

УДК 629.7.022

doi: 10.18698/0536-1044-2020-11-89-95

Выбор оптимальной конструктивно-силовой схемы крыла беспилотного летательного аппарата

Лин Аунг Найнг¹, Вэй Аунг Пху¹, О.В. Татарников²

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана

² Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова

Selection of the Optimal Load Bearing Wing Structure Scheme for an Unmanned Aerial Vehicle

Lin Aung Naing¹, Wai Aung Phyo¹, O.V. Tatarnikov²

¹ Bauman Moscow State Technical University

² Plekhanov Russian University of Economics

Приведены результаты оптимизации конструктивно-силовой схемы крыла беспилотного летательного аппарата. Критерием оптимизации являлась минимальная масса крыла, параметрами оптимизации — количество лонжеронов и нервюр, расположение и толщина этих силовых элементов крыла. В качестве ограничения использован максимальный прогиб крыла. В расчетной модели учтено изменение толщины лонжеронов вдоль направления размаха крыла, а толщины обшивки и нервюр приняты постоянными. Оптимальная конструктивно-силовая схема крыла выбрана по критерию минимальной массы крыла при максимальном допустимом прогибе крыла. Расчеты напряженно-деформированного состояния крыла выполнены с использованием конечно-элементной модели в программном комплексе FEMAP.

Ключевые слова: допустимый прогиб крыла, аэродинамическая нагрузка, расположение лонжеронов и нервюр, нижняя обшивка крыла, однонаправленный углепластик, конструктивно-силовая схема

This article presents the results of optimization of the load bearing structure of the wing of an unmanned aerial vehicle. The criteria and optimization parameters were considered, respectively: the minimum wing mass, number of spars and ribs, location parameters of the spars and ribs, and thickness of the wing's load bearing elements. The maximum wing deflection was considered as a limiting factor. The calculated model took into account the change in the thickness of the spars along the direction of the wingspan, while the thickness of the skin and ribs was considered as constant. The optimal load bearing scheme of the wing was selected by the criterion of the minimum wing mass based on the maximum permissible deflection of the wing. Calculations of the stress-strain state of the wing were performed using a finite element model in the FEMAP software package.

Keywords: permissible wing deflection, aerodynamic load, arrangement of spars and ribs, lower wing skin, unidirectional carbon fiber, load bearing structure

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БПЛА) широко применяют в военных и гражданских областях для ведения наблюдения, разведки, патрулирования и других целей [1]. Благодаря высоким характеристикам композиционные материалы получили

распространение в аэрокосмической промышленности, и все чаще ими заменяют традиционные материалы [2, 3].

Выбор конструктивно-силовой схемы (КСС) является одним из важнейших этапов проектирования крыла БПЛА [4].

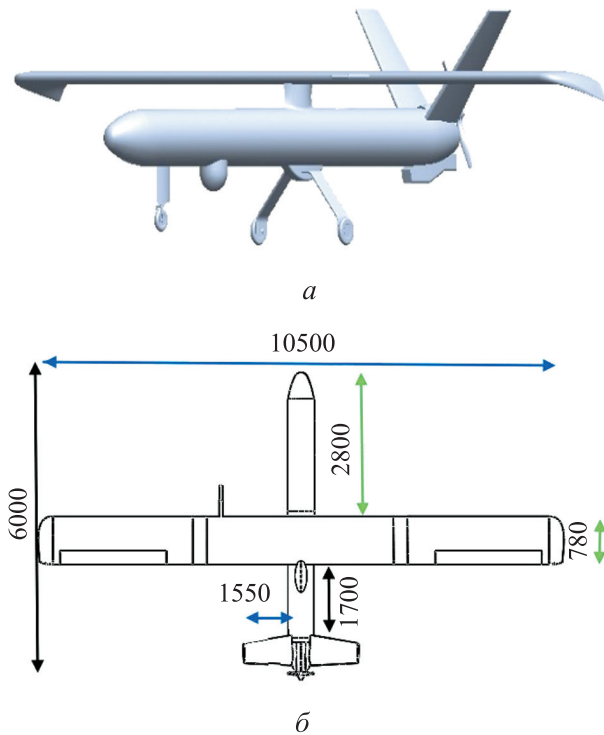


Рис. 1. Внешний вид (а) и конструктивная схема (б) БПЛА Hermes 450

Цель работы — определение оптимальной КСС композитного крыла минимальной массы, зависящей от количества лонжеронов, нервюры и схемы их расположения.

В качестве объекта исследования рассмотрено прямое крыло БПЛА Hermes 450 с размахом 10,5 м и несимметричным профилем. Хорда — 0,78 м [5].

Конструктивно-силовая схема крыла. Геометрические параметры крыла БПЛА.

БПЛА Hermes 450, изготовленный из композитных материалов, оборудован неубираемым трехколесным шасси (рис. 1). В названии этого БПЛА индекс 450 соответствует максимальной взлетной массе аппарата. Наиболее предпочтительными для крыла БПЛА являют-

ся двух- (рис. 2, а) и трехлонжеронная КСС (рис. 2, б).

Практика проектирования КСС крыльев лонжеронного типа показывает, что при их двухлонжеронной схеме передний и задний лонжероны расположены на расстоянии 20...30 % и 60...70 % хорды от кромки крыла. При трехлонжеронной схеме крыла расстояние установки лонжерона варьировали в следующих диапазонах: переднего — 10...15 % хорды, среднего — 35...50 % хорды, заднего — 65...70 % хорды [6]. Расстояние между нервюрами обычно составляет 300 и 400 мм [7]. Варьируемые параметры для определения положения лонжеронов и нервюры всех КСС приведены в табл. 1.

Свойства материала. Для всех силовых элементов крыла выбран одинаковый материал — однонаправленный углепластик (Т800/эроху) [8–10] и одна и та же схема укладки однонаправленных слоев — (0, ±45, 90) [11, 12].

Физико-механические свойства однонаправленного углепластика Т800/эроху

Модуль упругости, ГПа:

вдоль волокна 160
поперек волокна 7,8

Модуль сдвига, ГПа 4,4

Предел прочности вдоль волокна, МПа:

при растяжении 2840
при сжатии 1570

Предел прочности поперек волокна, МПа:

при растяжении 80
при сжатии 168

Предел прочности при сдвиге, МПа 98

Плотность, кг/м³ 1600

Толщина монослоя, мм 0,15

На геометрическую модель крыла накладывали конечно-элементную сетку. Общее количество элементов и узлов составляло 67 356 и 65 291 шт. соответственно. Для продольных силовых элементов материал направлен вдоль оси Z (рис. 3, а), для поперечных — вдоль оси X (рис. 3, б).

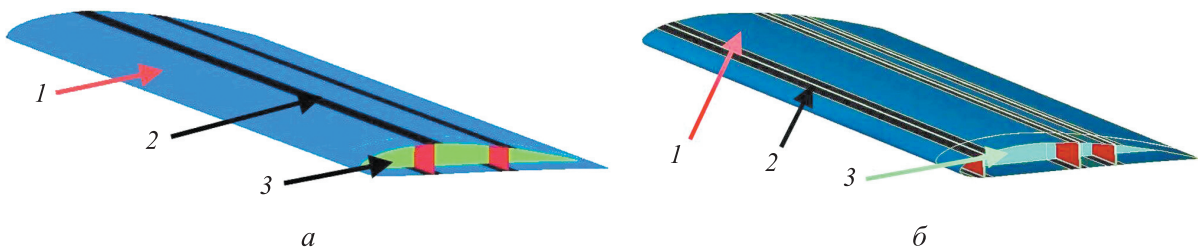


Рис. 2. Двух- (а) и трехлонжеронная (б) КСС крыла БПЛА Hermes 450:
1 — обшивка; 2 — лонжероны; 3 — нервюры

Таблица 1

Варьируемые параметры КСС

Двухлонжеронная схема			Трехлонжеронная схема		
Вариант	Расстояние переднего/заднего лонжерона от кромки крыла, % хорды	Шаг нервюр, мм	Вариант	Расстояние переднего/среднего/заднего лонжерона от кромки крыла, % хорды	Шаг нервюр, мм
1	20/60	400	13	10/35/65	400
2		300	14		300
3	20/70	400	15	10/50/65	400
4		300	16		300
5	30/60	400	17	10/35/70	400
6		300	18		300
7	30/70	400	19	10/50/70	400
8		300	20		300
9	25/60	400	21	10/40/65	400
10		300	22		300
11	25/70	400	23	15/50/65	400
12		300	24		300
-	-	-	25	15/40/70	400
-	-	-	26		300
-	-	-	27	15/50/70	400
-	-	-	28		300

Определение аэродинамической нагрузки.

При анализе напряженно-деформированного состояния крыла внешние аэродинамические нагрузки, соответствовали полетному случаю. В этом случае БПЛА совершает криволинейный полет при больших значениях положительного угла атаки, соответствующих максимальному коэффициенту подъемной силы.

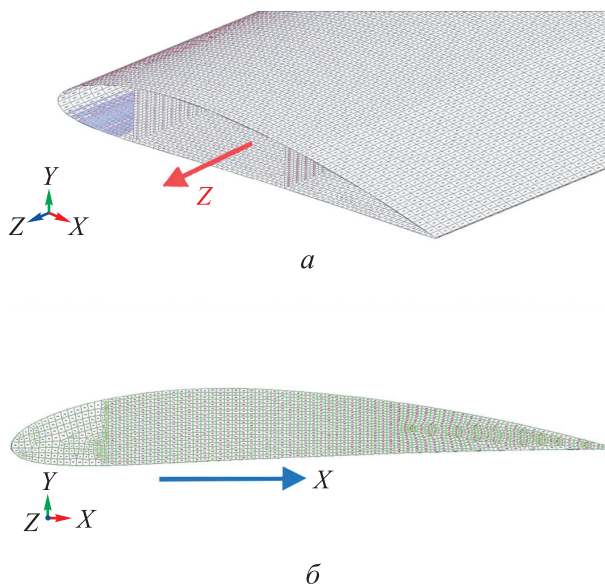


Рис. 3. Конечно-элементная модель крыла при направлении материала вдоль осей Z (а) и X (б)

Расчетное аэродинамическое давление, действующее на нижнюю обшивку крыла, определяется следующей системой уравнений [13]:

$$\begin{cases} P_{\text{аэр}} = \frac{Y}{\cos\theta}; \\ P_{\text{аэр}} = Y = Gn^3 f; \\ P_{\text{аэр}} = \frac{Gn^3 f}{S_{\text{кр}}}, \end{cases}$$

где $P_{\text{аэр}}$ — аэродинамическая нагрузка; Y — подъемная сила; θ — угол между подъемной силой и силой лобового сопротивления, $\cos\theta \approx 1$; G — взлетная масса БПЛА, $G = 450$ кг; n^3 — коэффициент перегрузки, $n^3 = 2,5$; f — коэффициент безопасности, $f = 1,5$; $S_{\text{кр}}$ — площадь крыла, $S_{\text{кр}} = 8,2$ м². Расчетное аэродинамическое давление принято равным 2018,18 Па.

Результаты расчетов. Для всех КСС толщина обшивки составляла 2 мм, толщина нервюр — 1,5 мм. При расчете учтено изменение толщины лонжеронов вдоль размаха крыла для получения допустимого максимального прогиба. Допустимый прогиб крыла определен как 6% размаха крыла [14].

Таблица 2

Результаты расчета параметров крыла для различных вариантов КСС

Двухлонжеронная КСС			Трехлонжеронная КСС		
Вариант	Масса, кг	Максимальный прогиб, мм	Вариант	Масса, кг	Максимальный прогиб, мм
1	34,69	315,7	13	34,02	314,8
2	35,16	315,4	14	34,21	318,3
3	37,18	315,7	15	34,24	315,3
4	38,07	315,4	16	34,47	313,0
5	33,75	315,7	17	34,48	314,2
6	34,22	315,4	18	35,21	316,9
7	34,29	315,8	19	35,66	314,5
8	35,83	315,6	20	35,88	315,8
9	34,61	315,2	21	34,00	310,4
10	34,56	315,9	22	34,21	314,3
11	34,15	315,4	23	33,97	315,0
12	34,61	315,2	24	34,47	314,2
-	-	-	25	33,97	315,5
-	-	-	26	34,21	314,3
-	-	-	27	34,83	314,4
-	-	-	28	34,43	315,3

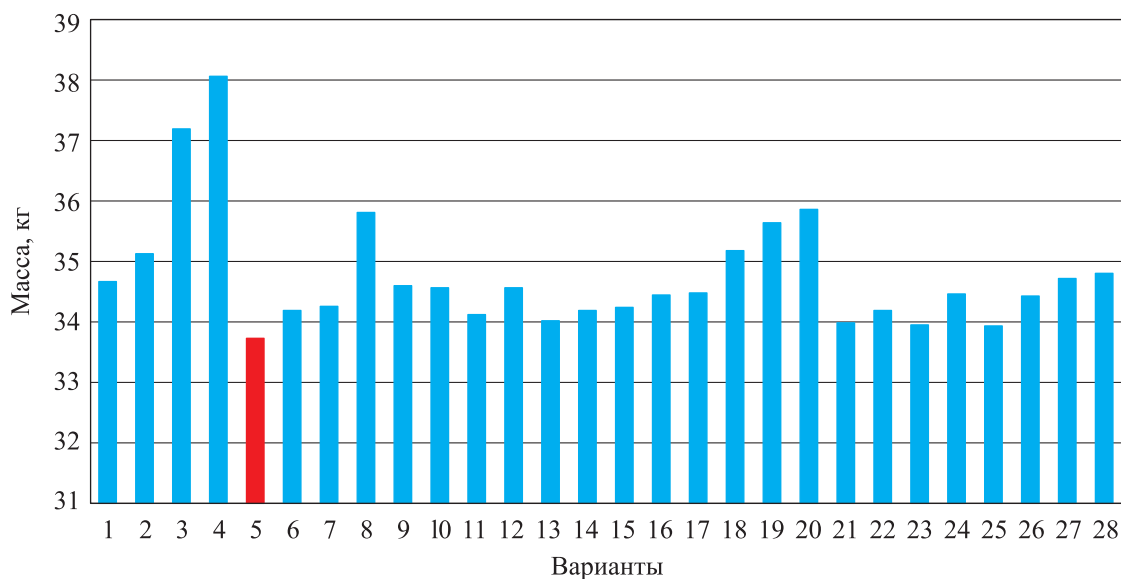


Рис. 4. Значения массы крыла для различных вариантов КСС

Для рассмотренных вариантов КСС вычислены значения массы и прогиба под действием аэродинамической нагрузки. Расчеты напряженно-деформированного состояния выполнены в программе FEMAP. Результаты расчета оптимальных параметров крыла — массы и максимального прогиба — для рассмотренных вариантов КСС приведены в табл. 2.

Значения массы крыла для различных вариантов КСС приведены на рис. 4, где видно, что

оптимальным по критерию минимальной массы крыла БПЛА является пятый вариант двухлонжеронной КСС, выделенный красным цветом.

Выводы

1. Определено оптимальное положение лонжеронов и нервюр относительно кромки крыла по критерию его минимальной массы при заданном максимальном прогибе.

2. Выявлена оптимальная двухлонжеронная ККС, в которой передний и задний лонжероны расположены на расстоянии 30 и 60 % хорды от кромки крыла соответственно.

3. Масса оптимального двухлонжеронного крыла, полученного путем оптимизации толщины лонжерона вдоль его размаха, меньше, чем у другого типа крыла.

Литература

- [1] Яцук К.В., Стафеев М.С., Казаринов С.В. Применение беспилотных летательных аппаратов в локальных конфликтах и войнах. *Молодой ученый*, 2016, № 25, с. 107–111. URL: <https://moluch.ru/archive/129/35666/> (дата обращения 15 мая 2020).
- [2] Gurova G.G., Reznik S.V., Shafikova I.R. New materials and developing English language competence in university students and teachers. *Journal of physics. Conference series*, 2018, vol. 1134, no. 1, doi: 10.1088/1742-6596/1134/1/012019
- [3] Reznik S.V. Thermal regimes of space composite structures. Part I. *MATEC web of conferences*, 2018, vol. 194, no. 1, doi: doi.org/10.1051/mateconf/201819401048
- [4] Гордиенко А.В., Припадчев А.Д. К вопросу автоматизированного проектирования облика беспилотного летательного аппарат самолетной схемы. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 2013, № 4, с. 911–913.
- [5] *Беспилотный летательный аппарат Hermes 450*. URL: <https://bp-la.ru/izrailskij-bla-hermes-450/> (дата обращения 15 мая 2020).
- [6] Алиакбаров Д.Т., Матуразов И.С. Исследование и выбор оптимальной конструктивно-силовой схемы крыла сельскохозяйственного самолета. *Наука, техника и образование*, 2017, № 1, с. 30–32.
- [7] Михайловский К.В., Барановский С.В. Методика проектирования крыла из полимерных композиционных материалов на основе параметрического моделирования. Часть 2. Проектирование силовой конструкции. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2016, № 12, с. 106–116, doi: 10.18698/0536-1044-2016-12-106-116
- [8] Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Mikhailovskii K.V. Development of elements of reusable heat shields from a carbon-ceramic composite material 1. Theoretical forecast. *Journal of engineering physics and thermophysics*, 2019, vol. 92, no. 1, pp. 89–94, doi: 10.1007/s10891-019-01910-0
- [9] Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Azarov A.V. Substantiation of the structural-layout scheme of the mirror-space-antenna reflector with a high shape stability and a low density per unit length. *Journal of engineering physics and thermophysics*, 2015, vol. 88, no. 3, pp. 699–705, doi: 10.1007/s10891-015-1239-x
- [10] Смердов А.А., Буянов И.А., Чуднов И.В. Анализ оптимальных сочетаний требований к разрабатываемым углепластикам для крупногабаритных ракетно-космических конструкций. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2016, № 8, с. 70–78, doi: 10.18698/0536-1044-2012-8-70-77
- [11] Aung P.W., Tatarnikov O., Aung N.L. Structural optimization of a light aircraft composite wing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 709, no. 1, doi: 10.1088/1757-899X/709/4/044094
- [12] Хонг Ф.Н., Бирюк В.И. Исследования по оптимизации конструктивно-силовой схемы самолета с прямым крылом из композиционных материалов. *Труды Московского физико-технического института*, 2014, т. 6, № 2, с. 133–141.
- [13] Чепурных И.В. *Прочность конструкций летательных аппаратов*. Комсомольск-на-Амуре, КНАГТУ, 2013. 137 с.
- [14] Тарасов Ю.Л., Лавров Б.А. *Расчет на прочность элементов конструкции самолета*. Самара, Самарский ун-т, 2000. 112 с.

References

- [1] Yatsuk K.V., Stafeyev M.S., Kazarinov S.V. The use of unmanned aerial vehicles in local conflicts and wars. *Young Scientist*, 2016, no. 25, pp. 107–111 (in Russ.). Available at: <https://moluch.ru/archive/129/35666/> (accessed 15 May 2020).
- [2] Gurova G.G., Reznik S.V., Shafikova I.R. New materials and developing English language competence in university students and teachers. *Journal of physics. Conference series*, 2018, vol. 1134, no. 1, doi: 10.1088/1742-6596/1134/1/012019
- [3] Reznik S.V. Thermal regimes of space composite structures. Part I. *MATEC web of conferences*, 2018, vol. 194, no. 1, doi: doi.org/10.1051/mateconf/201819401048
- [4] Gordiyenko A.V., Pripadchev A.D. The question of computer aided design shape of unmanned aerial vehicle the airplane scheme. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2013, no. 4, pp. 911–913 (in Russ.).
- [5] *Bespilotnyy letatel'nyy apparat Hermes 450* [Unmanned aerial vehicle Hermes 450]. Available at: <https://bp-la.ru/izrailskij-bla-hermes-450/> (accessed 15 May 2020).
- [6] Aliakbarov D.T., Maturazov I.C. Research and selection of the optimal structural-power scheme of the wing of an agricultural aircraft. *Nauka, tekhnika i obrazovaniye*, 2017, no. 1, pp. 30–32 (in Russ.).
- [7] Mikhaylovskiy K.V., Baranovskiy S.V. The Methods of Designing a Polymer Composite Wing Using Parametrical Modeling. Part II. Design of the Load Bearing Structure. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2016, no. 12, pp. 106–116, doi: 10.18698/0536-1044-2016-12-106-116
- [8] Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Mikhailovskii K.V. Development of elements of reusable heat shields from a carbon-ceramic composite material 1. Theoretical forecast. *Journal of engineering physics and thermophysics*, 2019, vol. 92, no. 1, pp. 89–94, doi: 10.1007/s10891-019-01910-0
- [9] Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Azarov A.V. Substantiation of the structural-layout scheme of the mirror-space-antenna reflector with a high shape stability and a low density per unit length. *Journal of engineering physics and thermophysics*, 2015, vol. 88, no. 3, pp. 699–705, doi: 10.1007/s10891-015-1239-x
- [10] Smerdov A.A., Buyanov I.A., Chudnov I.V. Analysis of optimal combinations of requirements to developed CFRP for large space-rocket designs. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2016, no. 8, pp. 70–78 (in Russ.), doi: 10.18698/0536-1044-2012-8-70-77
- [11] Aung P.W., Tatarnikov O., Aung N.L. Structural optimization of a light aircraft composite wing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 709, no. 1, doi: 10.1088/1757-899X/709/4/044094
- [12] Khong F.N., Biryuk V.I. Research on optimization of the structural-power scheme of an aircraft with a straight wing made of composite materials. *Trudy Moskovskogo fiziko-tekhnicheskogo instituta*, 2014, vol. 6, no. 2, pp. 133–141 (in Russ.).
- [13] Chepurnykh I.V. *Prochnost' konstruktivnykh letatel'nykh apparatov* [Structural strength of aircraft]. Komsomolsk-on-Amur, KnASTU publ., 2013. 137 p.
- [14] Tarasov Yu.L., Lavrov B.A. *Raschet na prochnost' elementov konstruktivnykh samoleta* [Strength calculation of aircraft structural elements]. Samara, Samarskiy un-t publ., 2000. 112 p.

Статья поступила в редакцию 31.08.2020

Информация об авторах

НАЙНГ Лин Аунг — аспирант кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: nainglinaung.cm13@gmail.com).

ПХУ Вэй Аунг — аспирант кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: thzr093@gmail.com).

ТАТАРНИКОВ Олег Вениаминович — доктор технических наук, профессор кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции». МГТУ им. Н.Э. Баумана; заведующий кафедрой высшей математики. Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова (117997, Москва, Российская Федерация, Стремянный пер., д. 36, e-mail: tatarnikov.ov@rea.ru).

Information about the authors

NAING Lin Aung — Postgraduate, Rocket and Space Composite Design Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: nainglinaung.cm13@gmail.com).

PHYU Wai Aung — Postgraduate, Rocket and Space Composite Design Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: thzr093@gmail.com).

TATARNIKOV Oleg Veniaminovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Rocket and Space Composite Design Department. Bauman Moscow State Technical University; Head of Advanced Mathematics Department. Plekhanov Russian University of Economics (11799736, Moscow, Russian Federation, Stremyanny Lane, Bldg. 36, e-mail: tatarnikov.ov@rea.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Найнг Лин Аунг, Пху Вэй Аунг, Татарников О.В. Выбор оптимальной конструктивно-силовой схемы крыла беспилотного летательного аппарата. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 11, с. 89–95, doi: 10.18698/0536-1044-2020-11-89-95

Please cite this article in English as:

Naing Lin Aung, Phyu Wai Aung, Tatarnikov O.V. Selection of the Optimal Load Bearing Wing Structure Scheme for an Unmanned Aerial Vehicle. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 11, pp. 89–95, doi: 10.18698/0536-1044-2020-11-89-95



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышло в свет учебное пособие

«Применение грунтов в дорожном строительстве»

**Авторы: В.А. Борисов, М.А. Сорокин,
Д.М. Левушкин, Н.И. Казначеева**

Рассмотрены основные положения инженерной геологии, состав и свойства грунтов, их влияние на дорожно-строительные качества, а также методы и методики по их улучшению. Приведены справочные материалы для подготовки к написанию рефератов и к практическим занятиям по дисциплинам «Дорожно-строительные материалы и машины», «Инженерно-геологическое обеспечение дорожного строительства».

Для студентов, обучающихся по направлению подготовки 35.03.02 «Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств», направленность подготовки «Лесоинженерное дело».

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru