

УДК 630.376:629.733.5

DOI: 10.15393/j2.art.2023.6983

Статья

Методика расчёта экономической эффективности использования аэростатических летательных аппаратов на лесотранспортных операциях

Абузов Александр Викторович

доктор технических наук, профессор, Тихоокеанский государственный университет (Российская Федерация), 006195@pnu.edu.ru

Григорьев Игорь Владиславович

доктор технических наук, профессор, Арктический государственный агротехнологический университет (Российская Федерация), silver73@inboxl.ru

Абузов Ярослав Александрович

студент, Национальный исследовательский университет ИТМО (Российская Федерация), yarusking@mail.ru

Каляшов Виталий Анатольевич

кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (Российская Федерация), vit832@yandex.ru

Григорьева Ольга Ивановна

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова (Российская Федерация), grigoreva_o@list.ru

Получена: 2 апреля 2023 / Принята: 12 мая 2023 / Опубликовано: 16 мая 2023

Аннотация: В статье уделяется внимание проблемам транспортного освоения удалённых, труднодоступных лесных территорий, решение которых особенно актуально в связи со значительным истощением запасов леса в хорошо освоенных эксплуатационных лесных массивах и, возможно, за счёт использования аэростатических летательных аппаратов. Представлена методика расчёта экономической эффективности использования дирижаблей на транспортно-грузовых операциях, которая позволяет определить показатели себестоимости лётного часа с использованием оценки абсолютной и сравнительной эффективности. Особое внимание уделяется срокам окупаемости

полнокомплектного дирижабельного парка с учётом полного «жизненного» цикла летательных аппаратов и наземной инфраструктуры обслуживания. Приведены принципы сравнения эксплуатационных возможностей дирижаблей с другими видами транспорта, где наиболее важным показателем являются затраты на горюче-смазочные материалы, плановые техобслуживания и ремонт корпуса, а также силовых установок. Предложенная методика является базовой для более развёрнутых расчётов под конкретные случаи и условия эксплуатации аэростатических летательных аппаратов с учётом их лётно-технических характеристик. По этой методике также можно сравнивать себестоимости лётного часа разных дирижаблей, а также дирижаблей с самолётами и вертолётами.

Ключевые слова: дирижабли; себестоимость лётного часа; экономическая эффективность; аэростатические летательные аппараты

DOI: 10.15393/j2.art.2023.6983

Article

Methodology for calculating the economic efficiency of aerostatic aircraft in forest transport operations

Alexander Abuzov

*D. Sc. in engineering, professor, Pacific State University (Russian Federation),
006195@pnu.edu.ru*

Igor Grigorev

*D. Sc. in engineering, professor, Arctic State Agrotechnological University
(Russian Federation), silver73@inboxl.ru*

Yaroslav Arbuzov

Student, National Research University ITMO (Russian Federation), yarusking@mail.ru

Vitalij Kalyashov

*Ph. D. in engineering, associate professor, Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering (Russian Federation), vit832@yandex.ru*

Olga Grigoreva

*Ph. D. in agriculture, associate professor, St. Petersburg State Forest
Engineering University named after S. M. Kirov (Russian Federation), grigoreva_o@list.ru*

Received: 2 April 2023 / Accepted: 12 May 2023 / Published: 16 May 2023

Abstract: The article deals with the problems of transportation development in remote hard-to-reach forest areas; their solution is especially relevant due to the significant depletion of forest reserves in well-developed operational forests. These problems could be solved by aerostatic aircraft exploitation. The author suggests a methodology for calculating the economic efficiency of airships utilization in transportation and cargo operations, which allows determining the cost of a flight hour by assessing absolute and relative efficiency. Particular attention is paid to the payback period of a complete airship fleet exploitation taking into account the full lifecycle of aircraft and ground service infrastructure. The principles of comparing the operational capabilities of airships with other modes of transport are given, the most important indicators being the costs of fuel and lubricants, scheduled maintenance, hull repair and propelling plants. The proposed methodology is the basis for more detailed calculations for specific cases and operating conditions of aerostatic aircraft, taking into account their flight

characteristics. According to this method, it is also possible to compare the cost of flight hours of different airships against those of airplanes and helicopters.

Keywords: airships; cost of flight hours; economic efficiency; aerostatic aircraft

1. Введение

Транспортная составляющая является базовым критерием, оказывающим одно из ключевых влияний на эффективность, а чаще и на целесообразность освоения труднодоступных лесных территорий [1]. В условиях горной местности со сложным мозаичным рельефом трудоёмкость и объём строительно-дорожных и лесотранспортных работ с использованием наземного транспорта часто становятся экономически не выгодны, что приводит к сдерживанию по освоению расчётной лесосеки и, как следствие, к снижению общей рентабельности лесопромышленного комплекса [2].

Весьма важным моментом освоения лесов на склонах являются экологические последствия воздействия движителей машин на почвогрунты, поскольку леса на склонах относятся к особо ранимым в экологическом плане [3—5]. Кроме этого, при работе на склонах возникают дополнительные и весьма существенные опасности для персонала [6—8]. Также отдельную проблему составляет строительство дорожной сети в рассматриваемых условиях [9], [10].

Проведя анализ ряда научно-исследовательских и прикладных работ, а также отчётов проводимых экспериментов в области новых видов грузового транспорта для лесного комплекса, можно констатировать, что комплексными технологиями, способными совмещать как транспортировку заготовленного леса, рабочий персонал, лесозаготовительную технику, а также выполнять контроль и мониторинг удалённых лесных территорий, могут являться аэростатические летательные аппараты, в частности, грузовые и гибридные дирижабли.

Аэростатический принцип создания подъёмной силы имеет ряд неоспоримых и важнейших достоинств. Этот вид воздушного транспорта обладает целым комплексом присущих только ему свойств, которые обеспечивают большую грузоподъёмность, дальность и продолжительность полёта, вертикальный взлёт и посадку, возможность транспортировки неделимых крупногабаритных грузов, монтажных работ в режиме длительного зависания, безопасность эксплуатации при отказе силовой установки или системы управления, относительно малые расходы топлива, незначительное воздействие на окружающую среду. Однако в силу не масштабного, а лишь экспериментального использования данного вида транспорта на грузовых операциях требуется более детальное исследование его экономических показателей [11—13].

2. Постановка проблемы

Экономическая эффективность любого вида транспорта имеет два принципиальных аспекта: стоимость самого транспортного средства, которая включает себестоимость выполняемых работ по созданию и эксплуатации изделия, и также экономический эффект, получаемый или предполагаемый получить в ближайшей перспективе от применения данного вида транспорта [14]. Ряд исследований, как теоретических, так

и экспериментально-прикладных, доказывают, что аэростатические летательные аппараты могут быть эффективным транспортным средством как по одному, так и по второму аспекту эффективности (рисунок 1).

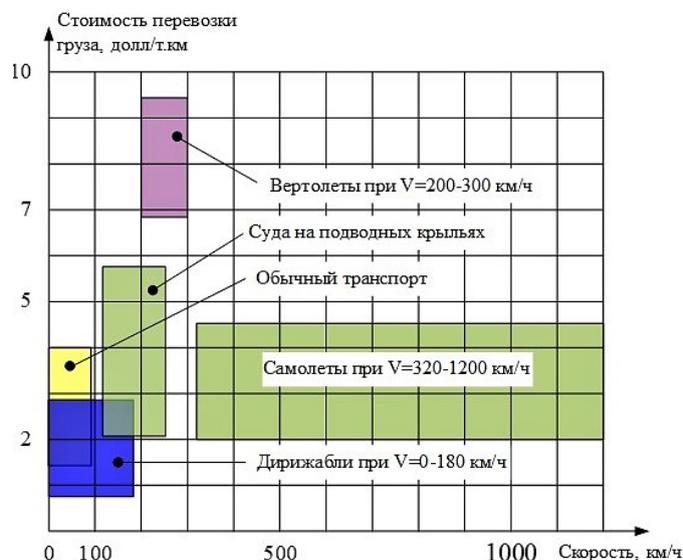


Рисунок 1. Зависимость стоимости перевозки груза от скорости передвижения различных видов транспорта

Figure 1. The dependence of cargo transportation cost on the speed of movement of various types of transport

У грузовых дирижаблей нового поколения значительно снижается себестоимость эксплуатации, поскольку их жёсткая оболочка в сочетании с правильной аэродинамической формой позволяет осуществлять стоянки без защитных эллингов, непосредственно под открытым небом [15]. Специально разработанный метод скоростного амортизированного причаливания с последующей автоматической швартовкой на поворотную площадку причального сооружения позволяет исключить сложный и трудоёмкий процесс швартовки с участием многочисленной наземной команды.

Однако самым важным аспектом, влияющим на себестоимость эксплуатации, конечно, являются лётно-технические характеристики современного дирижабля, сочетание которых позволит в будущем достичь максимального экономического эффекта.

К основным лётно-техническим характеристикам аэростатических летательных аппаратов можно отнести [16]:

- весовые характеристики (взлётный вес, весовая отдача, полезная нагрузка, коммерческая загрузка и др.);
- скоростные характеристики (максимальная и крейсерская скорости полёта);
- мощностные характеристики (потребная и максимальная мощность);

- дальность и продолжительность полёта (автономия дирижабля — время полёта дирижабля без посадки и без возобновления запасов топлива);
- геометрические размеры дирижабля (длина, максимальный диаметр-мидель, удлинение корпуса, коэффициент полноты и др.);
- эксплуатационная перегрузка.

Отечественные исследования показали, что годовая производительность дирижаблей выше, чем аналогичных по грузоподъёмности вертолётов, начиная с 5 т. Значения приведённых затрат при использовании дирижабля при одинаковой дальности полёта по сравнению с вертолётом практически в 2 раза меньше (рисунок 2).

Можно отметить, что аэростатические летательные аппараты имеют значительно бóльшую, по сравнению со всеми воздушными транспортными средствами, удельную грузоподъёмность (отношение веса перевозимого ими груза к его полётному весу). В этом смысле грузовой дирижабль уступает только аэростатно-канатным системам, однако они имеют ограниченную область применения, с точки зрения разового транспортного охвата лесной территории. Также современные дирижабли обладают высокой экономичностью по такому важному критерию, как транспортная производительность, — это произведение веса перевозимого груза на дальность транспортировки — и имеют значительно более низкую, чем вертолёты, стоимость конструкции на единицу транспортной производительности за счёт большой грузоподъёмности и сравнительно малого расхода топлива [19].

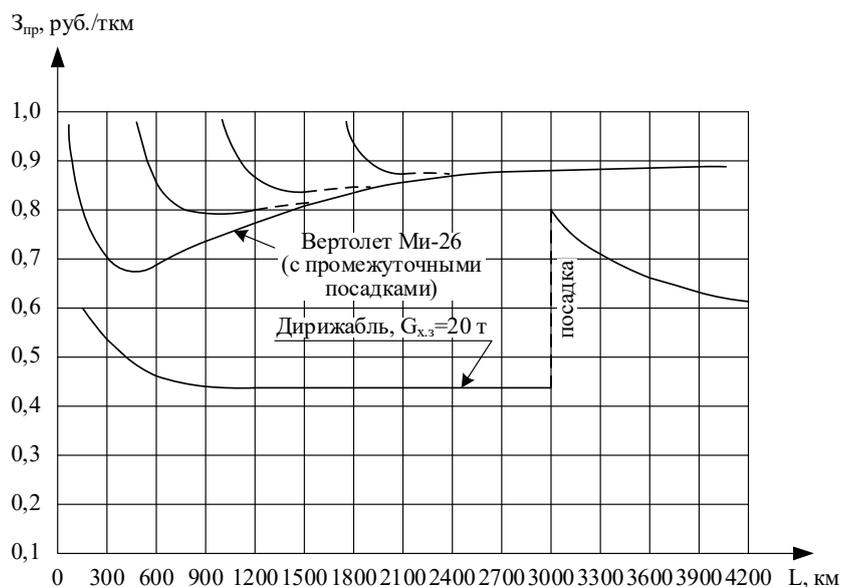


Рисунок 2. Сравнение значений приведённых затрат в зависимости от расстояния транспортировки для дирижабля (грузоподъёмность 20 т) и вертолёта Ми-26

Figure 2. Comparison of reduced expenditures values depending on the transportation distance for an airship (carrying capacity 20 tons) and a Mi-26 helicopter

Приведём критерии оценки экономической эффективности дирижаблей.

Первым этапом требуется дать оценку эффективности капиталовложения, которая подразделяется на абсолютную и сравнительную экономическую эффективность [17], [18].

Оценка абсолютной экономической эффективности проводится с целью определения общего эффекта от внедрения и применения нового оборудования в технологическом процессе, основным критерием которой является срок окупаемости полных капитальных вложений:

$$T_{ок} = \frac{K}{\Pi} \leq T_{н}, \quad (1)$$

где K — полные капитальные вложения на создание дирижабельного парка, Π — среднегодовая прибыль от эксплуатации дирижаблей в расчётный период времени, $T_{н}$ — нормативный срок окупаемости капитальных вложений (в соответствии с межотраслевой $T_{н} = 8$ лет).

Срок окупаемости полных капитальных вложений парка грузовых дирижаблей для вывозки древесины обычно сопоставляется с нормативным. В том случае, если $T_{ок} \leq T_{н}$, то тогда создание и применение грузовых дирижаблей на лесозаготовках экономически оправдано. В противном же случае это нецелесообразно.

Полные капитальные вложения на создание грузовых дирижаблей включают прямые K_0 и сопряжённые капитальные вложения:

$$K = K_0 + \sum_{i=1}^n N_{д1} A_{ij} K_{уді}, \quad (2)$$

где K_0 — капиталовложения на нулевой стадии «жизненного цикла», A_{ij} — коэффициент полных затрат, сопряжённых со строительством дирижаблей i -й отрасли производственных направлений (авиация), $K_{уді}$ — удельные капитальные вложения в сопряжённые отрасли, руб./ед. продукции; $N_{д1}$ — величина расчётного парка дирижаблей по каждому j -му типу дирижабля.

Учитывая фактор разновременности осуществления капитальных вложений, их величину необходимо привести к единому расчётному моменту времени с помощью коэффициента дисконтирования (приведения затрат во времени) $B_{пр}$:

$$B_{пр} = (1 + E_{нн})^{\Delta t}, \quad (3)$$

где $E_{нн}$ — норма дисконтирования (норматив для приведения разновременных затрат), $E_{нн} = 0,08$; Δt — время приведения затрат на i -й стадии:

$$\Delta t = \tau - \tau_0;$$

τ — текущее время вложения средств, τ_0 — момент приведения;

$$K_0 = \sum_{t_2^k}^{t_3^k} \sum_{t_2^k}^{t_3^k} K_{0't_2} (1 + E_{\text{нп}})^{t_3 - t_2} \cdot \frac{Q_{t_3}}{Q_{T_3}}, \quad (4)$$

где t_2 — календарный год осуществления капиталовложений; t_3 — календарный год получения эффекта от эксплуатации; N , K соответственно означают начало и конец капитального вложения; Q_{t_3} — объём работ в t_3 -й год эксплуатации, Q_{T_3} — объём работ за весь цикл эксплуатации T_3 ; $K_{0'}$ — капиталовложения на нулевой стадии «жизненного цикла»: НИИ, ОКБ, производство, ...; $K_{0't_2}$ — капиталовложения в t_2 только t_2 год на стадии $0'$.

В общем случае размер прибыли

$$\Pi = \Pi - C, \quad (5)$$

где Π — цена годового объёма перевозок (по действующим тарифам для воздушного транспорта), C — себестоимость годового объёма перевозок;

$$\Pi = SQ, \quad (6)$$

где S — тариф перевозки единицы груза, Q — годовой объём работ.

$$C = C_{1\tau} H_{\text{год}} N, \quad (7)$$

где $C_{1\tau}$ — себестоимость лётного часа, $H_{\text{год}}$ — потребный годовой налёт, $ч$, N — размер парка грузовых дирижаблей.

Учитывая неравноценность эффекта, получаемого от эксплуатации дирижаблей в разное время, величина прибыли также должна быть скорректирована на коэффициент приведения:

$$B_{\text{пр}} = (1 + E_{\text{нп}})^{\Delta t}. \quad (8)$$

С учётом разновременности получения доходов получим:

$$\Pi = \frac{SQ - C_{1\tau} H_{\text{год}} N}{(1 + E_{\text{нп}})^{t_3 - t_2}} \quad (9)$$

Окончательная формула срока окупаемости будет иметь вид:

$$T_{\text{ок}} = \frac{\sum_{t_2^k}^{t_3^k} K_{t_2} (1 + E_{\text{нп}})^{t_3 - t_2} \frac{Q_{t_2}}{Q_{T_3}}}{\sum_{t_2^k}^{t_3^k} \frac{SQ - C_{1\tau} H_{\text{год}} N}{(1 + E_{\text{нп}})^{t_3 - t_2}}} \quad (10)$$

Сравнительную эффективность будем оценивать при сопоставлении дирижабля с другими видами транспорта.

При выборе наилучшего варианта типа дирижабля и при сравнении его с конкурирующими видами лесного транспорта наиболее эффективным считается тот,

который характеризуется минимальными приведёнными издержками при выполнении заданного объёма работ.

Критерием сравнительной экономической эффективности является стоимость транспортной операции \bar{C} :

$$\bar{C} = C + E_n K \rightarrow \min, \quad (11)$$

где C — себестоимость транспортной операции дирижабля за один цикл эксплуатации, руб./год; E_n — нормативный коэффициент сравнительной экономической эффективности; K — капиталовложения, руб.

В соответствии с типовой методикой определения экономической эффективности капитальных вложений величина E_n в целом по народному хозяйству устанавливается на уровне не ниже 0,12, т. е. [16]:

$$E_n = 0,12.$$

3. Результаты

За наиболее эффективный принимается вариант, при котором транспортные операции выполняются с наименьшей величиной затрат.

Расчёт абсолютной и сравнительной экономической эффективности проводится при учёте ряда операционных, проектных и экономических показателей, находящихся в области допустимых значений (дисциплинирующие условия).

В соответствии с существующей практикой учёта эксплуатационных расходов по каждому типу летательных аппаратов при расчёте лётного часа дирижабля учитываются затраты на ГСМ, газ-носитель, зарплату лётно-подъёмного состава, амортизационные отчисления, техобслуживание, прочие прямые и косвенные расходы.

Принятая группировка эксплуатационных затрат позволяет при экономической оценке различных типов дирижаблей учесть их специфические отличия от лётно-технических характеристик, условий производства и эксплуатации. Кроме того, такая группировка эксплуатационных расходов обеспечивает возможность выполнения сравнительной оценки дирижабля с конкурирующими летательными аппаратами [16].

Из опыта эксплуатации летательных аппаратов с газотурбинными турбовинтовыми двигателями установлено, что часовые затраты на ГСМ для турбовинтовых двигателей при $v_{кр} < 600$ км/ч могут определяться по уравнению

$$C_{ГСМ} = 13,18 (v_{кр} G_0)^{0,72} L^{-0,07}, \quad (12)$$

где $v_{кр} G_0$ — техническая производительность, тыс.ткм/ч; G_0 — взлётный вес, т; L — предельная дальность беспосадочного полёта при максимальной коммерческой нагрузке ($G_{комм}^{max}$), км.

Наиболее чувствительной шкалой затрат является часовой расход несущего газа (гелия), который можно определить по формуле

$$C_{\text{газ}} = \frac{C_r}{\tau^r} = \frac{V_6 C_{1r} K_p^r}{\tau^r \cdot 100} \quad (13)$$

где C_r — стоимость одного объёма газа-наполнителя, руб.; V_6 — объём баллонов, м³; C_{1r} — стоимость 1 м³ газа; K_p^r — годовой расход гелия, процент от объёма; τ^r — годовой налёт, ч.

Амортизационные отчисления необходимы для компенсации следующих издержек при эксплуатации:

- реновация планера с готовыми изделиями и двигателями;
- затраты на капремонты оболочки и кабины пилотов с входящими готовыми изделиями и двигателями;
- величина реновации на один лётный час определяется как отношение оптовой цены за вычетом остаточной стоимости к амортизационному ресурсу дирижабля (двигателя) согласно уравнению

$$C^p = C^{pд} + C^{pдв} = \frac{C_d(1 - 0,05) + C_{бч}(1 - 0,05) \left(\frac{t_d}{t_{бч}}\right)}{\tau_d} + \frac{C_{дв}(1 - 0,04)}{\tau_{дв}} m_{дв}, \quad (14)$$

где $C^{pд}$ — часовые затраты на реновацию планера с оборудованием, руб.; $C^{pдв}$ — часовые затраты на реновацию двигателей, руб.; C_d — оптовая цена дирижабля без баллонной части, руб.; $C_{бч}$ — оптовая цена баллонной части, руб.; t_d — календарный срок службы дирижабля, лет; $t_{бч}$ — календарный срок службы баллонной части, лет; τ_d — амортизационный ресурс планера дирижабля, ч; $\tau_{дв}$ — амортизационный ресурс двигателей, ч; $m_{дв}$ — количество двигателей, шт.

На основании данных ФГУП ГосНИИГА методом регрессивного анализа были получены следующие закономерности изменения оптовой цены планера и двигателя. Оптовая цена корпуса дирижабля без газа:

$$C_{дп} = 1,486 \cdot N_n^{д-0,33} V_{бч}^{0,04} G_n^{0,373}, \quad (15)$$

Оптовая цена корпуса дирижабля с газом:

$$C_d = 0,7577 \cdot N_n^{д-0,2587} V_{бч}^{-0,23} G_{взл}^{0,267}. \quad (16)$$

Оптовая цена двигателей:

$$C_{дв} = 30 N_{\text{max}}^{1,04} N_n^{дв-0,15} (1 + 4 n_{\text{оп}}^{дв0,65} N_n^{дв-0,85}), \quad (17)$$

где G_n — вес пустого дирижабля, т; $G_{взл}$ — взлётный вес, т; $N_n^д, N_n^{дв}$ — размер парка дирижаблей и двигателей шт.; N_{max} — максимальная мощность двигателя, э. л. с.; $n_{\text{оп}}^{дв}$ — размер опытной партии двигателей, шт. (30 + 150 шт.).

Отчисления на капремонты, приходящиеся на 1 л. с.:

$$C^{кр} = C^{крд} + C^{крдв} = \frac{C_d K_{кр}^д n_{кр}^д}{\tau_d} + \frac{C_{дв} K_{кр}^{дв} n_{кр}^{дв}}{\tau_{дв}} m_{дв} \quad (18)$$

где $C^{крд}$ — затраты на капремонт дирижабля, приходящиеся на один лётный час;
 $C^{крдв}$ — затраты на капремонт двигателя, приходящиеся на один лётный час;
 $C_d, C_{дв}$ — оптовая цена дирижабля и двигателя; $n_{кр}^д, n_{кр}^{дв}$ — число капремонтов дирижабля и двигателей за амортизационный ресурс; $\tau_d, \tau_{дв}$ — амортизационный ресурс дирижабля и двигателя; $K_{кр}^д, K_{кр}^{дв}$ — норма амортизации на капремонт дирижабля и двигателей;
 $m_{дв}$ — число двигателей.

Произведение оптовой цены на норму амортизации представляет собой стоимость одного капремонта.

Количество капремонтов за всё время эксплуатации определим по формулам:

$$n_{кр}^д = \frac{\tau_d}{\tau_{кр}^д} - 1, \quad n_{кр}^{дв} = \frac{\tau_{дв}}{\tau_{кр}^{дв}} - 1, \quad (19)$$

где $\tau_{кр}^д, \tau_{кр}^{дв}$ — межремонтный ресурс дирижабля и двигателя.

Затраты на техобслуживание — это затраты на материалы, запчасти и зарплату технического состава. Так как состав работ и длительность межрегламентных циклов техобслуживания дирижабля не известны, величина затрат на один лётный час определяется коэффициентом $K_{то}$ от часовых затрат на капремонт $C^{кр}$:

$$C^{то} = C^{кр} K_{то}. \quad (20)$$

Обработка статистических материалов показала, что:

$$K_{то} = 0,4 \div 1,2.$$

Зарплата лётно-подъёмного состава состоит из должностного оклада плюс надбавки за классность, почасовой и километровой оплаты, премий и отпускных. Зарплата командно-лётного состава обычно учитывается в размере 20 % от зарплаты командира. Размер зарплаты, приходящейся на один лётный час, определяется исходя из общего месячного фонда зарплаты ($\Phi_{общ}$), месячной нормы налёта часов на экипажи ($\tau_{мес}$) и потребного количества экипажей на один рейс ($n_{эк}$):

$$C^{зпл} = \frac{\Phi_{общ}}{\tau_{мес}} n_{эк}. \quad (21)$$

Рассчитывается показатель $n_{эк}$, исходя из продолжительности рейса t_p и допустимой нормы налёта часов одним экипажем за рейс, который принимается равным 6 ч:

$$n_{эк} = \frac{t_p}{6},$$

$$n_{эк} = 1,2,3.$$

К прочим прямым расходам относятся затраты по непроизводственному налёту часов. Их размер в среднем равен 5 % от вышеперечисленных статей прямых расходов:

$$C_{\text{пр}} = (C^{\text{рсм}} + C^{\text{нап}} + C^{\text{р}} + C^{\text{кр}} + C^{\text{то}} + C^{\text{зпл}}) \cdot 0,05. \quad (22)$$

Как и у любого летательного аппарата, у грузовых дирижаблей требуется учитывать расходы наземного обслуживания или аэродромные. В данном случае учитываются затраты по амортизации, текущему ремонту и обслуживанию наземного комплекса, включая ремонтные заводы. Расчёт аэродромных расходов на один лётный час составляет:

$$C_{\text{дп}} = \left(\frac{C_{\text{дп}}^{\Sigma}}{t_{\text{дп}}} + C_{\text{дп}}^{\text{гэп}} \right) \frac{q^{\text{д}}}{Q_n^{\text{г}}}, \quad (23)$$

где $C_{\text{дп}}^{\Sigma}$ — стоимость наземного комплекса, руб.; $t_{\text{дп}}$ — календарный срок службы наземного комплекса, лет; $C_{\text{дп}}^{\text{гэп}}$ — годовые эксплуатационные расходы наземного комплекса, включая затраты на НИР, руб.; $Q_n^{\text{г}}$ — заданный годовой объём перевозок, т·км; $q^{\text{д}}$ — часовая производительность дирижабля, т·км.

Полученные результаты расчёта по статьям калькуляции позволяют путём их суммирования определить себестоимость одного лётного часа C .

При расчёте себестоимости 1 т·км необходимо значение C разделить на часовую производительность $q^{\text{д}}$, которая определяется из уравнения

$$q^{\text{д}} = G_{\text{комм}}^{\text{макс}} K_3 v_p, \quad (24)$$

где K_3 — коэффициент использования коммерческой нагрузки ($G_{\text{комм}}^{\text{макс}}$).

Рейсовая скорость

$$v_p = V_{\text{кр}} \frac{L_{\text{бесп}}}{L_{\text{бесп}} + \Delta t V_{\text{кр}}}; \quad (25)$$

где $L_{\text{бесп}}$ — расстояние беспосадочного полёта.

Потери времени на эволюционных участках составят:

$$\Delta t = 0,2 \div 0,4.$$

Величина $C_{\text{ткм}}^{\text{д}}$ рассчитывается для $L_{\text{бесп}} = L_{\text{бесп}}^{\text{макс}}$ при $G_{\text{комм}}^{\text{макс}}$.

4. Выводы

Данная методика позволяет, в зависимости от себестоимости лётного часа, потребного годового налёта часов на один дирижабль, размера парка дирижаблей, капитальных вложений в t -й год на i -й стадии, объёма работ за весь цикл эксплуатации и объёма работ в t -й год эксплуатации, определить срок окупаемости капиталовложений через показатели абсолютной эффективности и минимум приведённых затрат через сравнительную эффективность. По этой методике также можно сравнивать себестоимости лётного часа разных дирижаблей, а также дирижаблей с самолётами и вертолётами.

Благодарности

Авторы благодарят кандидата технических наук Бойко Юрия Степановича, кандидата технических наук Щербакова Юрия Викторовича и Русское Воздухоплавательное Общество за оказанные консультации при подготовке научного материала для данной статьи. Авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета. Часть материалов исследования получена за счёт гранта Российского научного фонда № 22-26-00009, <https://rscf.ru/project/22-26-00009/>.

Список литературы

1. Электроусилитель рулевого управления колёсного транспортного средства для горных лесов / В. А. Каляшов, В. А. Макуев, С. И. Ревяко [и др.] // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2022. № 11. С. 8—15.
2. Современные системы машин и технологии заготовки древесины и лесовосстановления в условиях горных лесосек / В. А. Каляшов, А. До Туан, Е. Г. Хитров [и др.] // Resources and Technology. 2022. Т. 19, № 2. С. 1—47.
3. Каляшов В. А., Куницкая О. А., Григорьева О. И. Современные технологии и системы машин для заготовки древесины на склонах // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: Материалы 86-й научно-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с междунар. участием). Минск, 2022. С. 46—49.
4. Моделирование процесса образования колеи в массиве оттаивающего почвогрунта на склонах при динамическом взаимодействии с колёсной лесной машиной / В. А. Каляшов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 1 (53). С. 154—162.
5. Никифоров О. А., Куницкая О. А. Пути совершенствования схем лесной сертификации в области оценки экологического воздействия // Вестник АГАТУ. 2022. № 3 (7). С. 55—69.
6. Скобцов И. Г., Куницкая О. А. Разработка устройств дополнительной защиты оператора лесной машины // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2023. № 1. С. 8—24.
7. Скобцов И. Г., Куницкая О. А. Требования стандартов по безопасности при работе на лесных машинах // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2022. № 1. С. 51—56.
8. Скобцов И. Г., Куницкая О. А. Обзор конструктивных решений защитных устройств кабин лесных машин // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2022. № 1. С. 60—69.
9. Зорин М. В., Куницкая О. А. Инновационные методы строительства лесных дорог // Инновации в химико-лесном комплексе: тенденции и перспективы развития: Материалы Всерос. научно-практич. конф. / Отв. ред.: Ю. А. Безруких, Е. В. Мельникова. Красноярск, 2022. С. 84—87.

10. Зорин М. В., Куницкая О. А. Современные сборно-разборные покрытия для строительства временных лесных дорог и технологических коридоров // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: Материалы 86-й научно-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с междунар. участием). Минск, 2022. С. 54—57.
11. Абузов А. В. Возможность применения аэростатических летательных аппаратов в лесохозяйственной сфере // Философия современного природопользования в бассейне реки Амур = アムール川流域における現代の森林利用の原理: Материалы VIII междунар. научно-практич. конф. (Хабаровск, 30 апреля 2019 г.) / Отв. ред. П. Б. Рябухин. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2019. Вып. 8. С. 72—75.
12. Абузов А. В., Рябухин П. Б. Транспортное освоение труднодоступных лесных территорий с применением летательных аппаратов: Учеб. пособие / ФГБОУ ВО «ТОГУ». Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2020. 115 с.
13. Отчёт о научно-исследовательской работе «Исследование возможностей использования летательных аппаратов на лесозаготовках в горных условиях»: В 2 ч. Химки: ЦНИИМЭ, 1985. 189 с.
14. Куницкая О. А., Просужих А. А., Каляшов В. А. Эколого-экономическая эффективность эксплуатации форвардеров // Вестник АГАТУ. 2021. № 2 (2). С. 44—53.
15. Абузов А. В., Григорьев И. В., Абузов Я. А. К вопросу аэродинамики корпусов транспортно-грузовых дирижаблей, проектируемых для лесного комплекса // Лесотехнический журнал. 2022. Т. 12. № 1 (45). С. 68—81.
16. Козловский В. Б., Худоленко О. В., Деревянко В. С. Аэростатические летательные аппараты для отраслей экономики. М.: Воздушный транспорт, 2007. 480 с.
17. Бойко Ю. С. Воздухоплавание: Привязное. Свободное. Управляемое. М.: МГУП, 2001. 462 с.
18. Провести исследование целесообразности создания и применения нетрадиционных летательных аппаратов в народном хозяйстве СССР: Отчёт о НИР / Руководители: Козловский В. Б., Худоленко О. В.; Отв. исполнитель Деревянко В. С. Краснодар: НПО ПАНХ ГА, 1990. 245 с.
19. Daniel Y. Guimier, Vern G. Wellburn Logging with heavy-lift airships // FERIC, Technical Report. 1984. No. TR-58 (May). 115 p.

References

1. Kalyashov V. A., Makuyev V. A., Revyako S. I., Grigorev I. V., Burmistrov V. A. Electric power steering of a wheeled vehicle for mountain forests. *Repair. Recovery. Modernization*, 2022, no. 11, pp. 8—15. (In Russ.)
2. Kalyashov V. A., A. Do Tuan, Khitrov E. G., Grigoreva O. I., Guryev A. Yu., Novgorodov D. V. Modern systems of machines and technologies of wood harvesting and reforestation in conditions of mountain cutting areas. *Resources and Technology*, 2022, vol. 19, no. 2, pp. 1—47. (In Russ.)
3. Kalyashov V. A., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I. Modern technologies and systems of machines for harvesting wood on slopes. *Forest engineering, materials science and design. materials of the 86th scientific and Technical conference of the teaching staff, researchers and postgraduates (with international participation)*. Minsk, 2022, pp. 46—49. (In Russ.)
4. Kalyashov V. A., Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I. Modeling of the process of track formation in an array of thawing soil on slopes with dynamic interaction

- with a wheeled forest machine. *The system. Methods. Technologies*, 2022, no. 1 (53), pp. 154—162. (In Russ.)
5. Nikiforov O. A., Kunitskaya O. A. Ways to improve forest certification schemes in the field of environmental impact assessment. *Herald of AGATHU*, 2022, no. 3 (7), pp. 55—69. (In Russ.)
 6. Skobtsov I. G., Kunitskaya O. A. Development of additional protection devices for the operator of a forest machine. *Occupational safety and health in logging and woodworking industries*, 2023, no. 1, pp. 8—24. (In Russ.)
 7. Skobtsov I. G., Kunitskaya O. A. Requirements of safety standards when working on forest machines. *Occupational safety and health in logging and woodworking industries*, 2022, no. 1, pp. 51—56. (In Russ.)
 8. Skobtsov I. G., Kunitskaya O. A. Review of design solutions of protective devices of cabins of forest machines. *Occupational safety and health in logging and woodworking industries*, 2022, no. 1, pp. 60—69. (In Russ.)
 9. Zorin M. V., Kunitskaya O. A. Innovative methods of construction of forest roads. *Innovations in the chemical and forestry complex: trends and prospects of development. Materials of the All-Russian Scientific and practical conference*. Ed. Yu. A. Bezrukikh, E. V. Melnikova. Krasnoyarsk, 2022, pp. 84—87. (In Russ.)
 10. Zorin M. V., Kunitskaya O. A. Modern collapsible coatings for the construction of temporary forest roads and technological corridors. *Forest engineering, materials science and design. materials of the 86th scientific and Technical conference of the teaching staff, researchers and postgraduates (with international participation)*. Minsk, 2022, pp. 54—57. (In Russ.)
 11. Abuzov A. V. The possibility of using aerostatic aircraft in the forestry sector. *Philosophy of modern nature management in the Amur River basin = アムール川流域における現代の森林利用の原理: Materials of the VIII International Scientific and Practical Conference (Khabarovsk, April 30, 2019)*. Ed. P. B. Ryabukhin. Khabarovsk, Publishing House of the Pacific State University, 2019, is. 8, pp. 72—75. (In Russ.)
 12. Abuzov A. V., Ryabukhin P. B. *Transport development of hard-to-reach forest territories with the use of aircraft: a textbook*. FGBOU VO «TOGU». Khabarovsk, TOGU Publishing House, 2020. 115 p. (In Russ.)
 13. Report on the research work «Investigation of the possibilities of using aircraft for logging in mountainous conditions»: In 2 parts. Khimki, TSNIIME, 1985. 189 p. (In Russ.)
 14. Kunitskaya O. A., Prosuzhikh A. A., Kalyashov V. A. Ecological and economic efficiency of forwarders operation. *Bulletin of AGATU*, 2021, no. 2 (2), pp. 44—53. (In Russ.)
 15. Abuzov A. V., Grigorev I. V., Abuzov Ya. A. On the issue of aerodynamics of the hulls of transport and cargo airships designed for the forest complex. *Forestry Journal*, 2022, vol. 12, no. 1 (45), pp. 68—81. (In Russ.)
 16. Kozlovsky V. B., Khudolenko O. V., Derevyanko V. S. *Aerostatic aircraft for economic sectors*. Moscow, Air Transport, 2007. 480 p. (In Russ.)
 17. Boyko Yu. S. *Aeronautics: Tethered. Free. Managed*. Moscow, MGUP, 2001. 462 p. (In Russ.)
 18. To conduct a study of the feasibility of creating and using unconventional aircraft in the national economy of the USSR. Research Report. Managers: Kozlovsky V. B., Khudolenko O. V.; Responsible executor Derevyanko V. S. Krasnodar, NGO PANKH GA, 1990. 245 p. (In Russ.)
 19. Daniel Y. Guimier, Vern G. Wellburn Logging with heavy-lift airships. *FERIC, Technical Report*, 1984, no. TR-58 (May). 115 p.