

Н.В. Макаров, В.Н. Макаров, И.А. Волежанин, А.В. Угольников

АДДИТИВНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АЭРОДИНАМИКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА ШАХТНЫХ РАДИАЛЬНЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ

На основе анализа информации о существующих методах и средствах повышения адаптивности шахтных вентиляторов устройствами регулирования их работы для максимизации адаптивности работы на шахтную сеть, предложена математическая модель радиального энергетического регулятора. Предложена конструкция радиального энергетического регулятора, реализующего данный способ управления аэродинамическими параметрами вентилятора. Математическая модель аэродинамики энергетического регулятора разработана на базе метода аддитивности, аналогичного принципу суперпозиции в условиях гидродинамической аналогии. Предложенная математическая модель течения потока в энергетическом регуляторе позволяет производить расчет геометрических параметров его конструкции при заданных условиях потребной глубины экономического регулирования шахтных вентиляторов. Проведены испытания радиального энергетического регулятора, реализующего данный способ управления аэродинамическими параметрами вентилятора. Предложенное устройство способствует снижению удельного энергопотребления вентиляторов на 8% и увеличению глубины регулирования по давлению на 15%, что эквивалентно годовому экономическому эффекту, соизмеримому со стоимостью вентилятора.

Ключевые слова: турбомшины, шахтный вентилятор, энергетический регулятор, аэродинамика, управляющий поток, регулирование режима работы турбомшины, адаптивность турбомашин.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-5-0-171-177

Вентиляционные режимы, изменяющиеся с течением времени, связанные с организационно-технологическими процессами на горном предприятии предъявляют к вентилятору жесткие требования высокой адаптивности, то есть способности экономично обеспечивать требуемый режим проветривания [1, 2].

Анализ существующих способов повышения адаптивности шахтных радиальных вентиляторов подтверждает высокие потенциальные возможности применения энергетических регуляторов (ЭР) [3–5].

Для разработки устройств управления циркуляцией необходимо установить зависимость между энергетическими характеристиками управляющего потока, параметрами ЭР, геометрией рабочего колеса и его аэродинамическими характеристиками.

Для аэродинамического расчета ЭР с радиальной решеткой профилей произвольной формы с закрученным управляющим потоком на входе наиболее целесообразен метод конформных отображений. Сущность данного метода заключается в использовании конформного

отображения области вне радиальной решетки профилей ЭР на некоторую вспомогательную более простую область, в частности на внешность круга единичного радиуса [6].

Указанная выше задача сведется к отысканию двух аналитических функций: функции отображения области течения, ограниченной радиальной решеткой профилей ЭР на внешность круга единичного радиуса и комплексного потенциала в плоскости данного круга. Однако непосредственное применение этого метода представляет определенные трудности ввиду наличия управляющего потока на входе в решетку профилей ЭР, что приводит к появлению дополнительных особенностей и необходимости установления условий однозначности в расчетах. Необходимо иметь в виду, что управляющий поток кинематически является циркуляционным и его энергетические параметры зависят от параметров и режимом работы вентилятора [7, 8].

Сложность задачи построения теории аэродинамики ЭР с конфузурной радиальной решеткой профилей произвольной формы заключается во взаимодействии энергетических характеристик управляющего потока на входе в ЭР с параметрами течения на входе в вентилятор. Кроме того, известные методы рассматривают теорию конфузурной радиальной решетки профилей без управляющего потока на входе, при которой осуществляются конформное отображения однолистной римановой области без сингулярной особенности решетки на внешность многолистной канонической области.

В рассматриваемой задаче, использование базового принципа конформного преобразования для построения канонического потенциала течения приводит к необходимости конформного однолистной многолистной римановой области конфузурной радиальной решетки профилей ЭР на многолистную каноническую область с сингулярной особенностью в виде внешнего вихря из бесконечности на плоскости течения однолистной римановой области. При этом необходимо получить комплексный потенциал течения на многолистной канонической области и доказать его единственность [9, 10].

Для построения математической модели аэродинамики ЭР в данной статье предложен метод аддитивности, аналогичный принципу суперпозиции в условиях гидродинамической аналогии.

ЭР, представляющие собой радиальную решетку аналитических профилей произвольной формы, согласно общей постановки задачи, в плоском случае с n_Λ профилями ставится в однолистной обтекаемый контур. Исследования проведены в предположении, что во всей области течения D_z на однолистной римановой поверхности течение стационарное и безвихревое, жидкость идеальная, несжимаемая, невесомая и константа Бернулли постоянна.

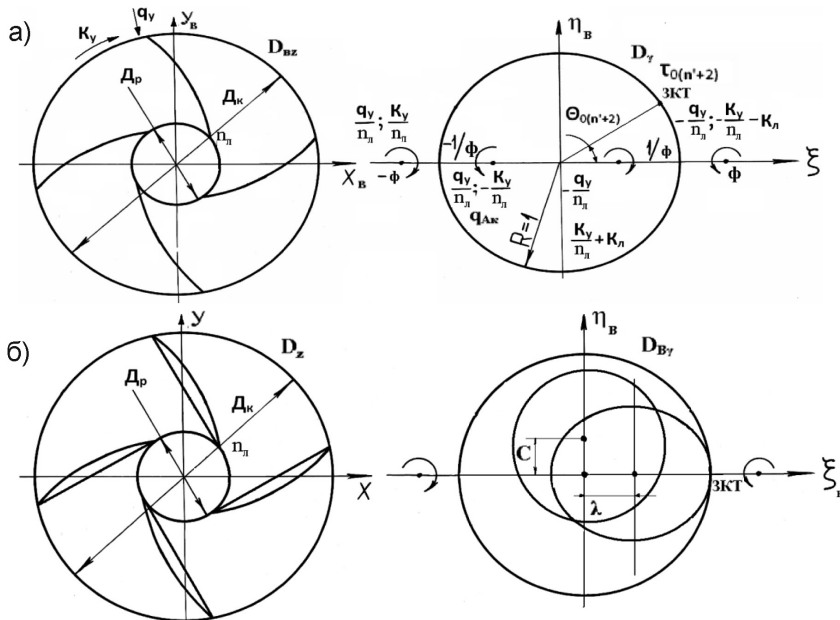
Точное решение задачи его обтекания несжимаемой жидкостью сводим к построению двух аналитических функций — функции $Z(\gamma)$ отображения внешности D_γ круга единичного радиуса на область течения D_z , ограниченную однолиственным контуром, и комплексного потенциала $F[z(\gamma)]$ в плоскости круга единичного радиуса. Для произвольного однолистного контура построение функции $Z(\gamma)$ требует дополнительного отображения области, деформированного круга на круг, аналогично используемому в методах расчета обтекания произвольного твердого профиля.

Поскольку профили круговой решетки ЭР представляют собой аналитические гладкие профили произвольной формы, то конформное отображение получаем в два этапа. На первом этапе определяем функцию конформного отображения n_Λ -листной римановой поверхности

внешности круга единичного радиуса D_γ , содержащую информацию об эквивалентной исходной решетке профилей ЭР, в виде трансформированной в круговую решетку, составленную из профилей в форме отрезков логарифмических спиралей, на внешность n_Λ -листной римановой поверхности D_{By} деформированного круга (овала), идентифицирующего геометрию исходной круговой решетки профилей. На втором этапе осуществляем конформное отображение внешности n_Λ -листной римановой поверхности деформированного круга в области D_{By} на однолиственную римановую поверхность D_z схематизированного контура ЭР в форме круговой решетки аналитических профилей произвольной формы (рисунок).

Применение метода конформного отображения для рассмотрения аэродинамики ЭР приводит к необходимости конформного отображения многостранный односвязной области на однолиственную

односвязную область [6, 9]. Поскольку в случае применения метода конформного отображения для исследования аэродинамики ЭР в форме радиальной решетки с n_Λ -профилями необходимо осуществить конформное отображение однолиственной римановой поверхности внешности круга единичного радиуса на однолиственную область контура схематизированной круговой решетки ЭР, то для обеспечения единственности решения необходимо добиться однозначности n_Λ -отображений на круге единичного радиуса. Так как в схематизированной радиальной решетке ЭР профили установлены с постоянным периодом, то для обеспечения однозначности отображения всей решетки выберем константы отображения таким образом, чтобы точки $z = 0$ и $z = \infty$ на области D_z перешли в две симметричные относительно начала координат точки $\gamma = \Phi$ и $\gamma = -\Phi$ на области D_γ .



Принципиальная схема последовательности конформных преобразований: преобразование n_Λ -листной области D_γ в n_Λ -лиственную область D_{By} (а); преобразование n_Λ -листной области D_{By} в $(n+1)$ -лиственную область D_z (б)

Elementary diagram of sequence of conformal transformations: transformation of n_Λ -sheet domain D_γ to n_Λ -sheet domain D_{By} (a); transformation of n_Λ -sheet domain D_{By} to $(n+1)$ -sheet domain D_z (b)

Формпараметр Φ характеризует исходную аэродинамическую нагруженность радиальной решетки профилей, являясь гидродинамическим аналогом ее безциркуляционного обтекания при нулевых расходах устройств управления $Q_{Ak} = 0$, и определяется геометрическими параметрами круговой решетки профилей.

Функции комплексного отображения $Z(\gamma)$ с использованием принципа гидродинамической аналогии путем в виде:

$$n_\lambda \ln z = \ln \frac{(\gamma + \Phi)}{(\gamma - \Phi)} + e^{2i\beta_\lambda + c} \ln \frac{(\gamma - \Phi_1^{-1} e^{i\theta_1})}{(\gamma - \Phi_2^{-1} e^{i\theta_2})}, \quad (1)$$

$$z = \left[\frac{(\gamma + \Phi)}{(\gamma - \Phi)} \right]^{n_\lambda} \left[\frac{(\gamma - \Phi_1^{-1} e^{i\theta_1})}{(\gamma - \Phi_2^{-1} e^{i\theta_2})} \right]^{\frac{(2i\beta_\lambda + c)}{n_\lambda}}, \quad (2)$$

где $z = re^{iv}$, $\gamma = \rho e^{i\theta}$ — комплексные координаты точек в областях D_z и D_γ соответственно; r, v — радиус и полярный угол на плоскости Z соответственно; ρ, θ — радиус и полярный угол на плоскости γ соответственно; Φ — формпараметр эквивалентной радиальной решетки профилей в виде отрезков логарифмических спиралей; β_λ — угол логарифмической спирали эквивалентной решетки профилей; $\gamma_1 = \Phi_1^{-1} e^{i\theta_1}$, $\gamma_2 = \Phi_2^{-1} e^{i\theta_2}$, $K_\Phi = e^{2i\beta_\lambda + c}$ — комплексные параметры, определяющие форму профиля исходной круговой решетки аналитических профилей.

Особые точки отображение γ_{01}, γ_{02} определяем из условия нарушения конформности

$$n_\lambda z_0^{-1} \frac{dz}{d\gamma_{\gamma=\gamma_0}} = \frac{2\Phi}{(\gamma_0^2 - \Phi^2)} + e^{2i\beta_\lambda + c} \frac{(\gamma_1 - \gamma_2)}{(\gamma_0 - \gamma_1)(\gamma_0 - \gamma_2)} = 0, \quad (3)$$

из которого для γ_0^2 получаем уравнение

$$\gamma_0^2 - \frac{[2\Phi(\gamma_1 + \gamma_2) + \Phi e^{2i\beta_\lambda + c} (\gamma_1 - \gamma_2)]}{[e^{2i\beta_\lambda + c} (\gamma_1 - \gamma_2) - 2\Phi]} +$$

$$+ \frac{2\Phi(\gamma_1 + \gamma_2)}{[e^{2i\beta_\lambda + c} (\gamma_1 - \gamma_2) - 2\Phi]} = 0 \quad (4)$$

С учетом уравнения (4) получим систему двух уравнений для определения γ_1 и γ_2 :

$$\gamma_1 = \frac{[(\gamma_{01} + \gamma_{02})(K_\Phi \gamma_2 + 2\Phi) - 2\Phi \gamma_2]}{[K_\Phi (\gamma_{01} + \gamma_{02}) + 2\Phi]};$$

$$\gamma_2^2 + \Phi \frac{[2\gamma_{01} \gamma_{02} - K_\Phi (\gamma_{01} + \gamma_{02})]}{[2\Phi - K_\Phi (\gamma_{01} - \gamma_{02})]} - 2\gamma_2 \frac{[\Phi(\gamma_{01} + \gamma_{02}) - (\Phi^2 + \gamma_{01} \gamma_{02}) K_\Phi]}{[2\Phi - K_\Phi (\gamma_{01} + \gamma_{02})]} = 0 \quad (5)$$

Таким образом, сформулирован математический аппарат построения комплексной функции $z(\gamma)$, осуществляющий конформное отображение n_λ -листной римановой поверхности внешности круга единичного радиуса области D_z на однолиственную римановую поверхность контура схематизированной круговой решетки ЭР с аналитическими профилями гладкой формы области D_z .

Для построения комплексного потенциала $F[Z(\gamma)]$ в однолистной римановой поверхности внешности круга единичного радиуса области D_γ воспользуемся методом аддитивности [6].

В условиях гидродинамической аналогии комплексный потенциал может быть построен методом аддитивности, то есть наложения с учетом того, что значение циркуляции по любой односвязной замкнутой линии, содержащей внутри себя круг единичного радиуса в области D_γ , в соответствии с теоремой Гельмгольца в данном случае с точностью до константы, равно циркуляции K_Φ вокруг однолистного контура круговой решетки профилей ЭР.

После соответствующих преобразований, комплексный потенциал течения $F[Z(\gamma)]$ получим в виде:

$$F[z(\gamma)] = \varphi[z(\gamma)] + i\psi_0[z(\gamma)] = \frac{q \ln \frac{(\gamma + \Phi)\left(\gamma + \frac{1}{\Phi}\right)}{(\gamma - \Phi)\left(\gamma - \frac{1}{\Phi}\right)} - \frac{K_H - n_\Lambda K_\Lambda \ln\left(\frac{\gamma - \frac{1}{\Phi}}{\gamma - \Phi}\right)}{i(\gamma - \Phi)} - \frac{iK_H \ln \frac{\gamma + \Phi}{\gamma + \frac{1}{\Phi}}}{\left(\gamma + \frac{1}{\Phi}\right)}}{2\pi n_\Lambda} \quad (6)$$

где q — коэффициент расхода стока направленного в центр радиальной решетки профилей ЭР в области D_z ; K_H — интенсивность вихря (циркуляция), с центром в круговой решетке профилей ЭР в области D_z , определяемая вращением потоков в полости высокого давления корпуса вентилятора на входе в ЭР; K_Λ — интенсивность вихря (циркуляция) вокруг профиля круговой решетки в плоскости D_z ; φ — функция потенциала течения в области D_γ ; ψ — функция тока (линия тока) течения в области D_γ .

Построенное решение при заданных q , K , K_Λ и локальных является с точностью до константы, единственным. Действительно, если положить, что решений два: $F_1[Z(\gamma)]$, $F_2[Z(\gamma)]$ и рассмотреть функцию $\Delta(\gamma) = F_1[Z(\gamma)] - F_2[Z(\gamma)]$, легко видеть, что эта функция — однозначная вне круга и что на круге и на бесконечности $Im\Delta(\gamma) = 0$. Отсюда, по теореме единственности решения задачи Дирихле—Неймана должно быть $Im\Delta(\xi) \equiv 0$, а значит $F_1[Z(\gamma)] - F_2[Z(\gamma)] \equiv const$. Теперь, учитывая единственность, с точностью до константы, решения для функции $F[Z(\gamma)] = W(\gamma)$ и условия единственности конформного отображения при заданном n_Λ -листном контуре получаем в результате, с точностью до константы, единственное решение задачи обтекания указанного однолистного контура круговой решетки аналитических профилей ЭР:

$$F(Z) = W[\gamma(Z)]. \quad (7)$$

Учитывая что комплексная скорость течения равна производной от комплексного потенциала, с учетом формулы (6) для определения положения задней кри-

тической точкой профиля круговой решетки, и, соответственно, единственного значения циркуляции K_Λ используем известную гипотезу Жуковского-Чаплыгина-Кутта. Полагая, что $\tau_3 = e^{i\theta_3}$ соответствует задней критической точке профиля, где нарушено условие конформности отображения $dz/d\gamma_{\tau_3} = 0$, с учетом (7) формула для расчета коэффициента циркуляции K_Λ примет вид:

$$K_\Lambda = \frac{4q\Phi(\Phi^2 + 1)\sin\theta_3}{n_\Lambda} \times (\Phi^2 - 1)(\Phi^2 - 2\Phi \cos\theta_{0(\bar{n}+2)} + 1) - \frac{4K_H\Phi \cos\theta_7}{n_\Lambda} (\Phi^2 + 2\Phi \cos\theta_3 + 1) \quad (8)$$

Таким образом, приведенные теоретические исследования позволяют решить задачу аэродинамики ЭР с радиальной решеткой аналитических профилей гладкой формы.

Полученные уравнения позволяют в обобщенном виде представить характеристики потенциального обтекания широкого класса ЭР с радиальными решетками профилей, установить наиболее характерные особенности и закономерности данного класса энергетических регуляторов, исследовать их эффективность, регулируемость и адаптивность центробежных вентиляторов. На базе предложенной математической модели спроектирован радиальный энергетический регулятор (РЭР 81-95). Проведенные аэродинамические испытания показали его высокую эффективность, позволив увеличить глубину экономичного регулирования радиального вентилятора на 15%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров Н. В. Обоснование параметров и разработка энергетических регуляторов шахтных центробежных вентиляторов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. — Екатеринбург: УГГУ, 2008. — 155 с.
2. Макаров Н. В., Патракеева И. Ю., Костюк П. А. Динамика вентиляционных режимов вентиляторов местного проветривания // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 4. — С. 62–67.
3. Макаров В. Н., Агушев В. А., Ковыров Е. И. Повышение эффективности шахтных центробежных вентиляторов главного проветривания / Горные машины. Сборник научных трудов. — Свердловск: НИПИГормаш, 1982. — С. 121–127.
4. Макаров Н. В., Белов С. В., Фомин В. И., Макаров В. Н., Волков С. А. Патент РФ № 2390657, 02.04.2008. Центробежный вентилятор. 2009 г. Бюл. № 28.
5. Макаров Н. В., Солдатенко А. А., Лаврѐнов Н. Е, Макаров В. Н. Центробежные вентиляторы местного проветривания с энергетическими регуляторами // Известия Уральского государственного горного университета. — 2015. — № 4 (40). — С. 79–83.
6. Лойцанский Л. Г. Механика жидкости и газа. — М.: Наука, 2003. — 846 с.
7. Макаров Н. В., Макаров В. Н., Волежанин И. А. Энергетические регуляторы для шахтных вентиляторов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 4. С. 47–53.
8. Макаров Н. В. Особенности течения в круговой решетке профилей с вихресточником в критических точках // Известия УГГУ. — 2010. — Вып. 24. — С. 99–101.
9. Макаров Н. В., Макаров В. Н. Теоретические основы проектирования шахтных радиально-вихревых прямоточных вентиляторов // Научный вестник МГГУ. — 2011. — № 3 (12). — С. 59–67.
10. Макаров Н. В., Белов С. В., Макаров В. Н. Расчет параметров энергетических регуляторов шахтных вентиляторов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2012. — № 7. — С. 203–206.
11. Макаров Н. В., Шавлов Е. Н., Макаров В. Н. Аэродинамический расчет энергетического регулятора вентиляторов местного проветривания / Чтения памяти В. Р. Кубачека. Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. 16–17 апреля 2015 г. — Екатеринбург: УГГУ, 2015. — С. 81–85.
12. Макаров В. Н., Фомин В. И., Волков С. А. Оптимизация параметров энергетических регуляторов // Известия Уральского государственного горного университета. — 2008. — № 23. — С. 99–102. 

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Макаров Николай Владимирович¹ — кандидат технических наук, зав. кафедрой, e-mail: mnikolay84@mail.ru.

Макаров Владимир Николаевич¹ — доктор технических наук, профессор,

Волежанин Иван Александрович¹ — аспирант,

Угольников Александр Владимирович¹ — кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой,

¹ Уральский государственный горный университет.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 5, pp. 171–177.

N.V. Makarov, V.N. Makarov, I.A. Volegzhnin, A.V. Ugolnikov

ADDITIVE MATHEMATICAL MODEL OF AERODYNAMICS IN ENERGY ADAPTOR OF RADIAL-FLOW FANS IN MINES

Ventilation installations are the most important element in the technological chain of health safety control in mines. Deep mine ventilation, especially with fans operating concurrently, is best supported by double-sided centrifugal fans featuring higher aerodynamic load in combination with

enhanced capacity, lower acoustic power, easy servicing and operating reliability. Ventilation modes, varied with time and connected with organization of mining processes, require highly adaptable fans capable of economically efficient maintenance of required airing regime. On the other hand, the centrifugal fans equipped with axial or vortex distributors offer worse adaptability ($\Gamma\psi = 0.55$) as compared with the axial fans with rotating blades of impellers ($\Gamma\psi = 0.7$). Based on the review of the current methods and means for the improvement of mine fan adjustability using different controllers to maximize mine fan adaptability to mine ventilation regimes, this article presents the mathematical model of a radial energy adaptor. The design of the radial energy adaptor allows adjusting aerodynamic parameters of fans. The mathematical model of the energy adaptor aerodynamics is based on the additivity principle similar to the principle of superposition in hydrodynamics. The new mathematical model of flow in the energy adaptor makes it possible to calculate geometrical parameters of the adaptor for the pre-set conditions of efficient adjustment of mine fans. The radial energy adaptor for aerodynamic parameters of mine fans has been trialed. The proposed device enables reduction in energy consumption of fans by 8 % and improvement of pressure adjustment by 15%, which is equivalent to the annual economic benefit comparable with the fan price.

Key words: turbomachines, mine fan, energy adaptor, aerodynamics, governing flow, turbomachine operation mode adjustment, turbomachine adjustability, turbomachine efficiency.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-5-0-171-177

AUTHORS

Makarov N.V.¹, Candidate of Technical Sciences,
Head of Chair, e-mail: mnikolay84@mail.ru,
Makarov V.N.¹, Doctor of Technical Sciences, Professor,
Volegzhanin I.A.¹, Graduate Student,
Ugolnikov A.V.¹, Candidate of Technical Sciences,
Assistant Professor, Head of Chair,
¹ Ural State Mining University,
620144, Ekaterinburg, Russia.

REFERENCES

1. Makarov N. V. *Obosnovanie parametrov i razrabotka energeticheskikh regulyatorov shakhtnykh tsestrobeznykh ventilyatorov* (Substantiation of parameters and development of power regulators of mine centrifugal fans), Doctor's thesis, Ekaterinburg, UGGU, 2008, 155 p.
2. Makarov N.V., Patrakeeva I.Yu., Kostyuk P.A. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2016, no 4, pp. 62–67.
3. Makarov V.N., Agushev V.A., Kovyrov E.I. *Gornye mashiny. Sbornik nauchnykh trudov* (Mining machine. Collection of proceedings), Sverdlovsk, NIPiGormash, 1982, pp. 121–127.
4. Makarov N.V., Belov S.V., Fomin V.I., Makarov V.N., Volkov S.A. *Patent RU 2390657*, 02.04.2008.
5. Makarov N.V., Soldatenko A.A., Lavrenov N. E, Makarov V. N. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. 2015, no 4 (40), pp. 79–83.
6. Loytsanskiy L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* (Mechanics of fluid and gas), Moscow, Nauka, 2003, 846 p.
7. Makarov N.V., Makarov V.N., Volegzhanin I.A. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2016, no 4, pp. 47–53.
8. Makarov N.V. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. 2010, issue 24, pp. 99–101.
9. Makarov N.V., Makarov V.N. *Nauchnyy vestnik MGGU*. 2011, no 3 (12), pp. 59–67.
10. Makarov N.V., Belov S.V., Makarov V.N. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2012, no 7, pp. 203–206.
11. Makarov N.V., Shavlov E.N., Makarov V.N. *Tekhnologicheskoe oborudovanie dlya gornoy i neftegazovoy promyshlennosti. Chteniya pamyati V.R. Kubacheka*. 16–17 aprelya 2015 g. (Technological equipment for mining and oil and gas industry. Reading memory V.R. Kubachek. April 16–17, 2015), Ekaterinburg, UGGU, 2015, pp. 81–85.
12. Makarov V.N., Fomin V.I., Volkov S.A. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. 2008, no 23, pp. 99–102.