

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.17:629.733.5:629.7.015

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-59-64>

Рассредоточенный нагрев гелия в беспилотном дирижабле сельскохозяйственного назначения

С.А. Андреев¹, Д.В. Белов²^{1,2} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия¹ asa-finance@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8945-963X>² moyggdd1@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0005-8015-2067>

Аннотация. В современном сельскохозяйственном производстве беспилотные летательные аппараты способны решать множество задач. Для выполнения длительных технологических операций над поверхностью земли целесообразно применять дирижабли. С целью обоснованности рассредоточенного нагрева гелия в рабочем пространстве дирижабля рассмотрено влияние соотношения объемов, занимаемых нагретым и холодным гелием в рабочем пространстве дирижабля, а также температуры гелия на величину подъемной силы. В результате расчетов установлено, что рассредоточенный нагрев гелия определяет ускоренное изменение его плотности, обеспечивает уменьшение энергозатрат на нагрев и снижает требования к термической прочности оболочки. Показано, что рассредоточенный нагрев гелия во всем рабочем пространстве дирижабля обладает рядом преимуществ перед локальным нагревом. В разработанной конструкции беспилотного дирижабля техническая реализация рассредоточенного нагрева гелия достигается использованием электронагревательного прибора, токопроводящие элементы которого размещены по всему объему рабочего пространства на кронштейнах из легкого диэлектрического материала. С целью повышения эффективности нагрева внутренняя поверхность оболочки покрыта отражателем из тонкослойной фольгированной базальтовой ваты. Вертикальное маневрирование дирижабля поддерживается автоматически блоком управления посредством подключения электронагревательного прибора в зависимости от температуры гелия и температуры окружающей среды.

Ключевые слова: беспилотный дирижабль, дирижабль сельскохозяйственного назначения, рассредоточенный нагрев гелия, подъемная сила, вертикальное маневрирование дирижабля, температура гелия, электронагревательный прибор, токопроводящие элементы

Для цитирования: Андреев С.А., Белов Д.В. Рассредоточенный нагрев гелия в беспилотном дирижабле сельскохозяйственного назначения // *Агроинженерия*. 2024. Т. 26, № 1. С. 59-64. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-59-64>

ORIGINAL PAPER

Distributed helium heating in the working space of an agricultural unmanned airship

S.A. Andreev¹, D.V. Belov²^{1,2} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia¹ s.andreev@aol.com; <https://orcid.org/0000-0002-8945-963X>² moyggdd1@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0005-8015-2067>

Abstract. In modern agricultural production, unmanned aerial vehicles are capable of solving many tasks. It is expedient to use airships to perform long technological operations above the ground. To justify the need for the dispersed heating of helium in the working chamber of the airship, the authors considered the influence of the ratio of the volumes occupied by heated and cold helium in the working chamber of the airship, as well as the influence of the helium temperature on the lifting force. Calculations have shown that the dispersed heating of helium causes an accelerated change in its density, provides a reduction in the energy consumption for heating, and reduces the requirements for the thermal strength of the envelope. It is shown that distributed heating of helium in the whole working chamber of the airship has a number of advantages over local heating. In the proposed design of the unmanned airship, the technical implementation of the distributed heating of helium is achieved by means of an electrical heating device, the conductive elements of which are placed throughout the working chamber on supports made of light dielectric material. To increase the heating efficiency, the inner surface of the envelope is covered with a reflector made of thin

basalt wool foil. The vertical maneuvering of the airship is automatically maintained by the control unit by connecting an electric heating device depending on the helium temperature and the ambient temperature.

Key words: unmanned airship, agricultural airship, dispersed helium heating, lifting force, vertical maneuvering of airship, helium temperature, electrical heating device, conductive elements

For citation: Andreev S.A., Belov D.V. Distributed helium heating in the working space of an agricultural unmanned airship. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(1):59-64. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-59-64>

Введение

В сельскохозяйственном производстве небольшие пилотируемые и беспилотные самолёты, радиоуправляемые беспилотные дроны (коптеры) [1] успешно осуществляют ряд технологических процессов: срочную доставку специфических грузов (препараты для искусственного осеменения животных, икра, мальки и др.); аэрофотосъёмку местности и отдельных объектов; борьбу с вредителями и болезнями растений; аэросев; орошение при аномальной засухе; распыление удобрений; борьбу с лесными пожарами [2]. Несмотря на возрастающую роль дронов, их широкое использование ограничивается незначительной продолжительностью полёта, акустическими помехами и необходимостью постоянного тщательного контроля за их движением квалифицированным оператором.

Перечисленных недостатков лишены дирижабли^{1,2}. Способность дирижаблей находиться над землёй в течение нескольких недель позволяет осуществлять длительный мониторинг состояния почвы и вегетации растений, непрерывное наблюдение за появлением насекомых-вредителей, контроль за выпасом животных, ретрансляцию радиосигналов от наземных измерительно-передающих устройств, усиление и раздачу сигналов Интернет.

Вертикальное маневрирование дирижабля происходит достаточно инерционно, технически невозможно быстро прогреть весь объём. Для ускорения нагрева прибегают к увеличению мощности источника тепловой энергии. Например, при взлёте воздушных шаров на горячем воздухе мощность горелок может достигать нескольких мегаватт.

Существенное снижение энергозатрат для обеспечения полёта дирижабля достигается при использовании газов, обладающих малой плотностью. К таким газам относятся в первую очередь водород и гелий с плотностью 0,95 и 1,17 кг/м³ соответственно. В современных дирижаблях в качестве рабочего газа используется гелий, так как водород обладает высокой взрывоопасностью.

Значительное увеличение мощности источника при использовании электронагрева гелия является сложной технической задачей. Помимо дефицита больших запасов энергии, увеличение мощности локальных тепловых источников связано со значительным повышением температуры в непосредственной близости от них, следовательно, с повышенными требованиями к термической прочности оболочки и других частей.

Некоторую равномерность нагрева гелия при относительно небольшой мощности источника можно достичь при использовании вентиляторов. Однако эта мера влечёт за собой увеличение массы конструкции и требует затрат энергии на электропривод лопастей. Таким образом, быстрый и равномерный нагрев гелия в рабочем пространстве дирижаблей является актуальной задачей.

Цель исследований: обосновать целесообразность рассредоточенного нагрева гелия в рабочем пространстве дирижабля и рассмотреть пример практической реализации.

Материалы и методы

В качестве исходных материалов использованы сведения из теории воздухоплавания летательных аппаратов легче воздуха и справочные данные по термодинамическим свойствам гелия. При проведении теоретических исследований принимался принцип абстрагирования по отношению к потерям тепловой энергии от нагреваемого гелия в окружающую среду. Это позволило упростить расчёты, однако не могло отрицательно сказаться на их результатах, поскольку вычисляемые значения подъёмной силы рассматривались как результаты изменения плотности газа при изменении его температуры.

Установленные на экспериментальном дирижабле фотоэлектрические преобразователи обеспечивают бортовую энергосистему электрической энергией за счёт преобразования солнечной энергии в электрическую форму в светлое время суток (рис. 1). В качестве рабочего газа в дирижабле использовался гелий, плотность которого зависит от температуры³. Эта зависимость позволила осуществить управление вертикальным

¹ Арие М.Я. Дирижабли. Киев: Наукова думка, 1986. 264 с.

² Кирилин А.Н. Малогабаритные дирижабли. Конструкции и эксплуатация. М.: Издательство Московского авиационного института, 2003. 60 с.

³ Сычев В.В., Вассерман А.А., Козлов А.Д., Спиридонов Г.А., Цымарный В.А. Термодинамические свойства гелия: Монография / ГСССД. М.: Изд-во стандартов, 1984. 320 с.

маневрированием дирижабля [3] за счёт принудительного нагрева и естественного охлаждения гелия [4].

Результаты и их обсуждение

Для равномерного повышения температуры гелия предложено отказаться от локального подвода тепловой энергии, заменив его рассредоточенным нагревом всего объёма рабочего пространства дирижабля. Рассредоточенный нагрев позволяет повысить быстродействие вертикального маневрирования за счёт сокращения продолжительности теплообмена между источником теплоты и наиболее удалёнными точками камеры. Кроме того, скорость изменения температуры гелия в рабочем пространстве дирижабля оказывается выше, чем при локальном нагреве, поскольку экспонента, отражающая динамику нагрева тела с учётом тепловых потерь в окружающую среду, на начальном этапе характеризуется большим углом проведённой к ней касательной (нагрев при большей разности температур протекает более интенсивно).

Достаточно простой способ реализации рассредоточенного нагрева основан на явлении выделения тепловой энергии при прохождении по проводникам электрического тока. При этом проводники можно разместить в любой плотности и в любой части нагреваемого объёма. Помимо этого, рассредоточенный нагрев исключает необходимость использования вентиляторов, позволяет не допускать явного перегрева отдельных частей камеры и отказаться от использования массивных термостойких материалов для изготовления оболочки.



Рис. 1. Экспериментальный дирижабль в лаборатории
Fig. 1. Experimental airship in the laboratory

При рассредоточенном нагреве гелия происходит равномерное повышение его температуры во всём внутреннем пространстве дирижабля, что при определенных условиях позволяет получить выигрыш в подъемной силе. Рассмотрим рабочее пространство (камеру), заполненное гелием, имеющее форму эллипсоида вращения с условной перегородкой, разделяющей объём на две части и предотвращающей теплообмен на некоторое время. В одной части находится холодный гелий (V1), в другой – нагретый (V2) (рис. 2). Пусть дирижабль находится в окружении воздуха, имеющего температуру 0°C.

Для расчёта подъемной силы F_v^T используем выражение⁴:

$$F_v^T = (\rho_v - \rho_{r1})gV_1 + (\rho_v - \rho_{r2})gV_2,$$

где T – температура нагретого гелия, °C; ρ_v – плотность воздуха, кг/м³; ρ_{r1} – плотность холодного гелия (при температуре окружающего воздуха), кг/м³; ρ_{r2} – плотность нагретого гелия, кг/м³; g – ускорение свободного падения, g = 9,81 м/с².

Для удобства выполнения расчётов сведём значения плотностей воздуха и гелия при температурах 0, 25, 50, 75 и 100°C в таблицу 1.

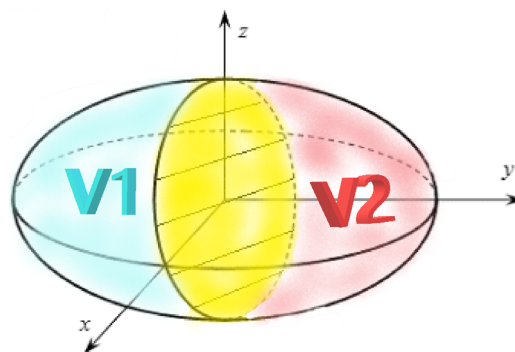


Рис. 2. Условное изображение рабочей камеры дирижабля:
V1 – объём с холодным гелием;
V2 – объём с нагретым гелием

Fig. 2. Conditional image of the working chamber of the airship:
V1 – volume with cold helium;
V2 – volume with heated helium

Зависимость плотностей воздуха и гелия от температуры

Таблица 1

Relationship between air and helium density and temperature

Table 1

Плотность, кг/м ³ Density, kg/m ³	Температура, °C / Temperature, °C				
	0	25	50	75	100
Гелий / Helium	0,179	0,177	0,152	0,141	0,134
Воздух / Air	1,292	1,184	1,145	1,040	0,946

¹ Щербаков Ю.В. Теория полета дирижаблей: Краткий курс. М.: Издательство ЛКИ, 2008. 80 с.

Обозначим полный объём эллипсоида символом V : ($V = V_1 + V_2$). Объёмы, заполненные нагретым гелием, выразим в долях от полного объёма: 0,25V, 0,5V, 0,75V, 1V. В таблице 2 представлены значения подъёмных сил при этих объёмах и температуре гелия 0, 25, 50 и 75°C.

Из результатов расчёта таблицы 2 следует, что меньший нагрев гелия во всём объёме эллипсоида в ряде случаев является более эффективным, чем его нагрев до большей температуры в малом объёме. Например, при нагреве гелия, находящегося в полном объёме эллипсоида до температуры 50°C, подъёмная сила оказывается на 11% выше, чем при локальном нагреве вдвое меньшего объема гелия до температуры 100°C. Кроме того, нагрев гелия до меньших температур определяет уменьшение тепловых потерь в окружающую среду и снижает требования к термической прочности оболочки.

Таблица 2

Подъёмные силы при различных температурах и долях объёма рабочей камеры, занимаемого нагретым гелием

Table 2

Lifting forces at different temperatures and fractions of the working chamber volume occupied by heated helium

Температура нагретого гелия <i>Temperature of heated helium, °C</i>	Доля объёма рабочей камеры, занимаемого нагретым гелием <i>Fraction of the working chamber volume occupied by heated helium</i>	Подъёмная сила <i>Lifting force, F_T^T, Н</i>
0	0,25	10,92V
25	0,25	10,93V
50	0,25	10,98V
75	0,25	11,02V
100	0,25	11,04V
0	0,50	10,92V
25	0,50	10,93V
50	0,50	11,05V
75	0,50	11,10V
100	0,50	11,14V
0	0,75	10,92V
25	0,75	10,93V
50	0,75	11,12V
75	0,75	11,20V
100	0,75	11,25V
0	1,00	10,92V
25	1,00	10,94V
50	1,00	11,18V
75	1,00	11,29V
100	1,00	11,36V

На рисунке 3 представлены зависимости подъёмной силы от объёма заполнения рабочего пространства нагретым гелием и его температуры.

Для реализации рассредоточенного нагрева гелия в рабочем пространстве дирижабля предложено электрооборудование [5], схема размещения которого представлена на рисунке 4а. На рисунке 4б изображена схема соединения токопроводящих элементов электронагревательного прибора.

В качестве оболочки 1 дирижабля использован мягкий газонепроницаемый материал. Электронагревательный прибор 2 содержит токопроводящие элементы 3 из металла с большим удельным электрическим сопротивлением. Токопроводящие элементы не соприкасаются между собой и оболочкой и укреплены на кронштейнах 4, выполненных из лёгкого диэлектрического материала. Отражателем 5 тепловой энергии является тонкослойная фольгированная базальтовая вата, а в качестве блока управления 8 использован регулятор с дискретно-нелинейной статической характеристикой.

Перед началом использования дирижабля устанавливается требуемая высота полёта посредством задатчика 12. При этом соответствующий сигнал поступает на информационный вход 11 блока управления 8. Сигнал, соответствующий информации о температуре окружающей среды с датчика 13, подается на вход 9 блока управления. Одновременно на вход 10 поступает сигнал, соответствующий температуре гелия, с датчика 14. В блоке управления 8 определяется разность температур гелия и окружающего воздуха, соответствующая разности сигналов на его входах 10 и 9. Далее сформированная разность в виде электрического сигнала сравнивается с сигналом, поступающим на вход 11 и соответствующим требуемой высоте полёта. Сравнение сигналов производится их вычитанием. При величине разности сравниваемых сигналов, превышающей установленный порог срабатывания, происходит переключение блока управления, обеспечивающее подачу питания от аккумулятора 7 электрической энергии к электронагревательному прибору.

Электрический ток протекает по токопроводящим элементам электронагревательного прибора, выделяя тепловую энергию и нагревая гелий. Благодаря креплению токопроводящих элементов на кронштейнах электронагревательный прибор может занимать любой объём (вплоть до полного) внутреннего пространства дирижабля. При этом тепловая энергия выделяется во всех точках электронагревательного прибора, что обеспечивает ускоренный нагрев гелия.

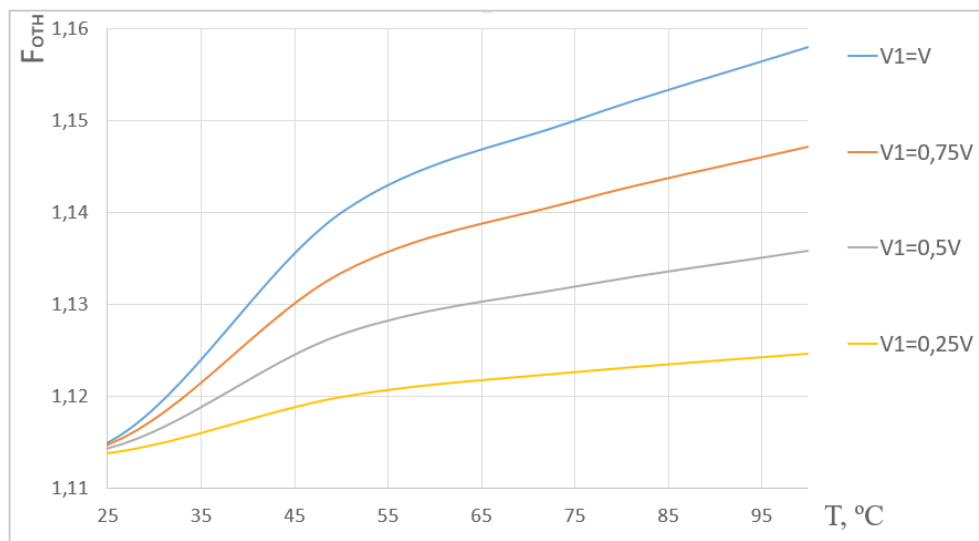


Рис. 3. Зависимости подъёмной силы от объёма заполнения рабочей камеры нагретым гелием и его температуры

Fig. 3. Relationship between the lifting force, the working chamber volume filled with heated helium, and its temperature

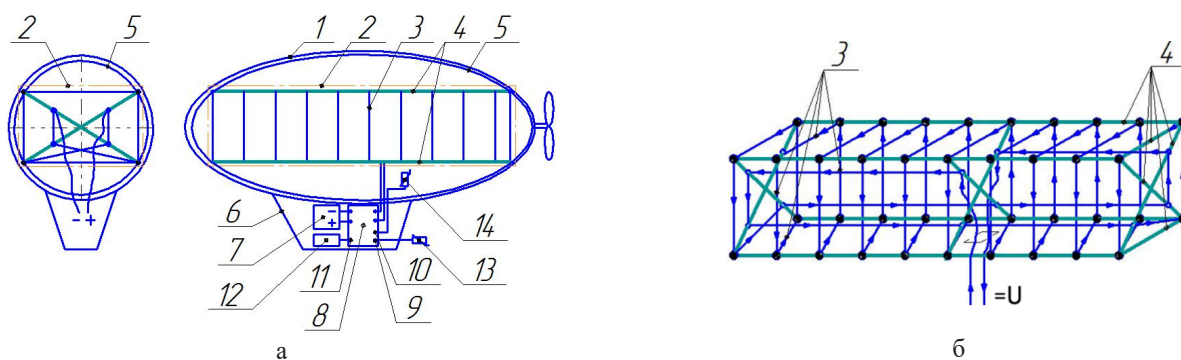


Рис. 4. Схема размещения электрооборудования дирижабля (а) и соединения токопроводящих элементов электронагревательного прибора (б):

1 – оболочка; 2 – электронагревательный прибор; 3 – токопроводящие элементы; 4 – кронштейны; 5 – отражатель тепловой энергии; 6 – гондола; 7 – аккумулятор электрической энергии; 8 – блок управления; 9, 10, 11 – информационные входы; 12 – задатчик высоты полёта; 13, 14 – датчики температуры

Fig. 4. Arrangement of airship electrical equipment (a) and connection scheme of conductive elements of the electrical heating device (b):

1 – envelope; 2 – electric heating device; 3 – conductive elements; 4 – supports; 5 – heat energy reflector; 6 – nacelle; 7 – electric energy accumulator; 8 – control unit; 9, 10, 11 – information inputs; 12 – flight altitude setter; 13, 14 – temperature sensors

Кроме того, равномерность нагрева повышается за счёт многократного отражения выделяющейся тепловой энергии отражателем 5. Нагрев гелия приводит к уменьшению его плотности, что увеличивает подъёмную силу, и воздухоплавательный аппарат поднимается вверх.

При уменьшении сигнала, соответствующего отклонению разности температур гелия и окружающей среды от величины сигнала, соответствующего требуемой высоте полёта, подача электрической энергии к электронагревательному прибору 2 прекращается. Гелий остывает, его плотность увеличивается, и дирижабль опускается вниз.

Таким образом, за счёт изменения подъёмной силы происходит быстрая стабилизация высоты полёта дирижабля. При необходимости осуществления вертикального маневрирования необходимо вручную или дистанционно воздействовать на задатчик и изменить величину сигнала, поступающего на информационный вход 11 блока управления. Одновременная обработка сигналов с задатчика высоты полёта и датчиков температуры снаружи и внутри дирижабля позволяет автоматически учитывать разность температур газа и окружающей среды и корректировать высоту полёта за счёт управления подачей питания на электронагревательный прибор.

Выводы

1. Повышение эффективности вертикального маневрирования беспилотного дирижабля может быть достигнуто посредством рассредоточенного нагрева гелия в рабочем пространстве.

2. Рассредоточенный нагрев гелия определяет ускоренное изменение его плотности, обеспечивает уменьшение энергозатрат на нагрев и снижает требования к термической прочности оболочки.

Список литературы

1. Курченко Н.Ю., Даус Ю.В., Труфляк Е.В., Ильченко Я.А. Параметры применения беспилотных летательных аппаратов при обработке средствами защиты растений сельскохозяйственных культур // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2023. № 1 (69). С. 527-536. EDN: OIBLWB
2. Галушина П.С., Кравчук А.А. Применение авиации в сельском хозяйстве Российской Федерации // Аграрное образование и наука. 2023. № 2. С. 8. EDN: VZXBAU
3. Андреев С.А., Белов Д.В. Вертикальное маневрирование микродирижаблей сельскохозяйственного назначения // Сборник статей XVII Международной научно-практической конференции «European Scientific Conference», 7 ноября 2019 г. Пенза: Наука и Просвещение, 2019. С. 72-75. EDN: IKGDBK
4. Андреев С.А., Белов Д.В. Оценка энергозатрат на нагрев гелия при вертикальном маневрировании дирижаблей сельскохозяйственного назначения // Доклады ТСХА. 2020. Вып. 292. Ч. 1. С. 102-107. EDN: OCPRQL
5. Воздухоплавательный аппарат: Патент RU197257 U1, МПК В64В1/62 / С.А. Андреев, Д.В. Белов. Заяв. № 2020106046, 10.02.2020, опубл. 16.04.2020. Бюл. № 11. EDN: FOXVEE

Информация об авторах

Сергей Андреевич Андреев¹, канд. техн. наук, доцент; s.andreev@aol.com; <https://orcid.org/0000-0002-8945-963X>
Дмитрий Владимирович Белов², аспирант; moyggddl@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0005-8015-2067>
^{1,2} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила 08.07.2023; поступила после рецензирования и доработки 24.10.2023; принята к публикации 25.10.2023

3. Техническая реализация рассредоточенного нагрева гелия достигается использованием электронагревательного прибора, токопроводящие элементы которого размещены по всему объёму рабочего пространства. При этом управление подачей электрической энергии к электронагревательному прибору осуществляется в зависимости от температуры гелия, температуры окружающей среды и заданной высоты полета.

References

1. Kurchenko N.Yu., Daus Yu.V., Truflyak E.V., Ilchenko Ya.A. Parameters of the use of unmanned aerial vehicles in the processing of crop protection products. *Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education*. 2023;1:527-536. (In Rus.)
2. Galushina P.S., Kravchuk A.A. The use of aviation in agriculture of the Russian Federation. *Agrarnoe Obrazovanie i Nauka*. 2023;2:8. (In Rus.)
3. Andreev S.A., Belov D.V. Vertical maneuvering a microdrivable of agricultural purpose. *Collection of papers of the XVII International Scientific and Practical Conference "European Scientific Conference"*, November 07, 2019. Penza, Science and Education. 2019. P. 72-75. (In Rus.)
4. Andreev S.A., Belov D.V. Estimation of energy consumption for heating helium during vertical maneuvering of airships for agricultural purposes. *Doklady TSKhA*. 2020;292(1):102-107. (In Rus.)
5. Andreev S.A., Belov D.V. Aerostat: Patent 197257 Russian Federation, IPC B64B1. No. 2020106046, 2020. (In Rus.)

Author Information

Sergey A. Andreev¹, CSc (Eng), Associate Professor, s.andreev@aol.com; <https://orcid.org/0000-0002-8945-963X>
Dmitriy V. Belov², postgraduate student, moyggddl@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0005-8015-2067>
^{1,2} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 08.07.2023; revised 24.10.2023; accepted 25.10.2023