

УДК 629.7.014.16

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАШУЩЕГО КРЫЛА ДЛЯ ПРЫГАЮЩЕ-ЛЕТАЮЩЕГО РОБОТА

Ефимов С.В., Коршунов Е.В., Поляков Р.Ю., Тарасов О.С., Яцун С.Ф.

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», Курск, e-mail: teormeh@inbox.ru

В статье рассмотрен малогабаритный летательный аппарат, принцип полета которого аналогичен полету реальных биологических прототипов. Имитация и копирование принципов поведения живых организмов позволяет создавать мобильные устройства, обладающие уникальными свойствами, которые находят конкретное практическое применение. Для проектирования таких систем необходима информация о силах, возникающих при взаимодействии крыльев с потоком воздуха, а также многих других параметрах, определение которых теоретическими методами представляет значительные трудности, поэтому эти данные, так необходимые при разработке и создании роботов, удобно получить на основе экспериментальных исследований, позволяющих определить тяговую и подъемную силы машущего крыла, энергопотребление электроприводов и многое другое. В статье представлен экспериментальный комплекс, позволяющий изучать движение прыгающе-летающего робота с машущим крылом, предложены методики, позволяющие определять тяговое усилие, подъемную силу, энергопотребление и ряд других параметров, определение которых экспериментальными методами не представляется возможным. В результате экспериментальных исследований установлено, что удельное энергопотребление электроприводом машущего крыла, определяемое как отношение потребляемой мощности к создаваемому тяговому усилию, практически линейно зависит от частоты колебаний крыла. Так если, в области низких частот до 30 1/с этот параметр равен примерно 6 Вт/Н, то в области высоких частот 80 1/с он достигает значений 18 Вт/Н, что соответствует энергопотреблению мультироторных систем.

Ключевые слова: прыгающе-летающие роботы, математическое моделирование полёта

EXPERIMENTAL STUDIES OF MOVING WING PARAMETERS FOR A FLYING – JUMPING ROBOT

Efimov S.V., Korshunov E.V., Polyakov R.Y., Tarasov O.S., Yatsun S.F.

Southwest State University, Kursk, e-mail: teormeh@inbox.ru

In this paper, a small-sized aircraft, the flight principle of which is similar to the flight of real biological prototypes, is reviewed. Imitation and copying the living organisms' behavior principles assist to create mobile devices, which have unique characteristics and find specific practical use. To design such systems, it is necessary to have the information about the forces arising from the interaction of the wings with the air flow, and many other parameters, which are difficult to define using theoretical methods, therefore these data, that are necessary when designing and building robots, can be obtained on the basis of experimental studies, which help to determine the lift and traction forces of the moving wing, the power consumption of electric drives and much more. This paper presents the experimental system, which helps to study the motion of a flying-jumping robot with moving wings; besides it proposes some methods, which help to define the traction, lift force, power consumption and a number of other parameters, which are impossible to define using experimental methods. The experimental studies showed, that the specific power consumption of the moving wing electric drives, defined as the ratio of consumed power to the generated traction effort, is almost linearly depends on the oscillation frequency of the wing. Thus, in the low-frequency region up to 30 1/s this parameter is about 6 W/N, but in the high-frequency region 80 1/s it reaches the value of 18 W/N, which corresponds to the power consumption of multirotor systems.

Keywords: skipping-flying robots, mathematical modeling of flight

В последние годы для создания высокоэффективных роботов, в том числе и малогабаритных летательных аппаратов, все чаще используются результаты исследования движения реальных биологических прототипов. Имитация и копирование принципов поведения живых организмов позволяет создавать мобильные устройства, обладающие уникальными свойствами, которые находят конкретное практическое применение [1–12]. Создание нового класса небольших прыгающе-летающих роботов, имитирующих движение насекомых, открывает новые возможности для создания средств скрытого мониторинга окружающей среды и разведки местности с использованием ди-

агностической и информационной микрофото- или видеоаппаратуры. Прыгающе-летающие роботы, получившие название инсектоптеры, обладают рядом достоинств, таких как малая масса при существенной массе полезной нагрузки, компактность и маневренность [1–3]. Для проектирования таких систем необходима информация о силах, возникающих при взаимодействии крыльев с потоком воздуха, а также многих других параметрах, определение которых теоретическими методами представляет значительные трудности, поэтому эти данные, так необходимые при разработке и создании роботов, удобно получить на основе экспериментальных исследований, позволяющих

определить тяговую и подъемную силы машущего крыла, энергопотребление электроприводов и многое другое.

Описание экспериментального стенда

Для изучения параметров малогабаритных летательных объектов разработан и изготовлен многофункциональный стенд, схема которого представлена на рис. 1.

На рис. 1 приняты следующие обозначения основных элементов механизма: 1 – основание; 2 – стойка; 3 – энкодер; 4 – акселерометр; 5 – стержни; 6 – кронштейн для крепления робота; 7 – сервомашинка; 8 – блок электроники; 9 – аккумуляторы.

Стенд работает следующим образом. На кронштейн 6 закрепляется исследуемый объект. Посредством сервопривода 7 относительно оси Oz осуществляется поворот кронштейна с закрепленным роботом на необходимый для эксперимента

угол. После проведения данной настройки угла производится включение электроприводов машущего крыла инсектоптера, которая заставляет его вращаться вокруг оси Oy . Углы поворота в плоскостях yOz и xOz измеряются с помощью акселерометра 4 и энкодера 3 соответственно. При этом можно определить скорость движения робота по окружности или силы тяги и подъемной силы, ток потребляемый приводами робота, напряжение питания и многое другое.

Расчетная схема для определения тягового усилия представлена на рис. 2.

Здесь приняты следующие обозначения: φ_1 – угол поворота вокруг оси Oz ; φ_2 – угол поворота вокруг оси Ox ; φ_3 – угол поворота вокруг оси Oy ; l_1, l_2 – длины звеньев (плечи); $M\vec{g}$ – сила тяжести робота с кронштейном; $m\vec{g}$ – сила тяжести противовеса.

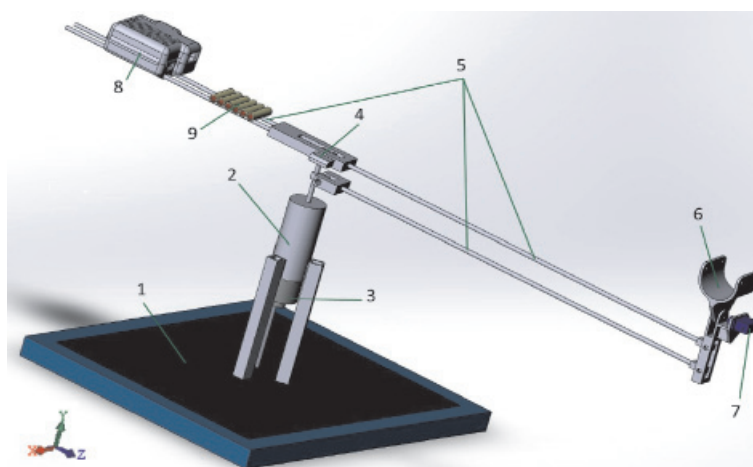


Рис. 1. 3D-модель стенда (общий вид)

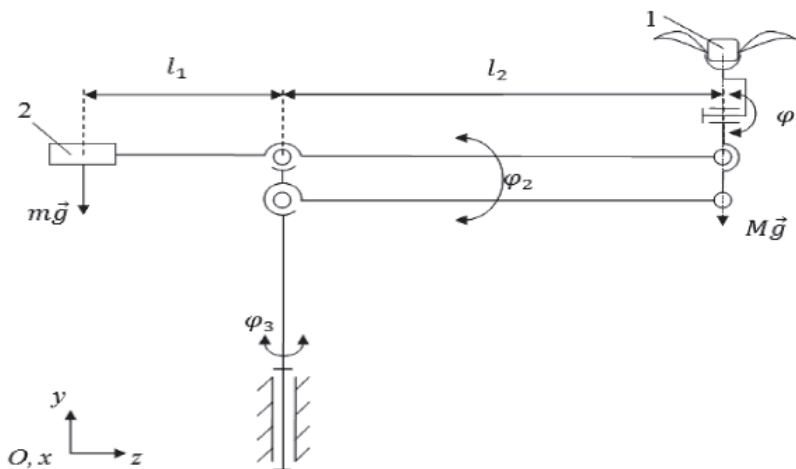


Рис. 2. Расчетная схема определения тягового усилия: 1 – инсектоптер; 2 – противовес

Для проведения экспериментов используется прецизионный измеритель силы, фото-строботометр, позволяющий измерять частоту колебаний крыльев.

Методика проводимых измерений

С помощью данного стенда проведен эксперимент, в результате которого определена зависимость тягового усилия инсектоптера от частоты взмаха крыла. Методика эксперимента заключается в следующем. Махолет закрепляется в кронштейне и предварительно поворачивается на угол $\varphi_1 = 90^\circ$ так, чтобы исследуемый объект располагался вертикально в плоскости yOz .

Робот уравнивается такой массой m , чтобы стержни 5 находились горизонтально, при этом должно выполняться равенство

$$mgl_1 = Mgl_2,$$

где l_1 и l_2 – длины стержней; M – масса робота; g – ускорение свободного падения. Фо-

то-строботометр располагается над крылом закрепленного робота на таком уровне, чтобы фиксировать количество оборотов реверсивного движения крыла. Выполнены перечисленные предварительные работы, включается тяга машущего крыла и измеряются необходимые переменные, а именно: количество махов n (об./мин) крыла с помощью фото-строботометра; нормальная сила реакции N (Н), фиксируется прецизионным динамометром. Тяговое усилие F находится по формуле

$$F = N \frac{l_1}{l_2}.$$

На основе полученных результатов определяется зависимость тягового усилия от частоты взмаха крыла. Кроме этого, получены зависимости силы тяги, тока потребляемой мощности и отношения потребляемой мощности к силе тяги представлены на графиках рис. 3–6.

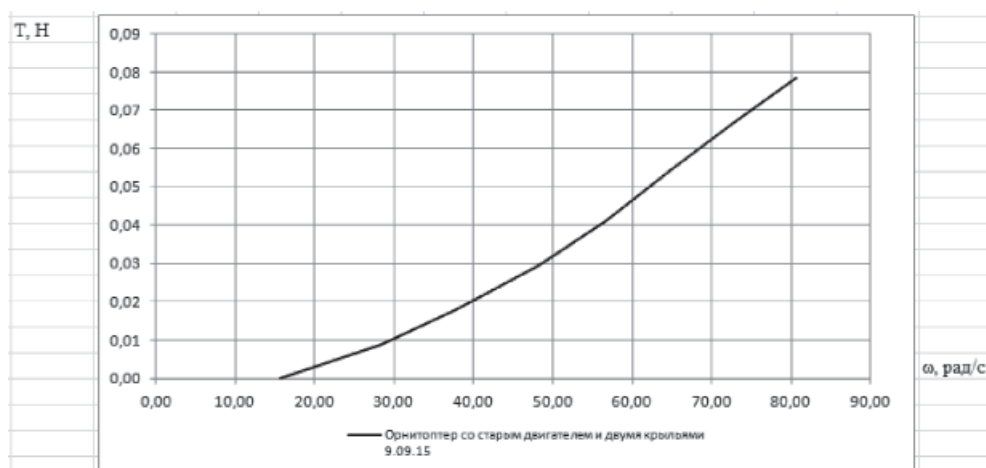


Рис. 3. Зависимость силы тяги от частоты колебаний крыльев

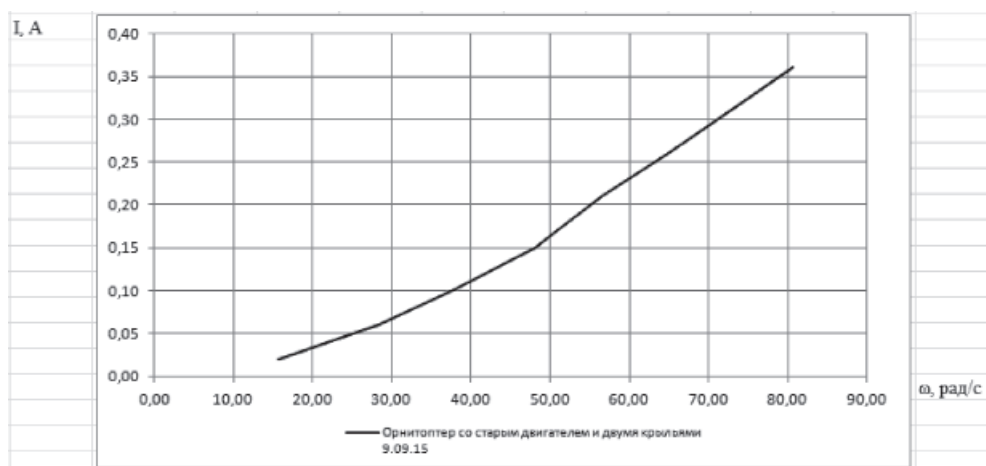


Рис. 4. Зависимость тока в обмотках электродвигателя от частоты колебаний крыльев

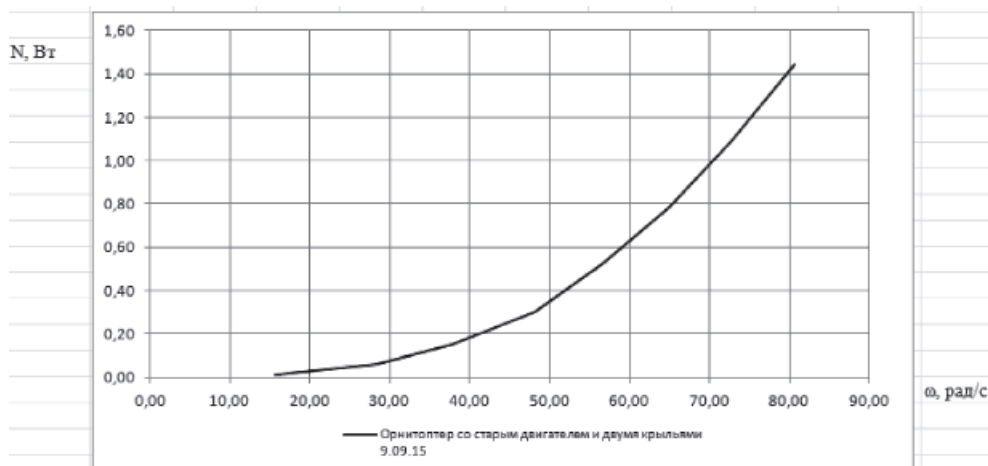


Рис. 5. Зависимость потребляемой мощности от частоты колебаний крыльев

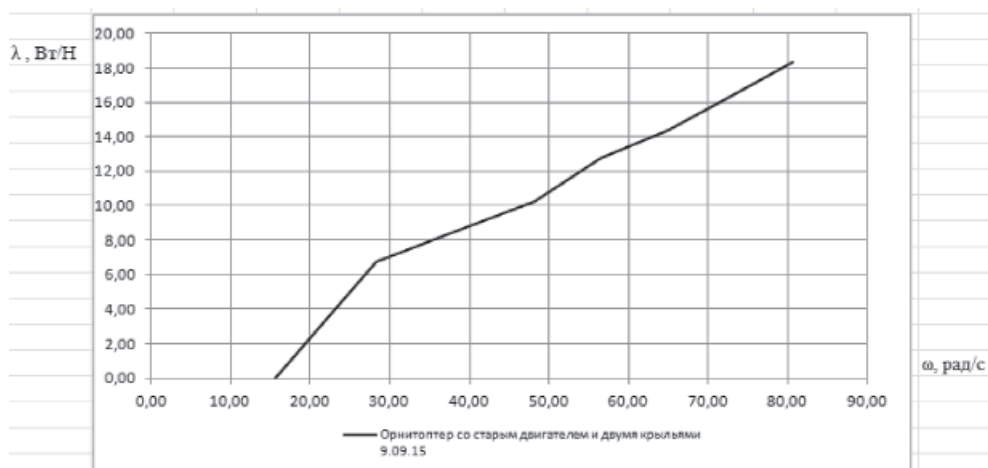


Рис. 6. Зависимость отношения потребляемой мощности к силе тяги от частоты колебаний крыльев

Выводы

1. Разработан и изготовлен экспериментальный комплекс, позволяющий изучать движение робота-инсектоптера, предложены методики, позволяющие определять тяговое усилие, подъемную силу, энергопотребление и ряд других параметров, определение которых экспериментальными методами не представляется возможным.

2. Установлено, что удельное энергопотребление электроприводом машущего крыла, определяемое как отношение потребляемой мощности к создаваемому тяговому усилию, практически линейно зависит от частоты колебаний крыла. Так если, в области низких частот до 30 1/с этот параметр равен примерно 6 Вт/Н, то в области высоких частот 80 1/с он достигает значений

18 Вт/Н, что соответствует энергопотреблению мультироторных систем.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ, проект № 14-08-00581.

Список литературы

1. Волкова Л.Ю. Динамические режимы разгона прыгающего аппарата / Л.Ю. Волкова, С.Ф. Яцун, О.Г. Локтионова, А.В. Ворочаев // XXV Международная инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС-2013): труды конференции. – М., 2013. – С. 61–65.
2. Попов Н.И., Емельянова О.В., Яцун С.Ф., Савин А.И. Исследование колебаний квадрокоптера при внешних периодических воздействиях // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 1. – С. 28–32.
3. Яцун С.Ф. Исследование динамики робота, перемещающегося с отрывом от поверхности / С.Ф. Яцун, Л.Ю. Волкова, А.В. Ворочаев // МИКМУС-2011: материалы XXIII Международной инновационно-ориентированной конференции молодых ученых и студентов. – М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2011. – С. 145.

4. Caprari G., Siegwart R. Mobile micro-robots ready to use: Alice // In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. – 2005. – P. 3295–3300.

5. Wile G.D., Daltorio K.A., Diller E.D., Palmer L.R., Gorb S.N., Ritzmann R.E., Quinn R.D. Screenbot: Walking inverted using distributed inward gripping // In *Robotics and Automation, IEEE International Conference on*. – 2008. – P. 1513–1518.

6. Sibley G.T., Rahimi M.H., Sukhatme G.S. Robomote: A tiny mobile robot platform for large-scale ad-hoc sensor networks // In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. – 2002. – P. 1143–1148.

7. Burdick J., Fiorini P. Minimalist jumping robot for celestial exploration // *The International Journal of Robotics Research*. – 2003. – № 22(7). – P. 653–674.

8. Roberts J.F., Zufferey J.-C., Floreano D. Energy management for indoor hovering robots // In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. – 2008. – P. 1242–1247.

9. Zufferey J.-C., Klapotcz A., Beyeler A., Nicoud J.-D., Floreano D. A 10-gram vision-based flying robot // *Advanced Robotics, Journal of the Robotics Society of Japan*. – 2007. – № 21(14). – P. 1671–1684.

10. Klapotcz G., Boutinard Rouelle A., Briod J.-C., Zufferey Floreano D. An indoor flying platform with collision robustness and self-recovery // In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. – 2010.

11. Fenelon M.A. Biomimetic flapping wing aerial vehicle. In Proceedings of the 2008 IEEE International // Conference on Robotics and Biomimetics. – Bangkok, Thailand, 21–26 February 2009. – P. 1053–1058. IEEE, 2009.

12. Oppenheimer M., Doman D., Sightorsson D. Dynamics and control of a biomimetic vehicle using biased wingbeat forcing functions // *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 34(1): pp. 204–217, 2011.

13. Dudley R. *The Biomechanics of Insect Flight: Form, Function, Evolution*. Princeton University Press, Princeton, NJ, 2000.

14. Fukui R., Torii A., Ueda A. Micro robot actuated by rapid deformation of piezoelectric elements. In *International Symposium on Micromechanics and Human Science*, P. 117–122, 2001.

15. Fearing R.S., Chiang K.H., Dickinson M.H., Pick D.L., Sitti M., Yan J. Wing transmission for a micromechanical flying insect // In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. – 2000. – P. 1509–1516.

16. Deng X., Schenato L., Wu W., Sastry S. Flapping flight for biomimetic robot insects: Part i – system modeling // *IEEE Transactions on Robotics*, 22(4), August 2006.

References

1. Volkova L.Ju. Dinamicheskie rezhimy razgona pryga-jushhego apparata / L.Ju. Volkova, S.F. Jatsun, O.G. Loktionova, A.V. Vorochaev // XXV Mezhdunarodnaja innovacionno-orientirovannaja konferencija molodyh uchenyh i studentov (MIKMUS-2013): trudy konferencii. M., 2013. pp. 61–65.

2. Popov N.I., Emelianova O.V., Jatsun S.F., Savin A.I. Issledovanie kolebanij kvadrokoptera pri vneshnih periodicheskikh vozdeystvijah // *Fundamental'nye issledovanija*. 2014. no. 1. pp. 28–32.

3. Jatsun S.F., Issledovanie dinamiki robota, peremeshhajushhegosja s otrivom ot poverhnosti / S S.F. Jatsun, L.Ju. Volkova, A.V. Vorochaev // MIKMUS-2011: materialy

HHIII Mezhdunarodnoj innovacionno-orientirovannoj konferencii molodyh uchenyh i studentov. Moskva: Izd-vo IMASH RAN, 2011. pp. 145.

4. Caprari G., Siegwart R. Mobile micro-robots ready to use: Alice. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 3295– 3300, 2005.

5. Wile G.D., Daltorio K.A., Diller E.D., Palmer L.R., Gorb S.N., Ritzmann R.E., Quinn R.D. Screenbot: Walking inverted using distributed inward gripping. In *Robotics and Automation, IEEE International Conference on*, pages 1513–1518, 2008.

6. Sibley G.T., Rahimi M.H., Sukhatme G.S. Robomote: A tiny mobile robot platform for large-scale ad-hoc sensor networks. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1143–1148, 2002.

7. Burdick J., Fiorini P. Minimalist jumping robot for celestial exploration. *The International Journal of Robotics Research*, 22(7): 653–674, 2003.

8. Roberts J.F., Zufferey J.-C., Floreano D. Energy management for indoor hovering robots. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1242–1247, 2008.

9. Zufferey J.-C., Klapotcz A., Beyeler A., Nicoud J.-D., Floreano D. A 10-gram vision-based flying robot. *Advanced Robotics, Journal of the Robotics Society of Japan*, 21(14): 1671–1684, 2007.

10. Klapotcz, G. Boutinard Rouelle, A. Briod, J.-C. Zufferey, and D. Floreano. An indoor flying platform with collision robustness and self-recovery. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2010.

11. Fenelon M.A.A. Biomimetic flapping wing aerial vehicle. In Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Bangkok, Thailand, 21–26 February 2009, pp. 1053–1058. IEEE, 2009.

12. Oppenheimer M., Doman D., Sightorsson D. Dynamics and control of a biomimetic vehicle using biased wingbeat forcing functions. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 34(1): pp. 204–217, 2011.

13. Dudley R. *The Biomechanics of Insect Flight: Form, Function, Evolution*. Princeton University Press, Princeton, NJ, 2000.

14. Fukui R., Torii A., Ueda A. Micro robot actuated by rapid deformation of piezoelectric elements. In *International Symposium on Micromechanics and Human Science*, pp. 117–122, 2001.

15. Fearing R.S., Chiang K.H., Dickinson M.H., Pick D.L., Sitti M., Yan J. Wing transmission for a micromechanical flying insect. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1509–1516, 2000.

16. Deng X., Schenato L., Wu W., Sastry S. Flapping flight for biomimetic robot insects: Part i system modeling. *IEEE Transactions on Robotics*, 22(4), August 2006.

Рецензенты:

Локтионова О.Г., д.т.н., профессор, проректор по учебной работе, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск;

Кобелев Н.С., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск.