

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЛОПАТОК С НЕСПЛОШНОЙ СТРУКТУРОЙ ДЛЯ ШАХТНЫХ ОСЕВЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ

Евгений Юрьевич Русский

ФГБУН Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, ул. Красный проспект, 54, к.т.н., с.н.с, тел. +7-913-753-62-14, e-mail: geomining@mail.ru

Павел Владимирович Косых

ФГБУН Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, ул. Красный проспект, 54, к.т.н., м.н.с, тел. +7-983-131-93-80, e-mail: intruder-1961@mail.ru

Настоящая работа посвящена вопросу разработки конструкции лопаток рабочего колеса, удовлетворяющих условиям прочности при окружной скорости по концам лопаток более 140 м/с. Вследствие высоких скоростей вращения литые лопатки не обладают требуемой прочностью, поэтому необходимо разработать облегченную конструкцию, позволяющую поднять скорости вращения ротора вентилятора. Проектирование лопаток для шахтных осевых вентиляторов. Методом конечных элементов, реализованном в программном комплексе ANSYS, выполнены расчеты прочности лопаток различной сотовой структуры, получены зависимости распределений напряжений и деформаций от скорости вращения ротора. Выполнение сердечника лопатки рабочего колеса осевого вентилятора серии ВОД в виде сотовой структуры из алюминиевого сплава АК7 позволяет увеличить скорость вращения ротора в 1.8 раза, и, следовательно, во столько же раз увеличить производительность вентилятора.

Ключевые слова: метод конечных элементов, ANSYS, сотовые лопатки, шахтные вентиляторы, напряжения.

STRESS-STRAIN BEHAVIOR OF BLADES WITH NON-ENTIRE STRUCTURE FOR MINE AXIS FLOW FAN

Evgeny Yu. Russky

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: +7-913-753-62-14, e-mail: geomining@mail.ru

Pavel V. Kosykh

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Junior Researcher, phone: +7-983-131-93-80, e-mail: intruder-1961@mail.ru

The work is devoted to development issue of construction of working wheel blades satisfying conditions of strength when peripheral speed at end of the blades is more than 140 m/s. Due to high rotational speeds cast blades do not have required strength, therefore it is important to develop light-weight construction allowing to increase rotational speed of fan rotor. The calculations of strength of blades with various honeycomb structure are carried out with finite-element method at software. Dependences of stress and strain distributions on rotational speed of the rotor. Development of core rod of working wheel blade of axis flow fan of VOD series in form of honeycomb structure from aluminum alloy AK7 allows to increase rotational speed of the fan in 1.8 times. Consequently, it allows to increase productivity of the fan in the same times.

Key words: finite-element method, ANSYS, honeycomb blades, mine fans, stresses.

Введение

С ростом производительности горнодобывающих предприятий растет их потребность в воздухе, который необходимо подавать в подземные выработки главными вентиляторными установками (ГВУ). Например, с повышением производительности угольных комбайнов и увеличением длины лавы, значительно увеличивается количество метана, выделяющегося как в зоне работы комбайна, так и из отбитого угля, находящегося на конвейерной ленте [1, 2]. Для разбавления высокой концентрации метана требуется подавать в лаву значительно больше воздуха, чем в то время, когда работало менее производительное оборудование. Поэтому задача разработки и создания высокопроизводительных вентиляторов главного проветривания (ВГП) была и остается весьма актуальной.

В горнодобывающей отрасли России наиболее широкое распространение получили осевые ВГП. Их производительность, в основном, определяется диаметром рабочего колеса и скоростью вращения ротора. Перед разработчиками ВГП стоит задача создания осевых вентиляторов повышенной производительности при условии, что их типоразмеры соответствуют ряду эксплуатируемых вентиляторов, т.е. 1,6 – 4,0 м. Эта задача решается путем увеличения скорости вращения рабочего колеса. При этом возникают задачи, связанные с повышением прочности как корпуса рабочего колеса, так и самих рабочих лопаток [3]. Настоящая работа посвящена вопросу разработки конструкции лопаток рабочего колеса, удовлетворяющих условиям прочности при окружной скорости по концам лопаток более 140 м/с.

Методы и материалы

Наиболее распространенными осевыми ВГП, эксплуатирующимися с 80-х годов прошлого века на горнодобывающих предприятиях РФ, являются вентиляторы серии ВОД [4, 5]. Окружная скорость по концам рабочих лопаток составляет 78,5 м/с. Лопатки выполнены в виде сварно-клепанной стальной конструкции. Такие лопатки имеют большую массу. Поэтому при увеличении скорости их вращения значительно возрастает сила инерции. Это, в свою очередь, ведет к необходимости усиления корпуса рабочего колеса, и, следовательно, к увеличению его массы и увеличению момента инерции [6].

Таким образом, для повышения производительности вентиляторов путем увеличения скорости вращения необходимо уменьшать массу рабочих лопаток. Поэтому лопатки стали изготавливать методом литья из алюминиевых сплавов. Это позволило повысить окружную скорость лопаток до 100–105 м/с.

В табл. 1 представлены характеристики алюминиевых сплавов, из которых возможно изготовление лопаток [7, 8]. Предел прочности значительно зависит от технологических режимов литья и термообработки.

Характеристика материала лопатки

Параметр	Значение параметра
Модуль упругости E , Па	$69 \cdot 10^9$
Коэффициент Пуассона μ	0.27
Предел прочности σ_B , МПа	185-485 (в зависимости от поставки)
Предел текучести σ_T , МПа	95-415 (в зависимости от поставки)

Дальнейшее увеличение скорости вращения рабочего колеса до 140–150 м/с требует более дорогих материалов для рабочих лопаток с $\sigma_T > 300$ МПа, что существенно удорожает стоимость вентилятора. Предлагается для создания рабочих лопаток использовать сотовую структуру сердечника, которая представлена на рис. 1.

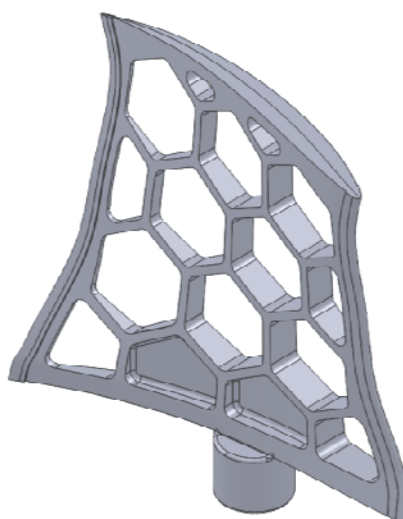


Рис. 1. Рабочая лопатка вентилятора с сотовой структурой

Рассмотрим эффективность использования таких лопаток на практике, на примере одной из шахт Кузбасса.

Требуемые аэродинамические параметры можно достичь путем модернизации вентиляторов ВОД-40 [9-11]. Суть модернизации сводится к замене двухступенчатого ротора на одноступенчатый и замене электродвигателя на более скоростной, рис. 2. При замене ротора проектируется новое рабочее колесо с рабочими лопатками, разработанными под конкретные аэродинамические характеристики вентиляционной сети шахты, что позволяет получить достаточно высокий КПД (0.8-0.9).

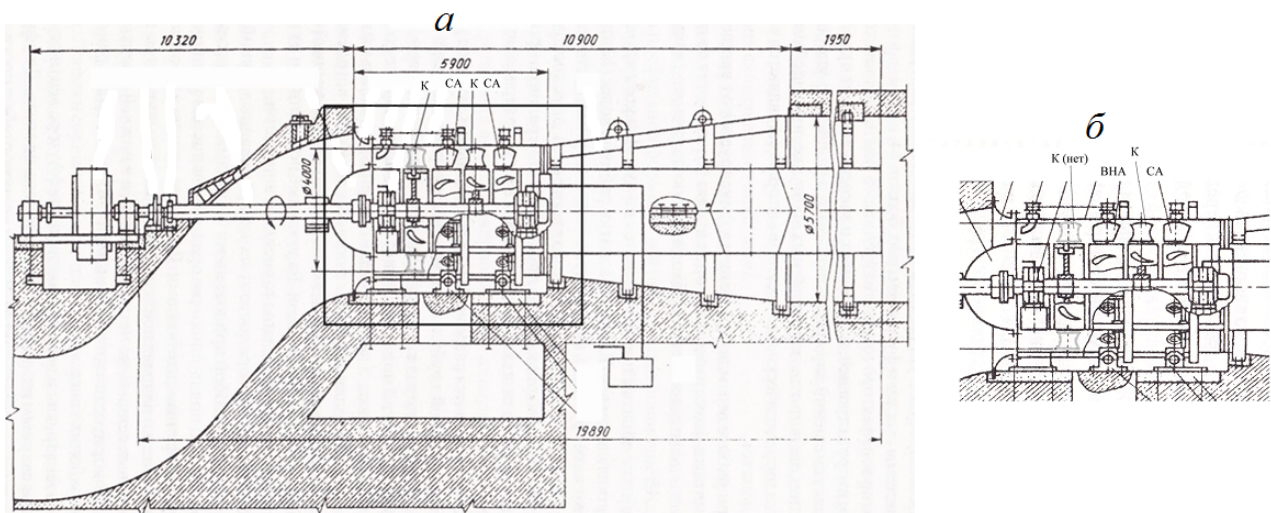


Рис. 2. Вентильатор ВОД 40:
а) до модернизации; б) после модернизации

Результаты

Исследуем напряженно-деформированное состояние рабочей лопатки вентильатора ВОД-40, отлитой из алюминиевого сплава АК7. Расчеты выполнены в программном комплексе ANSYS [12-14], основанном на методе конечных элементов [15-17]. Использовались объемные конечные элементы, имеющие форму тетраэдра, с десятью узлами по три степени свободы в узле. На рис. 3 показано распределение напряжений по Мизесу [18, 19] в рабочей лопатке, а на рис. 4 зависимости максимальных напряжений по Мизесу в лопатке от частоты вращения ротора.

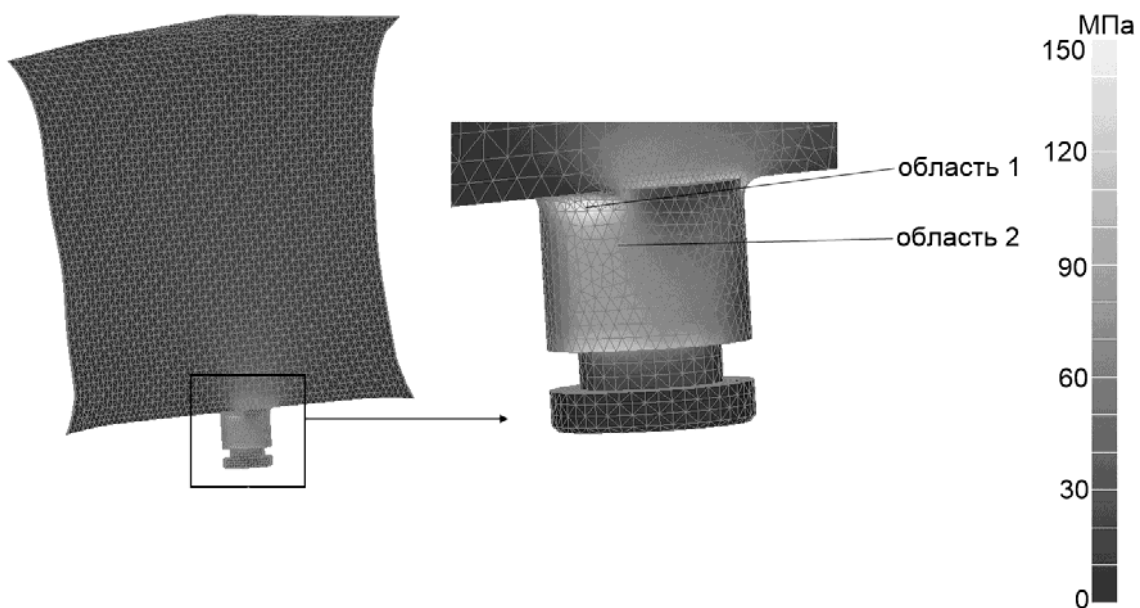


Рис. 3. Распределение напряжений в рабочей лопатке вентильатора ВОД-40

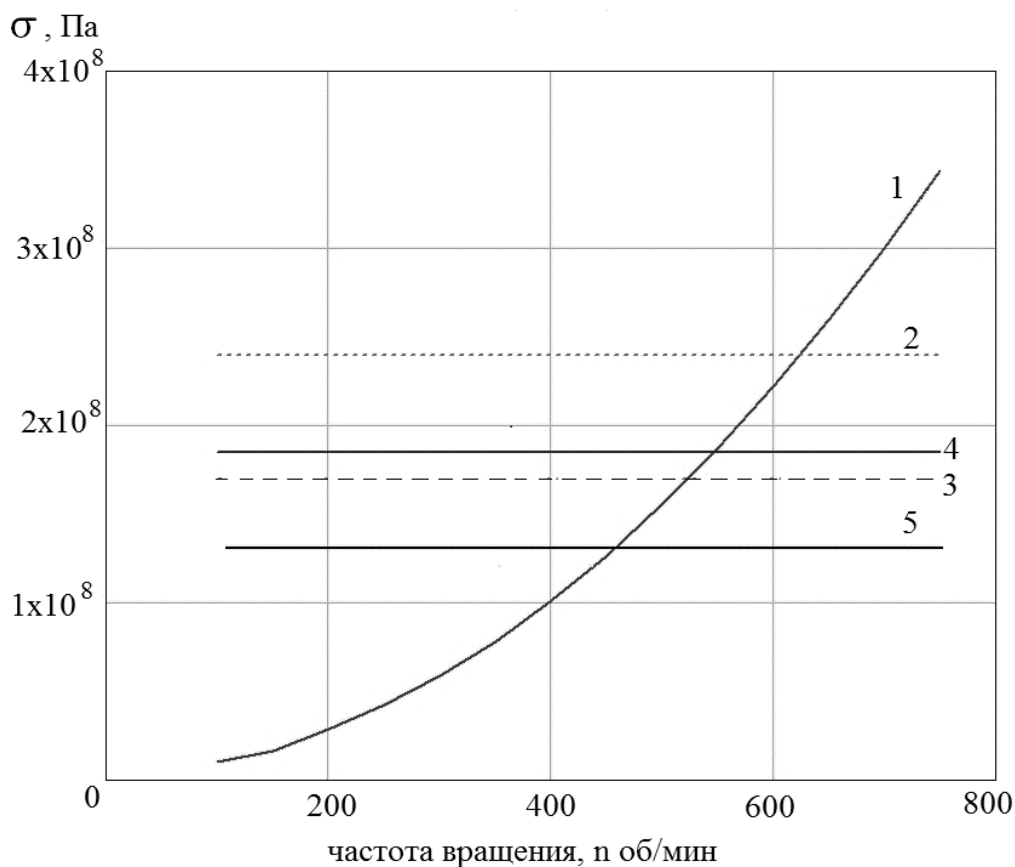


Рис. 4. Зависимости максимальных напряжений в лопатке от частоты вращения ротора:

1 – зависимость напряжений от частоты; 2 – напряжения σ_B ; 3 – напряжения σ_T ; 4 – допускаемые разрушающие напряжения; 5 – допускаемые напряжения текучести

Анализ графиков показывает, что по критерию прочности, с учетом коэффициентов запаса, предельная частота вращения ротора вентилятора со сплошными лопатками равна 460 об/мин. Это не удовлетворяет требуемой частоте вращения модернизированного вентилятора – 510 об/мин, так как именно при этой частоте достигаются необходимые аэродинамические параметры вентилятора.

Проведем исследование напряженно-деформированного состояния лопатки с сотовой структурой сердечника, показанной на рис. 1. Расчеты выполнены в программном комплексе ANSYS. На рис. 5 показано распределение эквивалентных по Мизесу напряжений на рабочей и вспомогательной поверхностях лопатки, а на рис. 6 – распределение напряжений в лопатке в сотовой структуре сердечника.

Исследования НДС показали, что новая лопатка обеспечивает необходимый запас прочности при скоростях вращения до $n = 700$ об/мин (146 м/с). Таким образом, допускаемая окружная скорость по концам рабочих лопаток в 1,8 раза выше, чем у серийных машин [20].

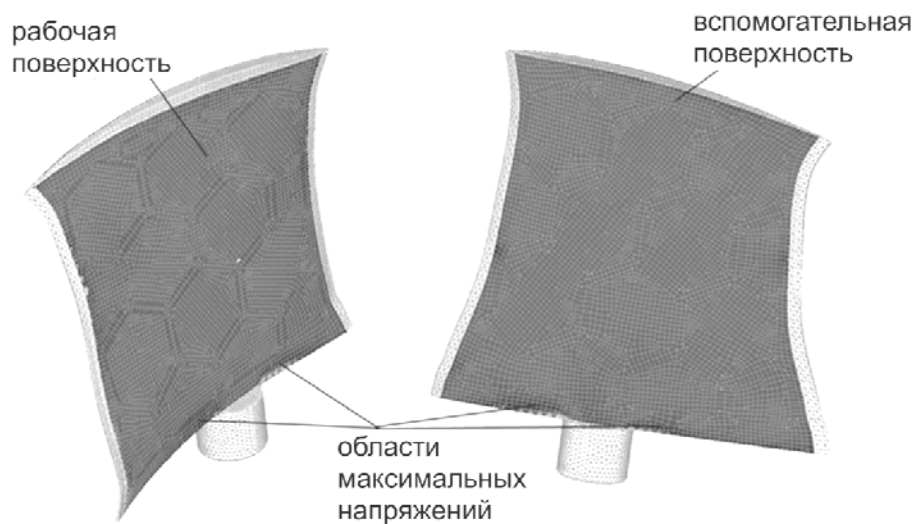


Рис. 5. Характер распределения напряжений в лопатке, на рабочей и вспомогательной поверхностях

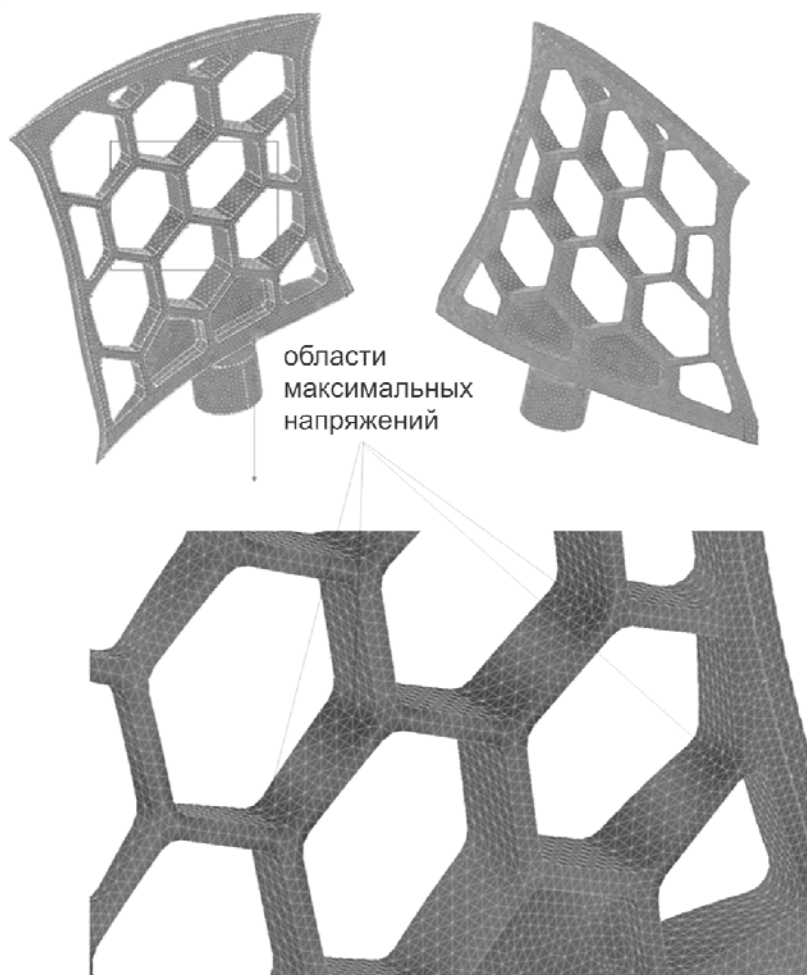


Рис. 6. Характер распределения напряжений в лопатке на сотовой структуре

Заключение

Выполнение сердечника лопатки рабочего колеса осевого вентилятора серии ВОД в виде сотовой структуры из алюминиевого сплава позволяет увеличить скорость вращения ротора в 1,8 раза, следовательно, во столько же раз увеличится производительность вентилятора. Это обусловлено значительным снижением массы лопатки и, соответственно, нормальной силы инерции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ордин А. А., Тимошенко А. М. О снижении метановыделения из разрабатываемого угольного пласта при высоких скоростях подвигания очистного забоя // ФТПРПИ. – 2015. – № 4. – С. 123–129.
2. Лебедев А.В. Основные проблемы безопасности на предприятиях угольной промышленности России и пути их решения / А.В. Лебедев // Уголь. – 1998. – №9. – С. 59-61.
3. Красюк А.М., Русский Е.Ю. Исследования напряженно-деформированного состояния и частотных свойств рабочих колес осевых вентиляторов главного проветривания // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013.– № 8. – С. 152–156.
4. Красюк А. М., Лугин И. В. Исследование динамики воздушных потоков в метрополитене от возмущающего действия поездов // ФТПРПИ. – 2007. – № 6.
5. А.М. Krasnyuk, E.Y. Russky, N.A. Popov. Estimating strength of high-loaded impellers of large-size mine axial fans // Journal of Mining Science, 2012, Volume 48, Issue 2, pp 314-321. DOI 10.1134/S1062739148020128.
6. Пат. № 2484310 RU МПК F 04 D Рабочее колесо осевого вентилятора / А.М. Красюк, Е.Ю. Русский; ИГД СО РАН. - № 2484310; заяв. 27.04.2012; опубл. 10.06.2013, Бюл. № 16.
7. Болтон У. Конструкционные материалы. Металлы, сплавы, полимеры, керамика, композиты – Москва: Додэка XXI, 2007. – 320 с.
8. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Справочник по сопротивлению материалов. – Киев: Наук. думка, 1988.
9. Бабак Г. А. Шахтные вентиляторные установки главного проветривания. Справочник / Г. А. Бабак, К. П. Бочаров, А. Т. Волохов и др. // М.: Недра, 1982. – 296 с.
10. Красюк А. М. Тоннельная вентиляция метрополитенов. – Новосибирск: Наука, 2006.
11. E Yu Russky. Analysis of dynamic parameters of mine fans. –2018 – IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Volume 134. Conference 1. Art. 012051
12. Чигарев А.В. ANSYS для инженеров: Справ. пособие / А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк // М.: Машиностроение-1, 2004. – 512 с.
13. Чигарев А.В. ANSYS для инженеров. Справочное пособие / А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк // М.: Машиностроение, 2004. – 512 с.
14. Paul A. Durbin, Gorazd Medic. Fluid Dynamics with a Computational Perspective / Cambridge University Press. ISBN: 052185017, 2007.
15. Баженов В. А. Численные методы в механике. М.: Высшая школа, 2005. – 564 с.
16. Бахвалов Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков // М.: Наука, 2003. – 632 с.
17. Красюк А.М., Русский Е. Ю. Исследования напряженно-деформированного и вибрационного состояния сдвоенных рабочих лопаток осевых вентиляторов главного проветривания // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 6. – С. 192–200.

18. Russky, E. Yu. Research and engineering of aerodynamics and design parameters for axial fans with the various hub/tip diameter ratios / E. Yu. Russky, I. V. Lugin, P. V. Kosyh, E. L. Alferova, L. A. Kiyantsa // 16th international multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2016 (30 June – 6 July, Albena, Bulgaria): abstracts. – Albena, 2016. – Volume II. – С. 727–734.

19. Косых П.В., Красюк А.М., Русский Е.Ю. О влиянии частотно регулируемого электропривода на изгибные колебания ротора шахтного вентилятора // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук.* –2018. – Т. 5. – № 2. – С. 255–260.

20. Красюк А.М., Русский Е.Ю., Попов Н.А. К оценке прочности высоконагруженных рабочих колес крупных шахтных осевых вентиляторов // *ФТПРПИ.* – 2012. – № 2. – С. 104–112.

© *Е. Ю. Русский, П. В. Косых, 2019*