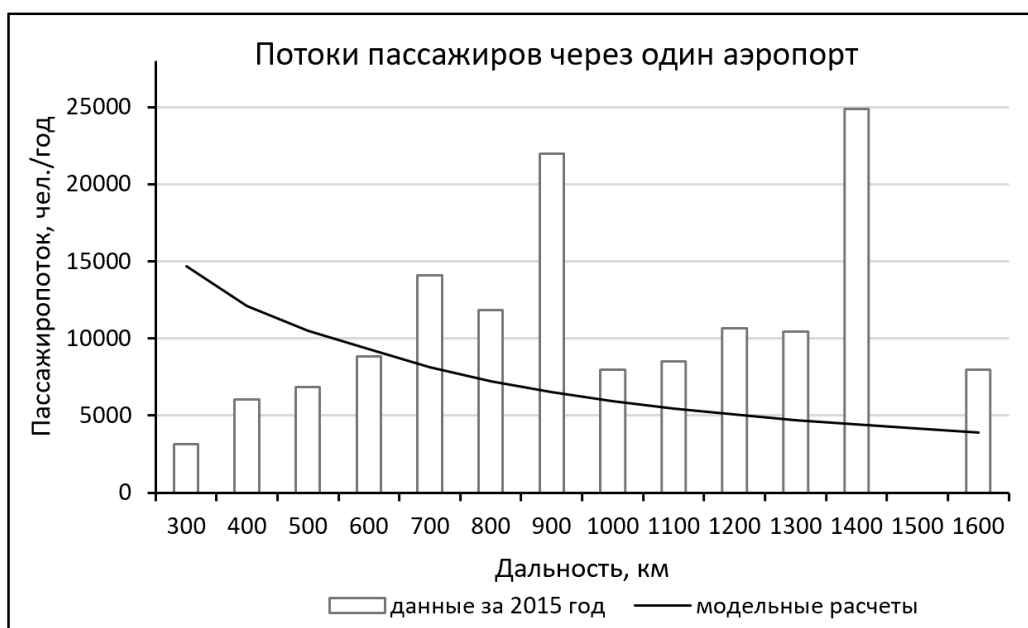


Рис. 3. Распределение пассажиропотоков по удаленности от регионального центра

Полученное на рис. 3 несоответствие графиков с реальными данными связано с рядом факторов. Упрощенная экономико-математическая модель звездообразной сети при принятой зависимости для плотности населения определяют монотонно убывающую с увеличением дальности функцию для потоков пассажиров через один аэропорт даже с учетом двукратного снижения подвижности населения (использования воздушного транспорта) при приближении к региональному центру. В реальности наблюдается сильный спад интенсивности перевозок при дальностях близких к минимальным значениям из рассматриваемого диапазона дальностей. Приведенные графики свидетельствуют о том, что при текущем размещении аэропорты обслуживают более высокие пассажиропотоки. При учете реальной географии населенные пункты на выделенной территории не будут вносить равнозначный вклад в общий пассажиропоток через аэропорт как по причине территориального расположения, так и различной численности населения. Пиковые значения при дальностях до 900 и 1400 км, вероятнее всего, связаны с перевозкой людей для выполнения вахтовых работ, в таком случае могут потребоваться ВС повышенной вместимости, но аэропорты с явно завышенными пассажиропотоками при обработке данных были исключены. Однако предложенный подход не предполагает учета реальных географических особенностей системы расселения и распределения населения по подвижности, и основан на упрощенных моделях географии региона и подвижности его населения. В рамках такого упрощенного представления вполне корректны дальнейшие расчеты на основании функции пассажиропотока, монотонно убывающей с ростом удаления от регионального центра.

На рис. 4 представлены результаты расчетов приемлемой вместимости скоростных ВКЛИА при условии выполнения временного ограничения, когда рейсы осуществляются с регулярностью, соответствующей как минимум ежедневному сообщению между населенным пунктом и региональным центром. Рассмотрено два сценария, при которых крейсерская скорость ВКЛИА равна соответственно 450 км/ч и 600 км/ч.

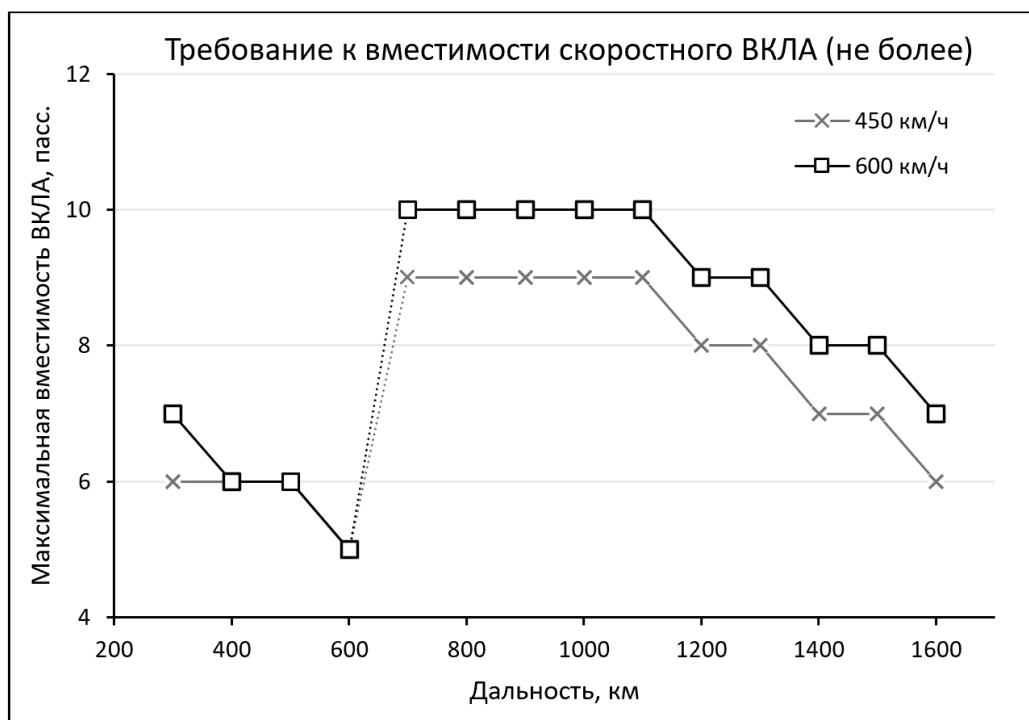


Рис. 4. Приемлемые значения вместимости скоростных ВКЛА в зависимости от дальности полета

Резкое увеличение приемлемого значения вместимости скоростного ВКЛА с 5 до 9-10 мест (скачок в диапазоне дальности от 600 до 700 км, который обозначен пунктирной линией), наблюдаемый на рис. 4, связан с переходом к более легкому типу ВС для звездообразной маршрутной сети (от 19-местного к 9-местному). Снижение общего времени в пути ужесточило требование к вместимости скоростного ВКЛА, оптимальное значение показателя стало ниже допустимого (4 пасс.). Поэтому на графике для дальностей 700 км и более (правая часть графика после скачка) представлен результат перехода от прямого авиасообщения с малыми населенными пунктами к варианту развоза пассажиров с промежуточными остановками. При увеличении расстояния до регионального центра с 700 до 1600 км показатель вместимости снижается с 9-10 до 6-7 мест. Таким образом, при заданных условиях сценарных расчетов для регулярных перевозок с помощью скоростных ВКЛА на всем диапазоне рассмотренных дальностей целесообразно выделить один сегмент вместимости таких ВС (до 10 пасс.), который практически не отличается от вместимости легких самолетов МВЛ.

Влияние скорости ВКЛА на результаты не видится существенным, ее сокращение меняет значение вместимости не более, чем на единицу. Поэтому основным требованием к крейсерской скорости является обеспечение уровня комфорта для пассажиров по времени нахождения непосредственно в полете аналогичного перспективным самолетам МВЛ.

Для конкуренции с самолетами МВЛ дальность скоростного ВКЛА должна обеспечивать возможность эксплуатации на большинстве рейсов, поэтому требование к минимальной вместимости предлагается определять из условий охвата 80-85% маршрутов (между населенными пунктами и столицей региона) и общего пассажиропотока. Согласно реальным данным и результатам модельных расчетов дальность скоростных ВКЛА должна быть не менее 1000 км.

Ниже представлены оценки требуемых характеристик стоимости единицы транспортной работы скоростного ВКЛА в зависимости от дальности полета, при выполнении которых в рамках модели их применение будет эффективнее смешанной альтернативы (звездообразной транспортной сети).



Рис. 5. Требуемые значения стоимости единицы транспортной работы скоростного ВКЛА в зависимости от дальности полета

На графике наблюдается рост приемлемых значений стоимости единицы транспортной работы с 18 до 26 руб./ккм при увеличении расстояния до регионального центра. Причем изменение требований к скоростным ВКЛА вследствие перехода к менее вместительному ВС в звездообразной маршрутной сети между 600 и 700 км явно выделено, как и на рис. 4. Видно, что происходит ужесточение требований с 21 руб./ккм обратно к 18 руб./ккм. Конечно, приведенные прогнозные оценки не стоит считать точными количественными результатами для выбранной характеристики скоростного ВКЛА. Проведенные расчеты с оптимизацией аэродромной сети позволяют при заданных сценарных условиях сузить диапазон приемлемых значений себестоимости кресло-километра перевозки и оценить их относительно характеристик существующих и перспективных самолетов МВЛ и классических вертолетов. Таким образом, с учетом принятых допущений и исходных данных стоимость кресло-километра перевозки с помощью скоростного ВКЛА должна быть в 2,5-3 раза ниже, чем у вертолетов классических схем (55-70 руб./ккм), с другой стороны – может быть в 1,5-2 раза выше, чем у перспективных самолетов МВЛ (9-15 руб./ккм).

Выводы

В работе предложена методика оценки целесообразности применения скоростных ВКЛА для регулярных местных воздушных перевозок в отдаленных труднодоступных и малонаселенных регионах РФ. Построена упрощенная экономико-математическая модель организации звездообразной маршрутной сети с рейсами самолетов до периферийных аэропортов и применением классических вертолетов в качестве подвозящего транспорта. В модели выполнена оптимизация размещения аэропортов по критерию минимальной себестоимости перевозок и добавлен учет временного ограничения, характеризующего определенный уровень качества транспортных услуг. Инструментарий позволяет сформировать требования к основным технико-экономическим характеристикам скоростных ВКЛА, при которых их применение будет эффективнее (дешевле и быстрее) смешанной альтернативы.

В рамках принятых сценарных условий и модельных ограничений получены следующие оценки требований для скоростных ВКЛА.

- дальность полета таких летательных аппаратов при максимальной коммерческой загрузке должна быть не менее 1000 км для охвата 80-85% маршрутов и общего пассажиропотока на рынке местных воздушных перевозок;
- крейсерская скорость ВКЛА не обязательно должна быть 550-600 км/ч, приемлемыми являются значения на уровне перспективных самолетов МВЛ для выполнения заданных транспортных стандартов и аналогичного качества услуг при полете – не менее 400-450 км/ч;

- для проанализированного диапазона расстояний до регионального центра в рассмотренной авиатранспортной системе в основе парка скоростных ВКЛА рационально использование ВС с вместимостью до 10 пассажиров;
- применение скоростных ВКЛА может быть эффективнее альтернативной организации авиасообщения при стоимости кресло-километра перевозки в 1,5-2 раза превышающей аналогичный показатель для перспективных самолетов малой авиации и в 2,5-3 раза ниже, чем у вертолетов классических схем с полезной нагрузкой до 1,5-2,5 тонн.

Применение скоростных ВКЛА, удовлетворяющих сформированному набору характеристик, могут увеличить доступность и качество услуг по перевозке для пассажиров, проживающих в отдаленных от региональных центров населенных пунктах.

В дальнейшем для улучшения предложенной методики и получения более достоверных оценок требований к перспективным летательным аппаратам для авиатранспортных систем, обеспечивающих регулярное местное сообщение, предполагается рассматривать реальную географию и систему расселения и выполнять расчеты с учетом доходов жителей и их авиационной подвижности в зависимости от потенциального уровня государственной поддержки в конкретных регионах.

Литература

1. *Егошин С.Ф.* Оценка структуры полных затрат на пассажирские авиаперевозки в местном сообщении // Научный вестник ГосНИИГА. № 28 (339). 2019. С. 80-92.
2. *Егошин С.Ф., Смирнов А.В.* Авиатранспортная доступность и транспортная дискриминация населения в субъектах Российской Федерации // Научный вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21 № 3. С. 78-90
3. Airbus Helicopters maintains Racer's pace despite delays. Режим доступа. URL: <https://www.flightglobal.com/helicopters/airbus-helicopters-maintains-racers-pace-despite-delays/137838.article> (дата обращения 20.04.20)
4. *Горшкова И.В., Клочков В.В.* Экономические проблемы управления развитием авиатранспортной сети в малонаселенных регионах России // Управление большими системами. №30. 2010 С. 115–134.
5. *Клочков В.В., Рождественская С.М., Фридлянд А.А.* Обоснование приоритетных направлений развития авиационной техники для местных воздушных линий // Научный вестник ГосНИИ ГА. № 20 (331). 2018. С. 93-102.
6. Самолет L-410UVP-E20, основные характеристики: Информационный проспект компании Aircraft Industries, a.s., Na Zahonech 1177, 686 04 Куновице, Чешская республика, 2010.
7. НТО (НИЦ), НИР «Исследования и прогнозирование развития технологий, модельного ряда и обликов самолетов малой авиации» № 17705596339190001090/64-09/2019.