

УДК 622.452

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2022

**Исследование влияния аэродинамических процессов в шахтном стволе с канатной арматурой на колебания движущегося скипа****М.А. Семин, С.В. Мальцев, Е.В. Колесов**

Горный институт Уральского отделения Российской академии наук (Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а)

Study of the influence of aerodynamic processes in a mine shaft with cable reinforcement on vibrations of a moving skip**Mikhail A. Semin, Stanislav V. Maltsev, Evgeny V. Kolesov**

Mining Institute of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (78a Sibirskaya st., Perm, 614007, Russian Federation)

Получена / Received: 22.04.2022. Принята / Accepted: 18.11.2022. Опубликовано / Published: 22.12.2022

Ключевые слова:

рудник, рудничная вентиляция, скиповый ствол, расход воздуха, нестационарное воздушораспределение, турбулентное течение воздуха, колебания скипов, канатная арматура, обтекание тел потоком, аэродинамическая сила, динамические сетки, численное моделирование, вычислительная гидроаэродинамика, метод конечных объемов, пограничный слой.

Проведено исследование нестационарного воздушораспределения, возникающего в скиповом стволе с канатной арматурой при движении по нему двух подъемных сосудов. Теоретический анализ воздушораспределения проводился с помощью численного моделирования нестационарного турбулентного течения воздушного потока на участке ствола в программном комплексе Ansys Fluent. Для описания движения скипов использовался подход динамических сеток, основанный на деформировании и перестроении внутренних ячеек сетки в процессе расчета. Исходя из рассчитанного нестационарного распределения аэродинамических параметров, около движущихся скипов вычислялись суммарные аэродинамические силы, действующие на скипы. Они использовались далее для анализа горизонтальных колебаний скипов с учетом ограничений, накладываемых подъемными, уравновешивающими и направляющими канатами. В рамках принятых модельных упрощений получено, что максимальные значения аэродинамических сил, действующих на скипы, наблюдаются для промежутка времени, соответствующего прохождению двух скипов друг около друга, – в этом случае максимально перекрывается сечение шахтного ствола. Кратковременное возрастание аэродинамической силы, действующей на скип в этот промежуток времени, приводит к появлению колебаний скипа в горизонтальной плоскости. Показано, что максимальная величина пика горизонтальной компоненты аэродинамической силы существенно зависит от учета движения скипов. Это указывает, что анализ колебаний скипов в стволе в предположении о мгновенно покоящихся скипах является некорректным. Далее, исходя из рассчитанных аэродинамических нагрузок на скипы в ходе серии численных экспериментов, определены максимальные горизонтальные смещения каждого из скипов как функции скорости воздуха в стволе. На основании полученных смещений построены аппроксимирующие зависимости для максимальных смещений скипа в зависимости от его массы и средней скорости воздуха в стволе.

Keywords:

mine, mine ventilation, skip shaft, air consumption, non-stationary air distribution, turbulent air flow, skip vibrations, rope reinforcement, flow around bodies, aerodynamic force, dynamic meshes, numerical modeling, computational fluid dynamics, finite volume method, boundary layer.

A study of non-stationary air distribution that occurs in a skip shaft with rope reinforcement when two lifting vessels move along it was made. The theoretical analysis of air distribution was carried out using numerical simulation of an unsteady turbulent air flow in the shaft section using the Ansys Fluent software package. To describe the movement of skips, the dynamic grid approach was used, based on the deformation and rebuilding of internal grid cells during the calculation process. Based on the calculated non-stationary distribution of aerodynamic parameters near the moving skips, the total aerodynamic forces acting on the skips were calculated. They were used further to analyze the horizontal vibrations of the skips, taking into account the restrictions imposed by the lifting, balancing and guide ropes. Within the framework of the accepted model simplifications, it was obtained that the maximum values of the aerodynamic forces acting on the skips were observed for the time interval corresponding to the passage of two skips next to each other, in this case the section of the mine shaft overlapped to the maximum. A short-term increase in the aerodynamic force acting on the skip during this period of time led to the appearance of skip oscillations in the horizontal plane. It was shown that the maximum peak value of the horizontal aerodynamic force component significantly depended on the allowance for the movement of skips. This indicated that the analysis of skip oscillations in the wellbore under the assumption of instantaneously resting skips was incorrect. Further, based on the calculated aerodynamic loads on the skips in the course of a series of numerical experiments, the maximum horizontal displacements of each of the skips were determined as a function of the air velocity in the shaft. On the basis of the displacements obtained, approximating dependences for the maximum displacements of the skip were constructed depending on its mass and the average air velocity in the shaft.

© Семин Михаил Александрович – кандидат технических наук, научный сотрудник (тел.: +007 (909) 106 20 67, e-mail: seminma@inbox.ru). Контактное лицо для переписки.© Мальцев Станислав Владимирович – кандидат технических наук, заведующий сектором (тел.: +007 (909) 106 20 67, e-mail: stasmalcev32@gmail.com).© Колесов Евгений Викторович – младший научный сотрудник (тел.: +007 (909) 106 20 67, e-mail: kolesovev@gmail.com).© Mikhail A. Semin (Author ID in Scopus: 56462570900) – PhD in Engineering, Researcher (tel.: +007 (909) 106 20 67, e-mail: seminma@inbox.ru). The contact person for correspondence© Stanislav V. Maltsev (Author ID in Scopus: 57215839650) – PhD in Engineering, Head of the Sector (tel.: +007 (909) 106 20 67, e-mail: stasmalcev32@gmail.com).© Evgeny V. Kolesov (Author ID in Scopus: 57213155757) – Junior Researcher (tel.: +007 (909) 106 20 67, e-mail: kolesovev@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Семин М.А., Мальцев С.В., Колесов Е.В. Исследование влияния аэродинамических процессов в шахтном стволе с канатной арматурой на колебания движущегося скипа // Недропользование. – 2022. – Т.22, №4. – С.192-200. DOI: 10.15593/2712-8008/2022.4.7

Please cite this article in English as:

Semin M.A., Maltsev C.V., Kolesov E.V. Study of the influence of aerodynamic processes in a mine shaft with cable reinforcement on vibrations of a moving skip. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2022, vol.22, no.4, pp.192-200. DOI: 10.15593/2712-8008/2022.4.7

Введение

Существующий в настоящее время тренд по увеличению объема добычи полезных ископаемых подземным способом, а также увеличение разветвленности систем горных выработок подземных горизонтов ведет к необходимости подачи большего количества воздуха в шахты и рудники [1–3]. Одним из вариантов увеличения количества воздуха, подаваемого в рудник, является задействование скиповых стволов, которые чаще всего являются нейтральными по проветриванию [4]. А с учетом увеличения глубины ведения горных работ также увеличивается и требуемая высота подъема скипов, усложняется эксплуатация подъемных канатов из-за кручения, продольно-поперечных колебаний [5, 6].

В действующей на территории России нормативной литературе [7] сказано, что в стволах, предназначенных только для спуска и подъема грузов, максимальная скорость не должна превышать 15 м/с. Физически это связано с тем, что при высоких скоростях воздушного потока в стволах с подъемными сосудами могут возникать следующие проблемы [8–10]:

1. Вибрация подъемных сосудов, приводящая к поломкам и разрушениям.
2. Колебания в канатах.
3. Возможное столкновение подъемных сосудов в середине ствола с канатными направляющими.
4. Стук об расстрелы в месте, где проходят транспортные средства.

При этом в более ранних нормативных документах максимальная скорость подъемных сосудов определялась иначе. Так, в [11] представлена следующая формула для максимальной скорости подъемных сосудов при подъеме и спуске грузов по вертикальным стволам:

$$V = 0,8\sqrt{H}, \tag{1}$$

где H – высота ствола, м.

В монографии [12] выделены основные факторы, влияющие на перемещение скипа, – это поворот скипа вокруг вертикальной оси и поступательные перемещения в горизонтальной плоскости. Сделано предположение о том, что поступательные перемещения скипов в латеральной плоскости вызываются в основном в результате действия силы Кориолиса [13] и аэродинамических сил в результате взаимодействия скипа с воздушной струей.

В работах [14, 15] описаны результаты большой серии измерений – более чем в десяти шахтах, оборудованных тросовыми направляющими. Обнаружено, что сила Кориолиса не является основным источником колебаний скипа, а расчетные методы, предложенные в [12], несовершенны.

В работе [5] предложена методика определения параметров многоканатного подъема на основе изучения динамических явлений в подъемных канатах. Рассмотрены условия глубоких шахт (глубиной до 2000–2200 м). Исследована эффективность многоканатных подъемных установок с уменьшенным расстоянием между канатами.

В работах [16, 17] рассматривается отдельный вопрос колебаний подъемных сосудов после прохождения друг около друга. В результате сопряженного моделирования течения воздуха в стволе и движения скипа получено, что при возрастании скорости воздушного потока в стволе максимальное горизонтальное смещение увеличивается по нелинейному закону. При этом в работах не учтены сопротивление со стороны направляющих и сила Кориолиса.

В работе [18] проведен теоретико-экспериментальный анализ бокового виброускорения стального каната скипа при разных скоростях движения воздуха. Получено, что ускорение поперечного смещения и продольной вибрации значительно увеличивается с увеличением скорости движения, а из-за наличия поперечной вибрации

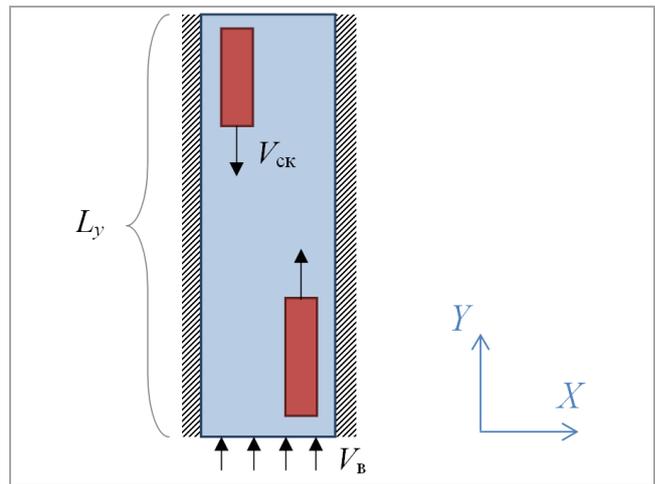


Рис. 1. Геометрическая модель

появляется больше экстремумов продольного виброускорения, влияющих на срок службы каната.

В [19, 20] исследуются вопросы колебательного резонанса опускающегося скипа и канатов без учета аэродинамических воздействий со стороны потока. Отмечается, что на практике часто может возникать большая амплитуда колебаний в системе «скип – канаты», образоваться установившиеся колебания, что может приводить к аварийным сценариям.

В работе [4] путем численного моделирования определены аэродинамические нагрузки на скип при прохождении канала главной вентиляторной установки и при прохождении двух скипов друг около друга. Сделан вывод о том, что даже при достаточно высокой скорости воздуха 18 м/с (превышающей допустимые величины) аэродинамическое влияние воздушного потока на скип и канат пренебрежимо мало. Однако в работе не учтены в полной мере динамические характеристики скипов.

Целью настоящей работы, продолжающей предыдущие исследования [4, 21], является анализ силовых воздействий со стороны воздушной струи на скип с учетом динамических характеристик самого скипа и аэродинамических свойств воздушного потока.

Методология

Определение силовых воздействий со стороны воздушной струи на скип в настоящей работе проводится путем численного моделирования в программном комплексе ANSYS Fluent. Геометрическая модель представляет собой отрезок шахтного ствола длиной L_y (рис. 1). Ствол имеет диаметр D и является вентиляционно-скиповым, а потому воздушный поток движется по направлению снизу вверх. Течение воздуха осуществляется в режиме развитой турбулентности со средней скоростью, равной $V_{ск}$. На данном отрезке ствола также находятся два скипа, движущихся в противоположных направлениях с одинаковой скоростью $V_{ск}$. Со стволом связывается абсолютная система координат OXY , ось X направлена горизонтально, а ось Y – вертикально. Рассматривается плоская двумерная задача, а выбранная расчетная область физически соответствует срединному сечению шахтного ствола. Скипы имеют заданные геометрические размеры – ширину (в направлении X) и высоту (в направлении Y).

Изотермическое нестационарное течение воздуха описывается уравнениями неразрывности и Навье – Стокса [22, 23]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0, \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho V) + \nabla \cdot (\rho VV) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho g, \tag{3}$$

где V – вектор скорости воздушного потока, м/с; p – давление, Па; g – вектор ускорения свободного падения, м/с²; τ – тензор сдвиговых напряжений [24], Па:

$$T = (\mu + \mu_t) [\nabla V + (\nabla V)^T], \quad (4)$$

где μ – молекулярная вязкость воздуха, Па·с; μ_t – турбулентная вязкость, Па·с.

В рамках используемой здесь модели турбулентности SST k - ω [25, 26] турбулентная вязкость представляется в виде:

$$\mu_t = \rho \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, 2\sqrt{S} \cdot S F_2)}, \quad (5)$$

где k – удельная турбулентная кинетическая энергия, м²/с²; ω – удельная энергия турбулентной диссипации, 1/с; a_1 – параметр модели SST; F_2 – вторая сглаживающая функция [27]; S – тензор скоростей деформаций, 1/с.

Характеристики турбулентного воздушного потока k и ω определяются в результате решения двух уравнений переноса:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho k V) = \nabla \cdot (\Gamma_k \nabla k) + \tau \cdot \nabla V - \beta^* \rho \omega k, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \nabla \cdot (\rho \omega V) = \nabla \cdot (\Gamma_\omega \nabla \omega) + \\ + 2\alpha S \cdot S - \beta \rho \omega^2 - 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{\rho}{\omega} \nabla k \cdot \nabla \omega, \end{aligned} \quad (7)$$

где Γ_k и Γ_ω – эффективные коэффициенты диффузии для турбулентных характеристик среды k и ω ; F_1 – первая сглаживающая функция; α , β , β^* и $\sigma_{\omega 2}$ – параметры модели [25, 27].

На входе в расчетную области (нижняя граница) задается равномерное поле скоростей воздушного потока, заданные интенсивность турбулентности и отношение эффективной вязкости к молекулярной вязкости. На выходе из расчетной области задается статическое давление. На твердых стенках ставится условие прилипания потока. Распределение температур всюду однородно.

Численное решение уравнений (2)–(7) с соответствующими начальными и граничными условиями осуществляется с помощью метода конечных объемов по алгоритму Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations (SIMPLE) [28, 29]. Используется второй порядок пространственной дискретизации и первый порядок временной дискретизации по всем искомым переменным. Для ускорения численного счета делается распараллеливание на четырех ядрах центрального процессора.

Моделирование движения скипов осуществляется в рамках подхода динамических сеток [30, 31]. Для сглаживания деформирующейся сетки используется способ «пружинного» сглаживания (Spring-based smoothing) [32], основанный на представлении граней сетки между любыми двумя узлами в виде взаимосвязанных пружин заданной жесткости. Также используется способ сглаживания Лапласа, в рамках которого настраивается расположение каждой вершины сетки в геометрическом центре соседних вершин [33].

На каждом временном шаге алгоритма численного расчета осуществляется локальное перестроение сетки около движущихся скипов по методу локальных ячеек (Local cell) [34, 35]. В этом случае программа агломерирует ячейки на основе показателей асимметрии, размера и высоты (смежные зоны движущихся граней) до перемещения границы. Критерии размера задаются с помощью заданной шкалы минимальной длины h_{\min} и шкалы максимальной длины h_{\max} . Также задается значение

максимальной асимметрии ячейки, указывающее на желаемую асимметрию сетки.

Ячейки, соответствующие пограничным слоям каждого из скипов и стенок шахтного ствола, не деформируются и не перестраиваются в процессе численного счета. При этом множество ячеек пограничного слоя каждого скипа движется вместе с соответствующим скипом как единое недеформируемое твердое тело.

Расчет течения производится в двумерной постановке для описанной выше двумерной геометрической области. Методологически такая идеализация связана с желанием провести и отладить сложный и ресурсозатратный численный алгоритм с динамическими сетками на относительно простой двумерной модели. В дальнейших исследованиях авторы планируют рассмотреть и трехмерный случай.

В результате взаимодействия движущихся скипов с воздушным потоком на недеформируемых стенках скипов формируется неоднородная нагрузка, которая меняется с течением времени. Для анализа перемещений скипов под действием аэродинамической нагрузки со стороны воздушного потока вычисляются суммарные векторные силы F_1 и F_2 , действующие на скипы. При расчете этих сил учитывается третья пространственная размерность скипов, ранее не учтенная явно при моделировании двумерного течения воздуха в стволе. Они используются для определения латеральных перемещений скипов, удовлетворяющих следующему уравнению [16]:

$$m_i \frac{\partial^2 X_i}{\partial t^2} = -k_i X_i + F_i^{(X)} \pm F_i^{(cor)}, \quad (8)$$

$$m_i \frac{\partial^2 Y_i}{\partial t^2} = -k_i Y_i + F_i^{(Y)}, \quad (9)$$

где m_i – масса i -го скипа, кг; X_i и Y_i – перемещения i -го скипа в направлении осей X и Y соответственно, м; $F_i^{(cor)}$ – сила Кориолиса, Н; k – поперечная эквивалентная «пружинная» жесткость, обусловленная взаимодействием скипа с подъемным и уравнивающим канатами, направляющими канатами.

Эквивалентная пружинная жесткость канатов по отношению к горизонтальным перемещениям скипа может быть найдена по формуле [17, 36]:

$$k = n_r \frac{T_r L}{L_1 L_2} + n_H \frac{T_H}{L_1} + n_T \frac{T_T}{L_2}, \quad (10)$$

где n_r – количество направляющих канатов на один скип; T_r – натяжение направляющих канатов на высотной отметке скипа в стволе, Н; L – общая длина направляющих канатов, м; L_1 – расстояние между устьем ствола и подвесным устройством подъемного каната, L_2 – расстояние между подвесным устройством уравнивающего каната и зумпфом, м; n_H – количество подъемных канатов на один скип, T_H – натяжение подъемного каната при транспортировке, Н; n_T – количество уравнивающих канатов для одного скипа; T_T – натяжение уравнивающего каната при транспортировке, Па.

В рамках рассмотрения наиболее пессимистичного сценария предполагается, что натяжения направляющих и уравнивающих канатов складывается только из их собственного веса. В данной ситуации основной вклад в выражение (10) будет вносить слагаемое № 2 справа. А при подстановке его в уравнение (8) последнее по математической форме и физическому смыслу будет очень близко к уравнению математического маятника переменной длины [37, 38]. В этом случае важно дополнительно учесть в уравнении (8) слагаемое, характеризующее силу Кориолиса. В уравнении (8) она записана с переменным знаком, поскольку в зависимости от направления движения скипа по стволу может

оказывать как положительный эффект (демпфировать горизонтальные колебания), так и отрицательный. Натяжение подъемного каната определяется только весом скипа, а эффекты ускорения/замедления скипа не учитываются (для срединной части ствола данное предположение вполне разумно).

Используемый здесь подход не учитывает колебаний в самих канатах, которые могут возникать в результате взаимодействия с колеблющимся скипом и с воздушным потоком.

Численный расчет временных зависимостей $X_i(t)$ и $Y_i(t)$ осуществляется с помощью метода конечных разностей, явной схемы второго порядка точности относительно шага по времени [39, 40]. По данным зависимостям можно определить максимальные величины горизонтальных перемещений скипов при их движении по скипу. Предполагается, что наиболее неблагоприятным моментом, приводящим к дестабилизации положения скипов в пространстве, является прохождение скипов друг около друга.

Помимо этого, в рамках такого подхода предполагается, что скип не поворачивается вокруг своего центра масс и имеет всего две степени свободы – X_i и Y_i . Учет вращательной степени свободы предполагается осуществить в дальнейших исследованиях авторов.

Результаты и их обсуждение

Параметры задачи, использованные для проведения численных расчетов, сведены в табл. 1.

Проведена серия численных экспериментов при различных параметрах сетки, аэродинамических параметрах задачи. Длительность одного расчета составляла от 5 до 12 ч. (в зависимости от выбранных параметров). Расчеты проводились на персональном компьютере, оснащенный 6-ядерным процессором Intel Core i7-8700K CPU (3.70GHz) и 16 Гб оперативной памяти. Визуализация результатов численного моделирования осуществлялась в программном модуле ANSYS CFD-Post, а также в программе Wolfram Mathematica.

На рис. 2 представлено рассчитанное распределение магнитуды скорости воздушного потока в различные моменты времени при средней скорости воздушного потока в стволе, равной 2,5 м/с.

В этой ситуации скипы движутся быстрее воздушного потока. Как видно из рис. 2, за скипом № 1, опускающимся вниз по стволу, образуется неустойчивая нестационарная структура воздушных потоков, обусловленная периодическими срывами воздушного потока с острых кромок этого скипа. При этом аналогичного эффекта для поднимающегося вверх скипа № 2 не наблюдается. Данный вывод справедлив в широком диапазоне исследованных параметров сетки и шагов по времени (см. табл. 1). В этом можно убедиться, если построить временные зависимости горизонтальной (X) компоненты аэродинамической силы, действующей на скипы при различных шагах по времени (рис. 3) и различных шагах по пространству (рис. 4). Компоненты аэродинамических сил строились с помощью базовых команд Ansys CFD-Post [41, 42] – они учитывают как полное давление воздушного потока, действующее по нормали к стенке скипа, так и сдвиговое сопротивление трения, обусловленное вязкостью воздуха и действующее по касательной к стенке.

На рис. 3, 4 также виден характерный пик аэродинамической нагрузки в момент времени около 12 с. Этот пик обусловлен прохождением двух скипов друг относительно друга. Временные зависимости аэродинамических сил для обоих скипов в окрестности пика описываются примерно одинаково для рассмотренного множества пространственных и временных шагов. При этом данный пик является основным источником горизонтальных колебаний скипов [16] при их движении по стволу, в то время как

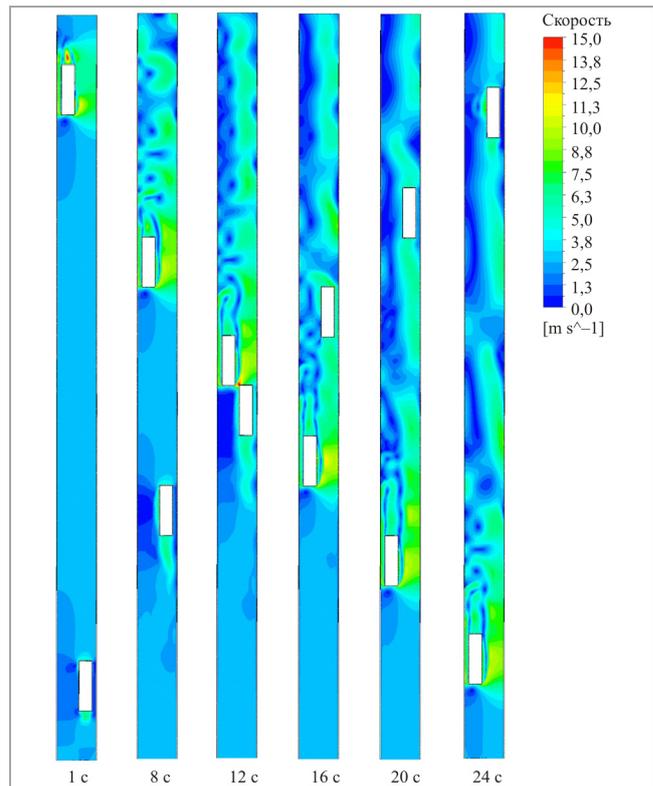


Рис. 2. Распределение магнитуды скорости воздушного потока, обтекающего движущиеся скипы

Таблица 1

Численные параметры задачи

Параметр	Значение
Диаметр ствола, м	8
Длина рассматриваемого участка ствола, м	150
Длина ствола, м	1000
Ширина скипа (по X), м	2,5
Длина скипа (по Z), м	2,3
Высота скипа (по Y), м	10
Масса ненагруженного скипа, т	19
Масса нагруженного скипа, т	49
Количество подъемных канатов на один скип	2
Количество уравнивающих канатов для одного скипа	4
Количество направляющих канатов на один скип	4
Горизонтальная эквивалентная пружинная жесткость канатов ненагруженного скипа, кН/м	2,01
Горизонтальная эквивалентная пружинная жесткость канатов нагруженного скипа, кН/м	5,16
Скорость движения скипов, м/с	5
Скорость воздуха на входе, м/с	2,5–15
Интенсивность турбулентности на входе	5 %
Отношение эффективной вязкости к молекулярной вязкости на входе	10
Время моделирования, с	24
Шаг по времени, с	0,0025–0,02
Максимальное количество подшагов по времени	70
Минимально допустимая относительная невязка	10 ⁻⁴
Размер ячеек сетки, м	0,12–0,3
Шкалы минимальной длины h_{min} , м	0,15
Шкалы максимальной длины h_{max} , м	0,3
Целевая асимметрия сетки	0,6
Количество пограничных слоев	5
Y+ (определен после предварительного моделирования)	42–210

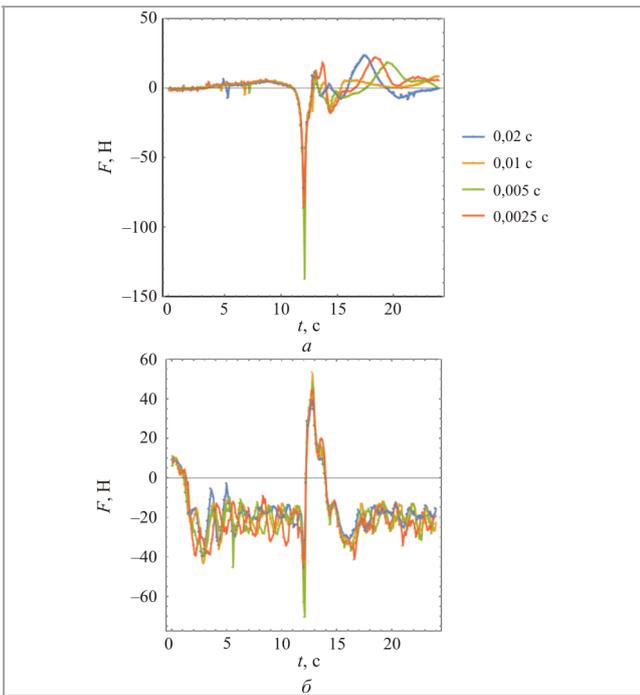


Рис. 3. Временные зависимости горизонтальной компоненты аэродинамической силы, действующей на поднимающийся (а) и опускающийся (б) скипы при различных шагах по времени

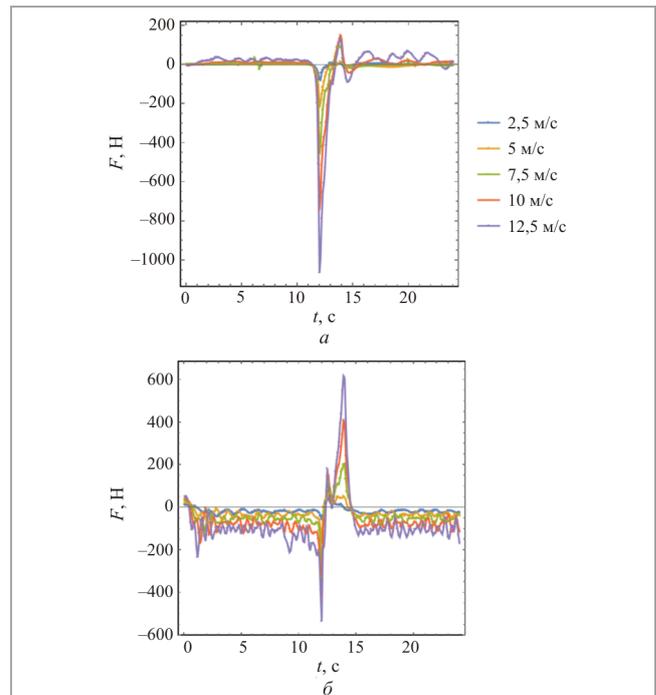


Рис. 5. Временные зависимости горизонтальной компоненты аэродинамической силы, действующей на поднимающийся (а) и опускающийся (б) скипы при различной скорости воздушного потока

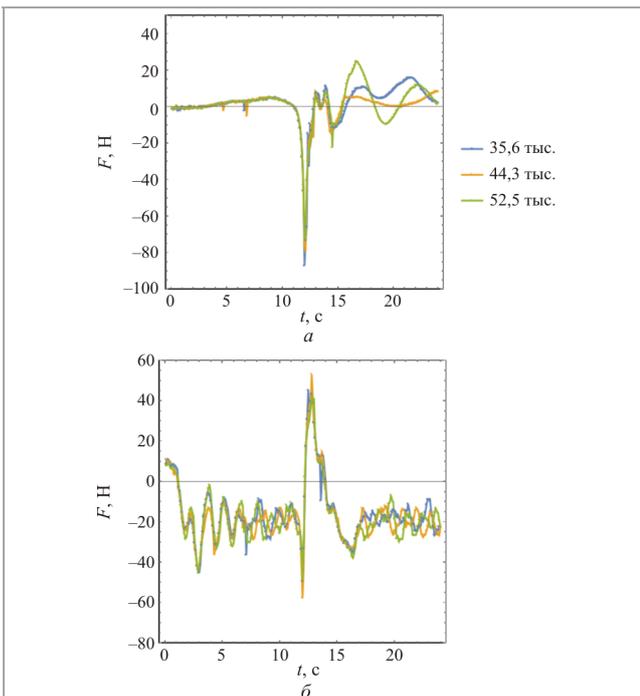


Рис. 4. Временные зависимости горизонтальной компоненты аэродинамической силы, действующей на поднимающийся (а) и опускающийся (б) скипы при различном количестве ячеек расчетных сеток

сравнительно малые колебания аэродинамических сил на остальном промежутке времени слабо влияют на эти колебания. Аналогичный колебательный характер временных зависимостей для аэродинамических сил был получен и в [16, 17].

Величина пика существенно зависит от средней скорости воздушного потока в стволе (рис. 5).

Возрастание амплитуды пика с ростом скорости воздушного потока проявляется для обоих скипов. Амплитуда колебаний срыва потока также возрастает, что особенно заметно проявляется для опускающегося скипа (см. рис. 5, б). При больших скоростях воздуха

(12,5 м/с) срывы потока начинают происходить и для поднимающегося вверх скипа, движение которого сонаправлено с воздушным потоком. Это указывает на то, что явление срыва потока определяется в первую очередь скоростью скипа относительно воздушного потока.

Максимальная величина пика горизонтальной компоненты аэродинамической силы существенно зависит от учета движения скипов. В случае, если решать задачу с предположением о мгновенном покое каждого из скипов в каждый момент времени, результирующие аэродинамические нагрузки получатся другими (табл. 2, неподвижная сетка). В данном случае рассогласования между различными решениями (с учетом динамики скипов и без учета) очень велики (порой решения отличаются в 10 раз). Это связано с тем, что при мгновенном покое каждого из скипов в каждый момент времени не учитывается поршневой эффект, создаваемый скипами при движении и существенным образом определяющего скорости воздушного потока между скипами в момент времени, когда они находятся на единой высотной отметке.

На рис. 6 показаны распределения полного давления вблизи двух скипов в момент их прохождения друг около друга. Полное давление в данной ситуации является величиной относительной (поскольку на выходе из расчетной области фиксируется нулевое статическое давление), а потому в локальных зонах наблюдаются отрицательные величины полного давления. Поля соответствуют средней скорости воздушного потока в стволе, равной 15 м/с. Случай на рис. 6, а, соответствует учету реальной скорости движения скипа и динамическому перестроению сетки. Случай на рис. 6, б, соответствует предположению о мгновенном покое каждого из скипов. Распределения давлений вблизи боковых стенок скипов существенно различаются в этих двух ситуациях. В случае неподвижной сетки (см. рис. 6, в) в верхней части скипов присутствуют зоны пониженного давления (синий цвет), которые несимметрично распределены по сторонам скипа и оказывают существенный вклад при расчете суммарной силы, действующей на скип со стороны воздушного потока.

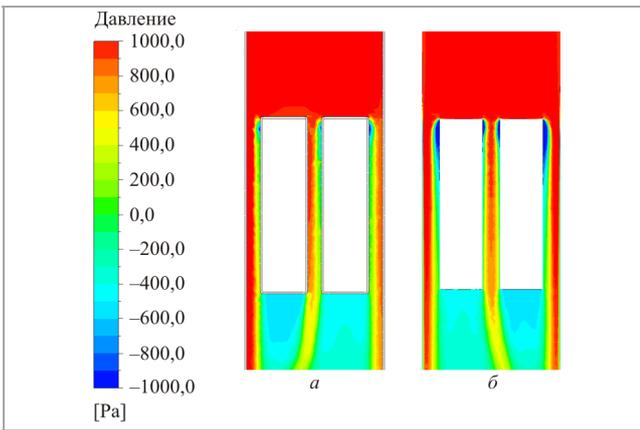


Рис. 6. Распределение полных давлений вблизи скипов для случая динамических сеток (а) и неподвижной сетки (б)

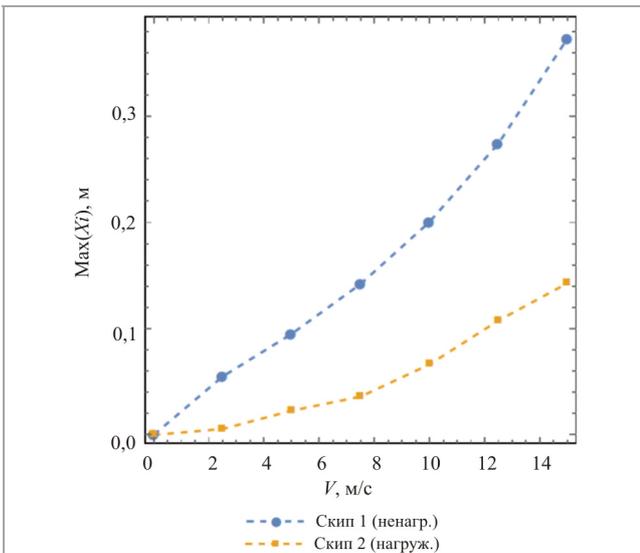


Рис. 7. Зависимости максимальных амплитуд горизонтальных колебаний скипов от скорости воздушного потока

Таблица 2

Сравнительный анализ горизонтальных компонент аэродинамической силы при различных постановках задачи

Особенности постановки задачи	Скип	Скорость воздуха, м/с		
		5	10	15
Динамические сетки	№ 1	204,6	411,3	936,9
	№ 2	92,8	153,3	211,0
Неподвижная сетка	№ 1	174,0	696,48	1535,4
	№ 2	323,8	1300,5	2968,2

Если анализировать вариацию вертикальной компоненты аэродинамической силы, действующей на скип при его движении, то для обоих скипов она меняется в диапазоне от 0 до 350 Н (в диапазоне скоростей воздушного потока от 2,5 до 15 м/с). Это довольно малая величина по сравнению с весом скипа в ненагруженном состоянии (19 тонн). Это указывает на то, что гораздо более существенные вертикальные (продольные) колебания будут образовываться при разгоне и торможении скипа, в то время как аэродинамический фактор в данном случае пренебрежимо мал. По данной причине уравнение (9) анализироваться здесь не будет.

Иначе ситуация обстоит с горизонтальными колебаниями скипов, где аэродинамическое воздействие воздушной струи может быть существенным. Для анализа горизонтальных колебаний каждого из скипов было получено численное решение дифференциального уравнения (8) с учетом рассчитанных выше временных зависимостей на рис. 5. Шаг по времени были принят равным 0,1 с.

На рис. 7 представлены рассчитанные зависимости максимальных амплитуд горизонтальных колебаний скипов от скорости воздушного потока. Точками отмечены результаты отдельных численных экспериментов, а штриховыми линиями – кусочно-линейная интерполяция решения между точками. Как видно из рисунка, рост магнитуды колебаний происходит по нелинейному закону с ускорением. Это хорошо согласуется с работами [1, 17]. В рассматриваемом случае амплитуды колебаний по абсолютной величине достигают 40 см для ненагруженного скипа, опускающегося вниз, и 13 см для нагруженного скипа, поднимающегося вверх. Это довольно высокие величины, однако здесь надо учитывать, что полученные амплитуды колебаний сильно зависят от эквивалентной жесткости канатов по отношению к горизонтальным перемещениям скипа, в то время как последние выбирались исходя из наиболее пессимистичной оценки. При увеличении эквивалентной жесткости канатов в 2 раза (например, за счет натяжения направляющих канатов) величина амплитуды колебаний для ненагруженного скипа уменьшается до 21 см (на 47 %), а для нагруженного скипа – до 10 см (на 23 %).

Далее с помощью метода наименьших квадратов [43, 44] были получены аппроксимирующие нелинейные степенные зависимости для рассчитанных точек из рис. 7:

$$X_1 = \frac{0,018V_B^2}{m_1}, \quad (11)$$

$$X_2 = \frac{0,022V_B^2}{m_2}, \quad (12)$$

где X_1 – максимальное горизонтальное перемещение ненагруженного скипа № 1, м; X_2 – максимальное горизонтальное перемещение нагруженного скипа № 2, м; m_1 – масса ненагруженного скипа № 1, т; m_2 – масса нагруженного скипа № 2, т; V_B – средняя по сечению скорость воздушного потока, м/с.

Зависимости (11)–(12) получены для случая скорости скипов 5 м/с. Предполагается, что данный параметр также должен сильно влиять на величину горизонтальных смещений скипов, однако в настоящей работе данный вопрос не исследуется, но является предметом дальнейших исследований. В дальнейшем планируется исследовать влияние скорости движения скипа и геометрических характеристик скипа на особенности его горизонтальных колебаний, а также оценить влияние сопряжений с горизонтами и каналом главного вентилятора на горизонтальные колебания. Практический интерес также имеют и вопросы устойчивости вдухораспределения в стволах с движущимися скипами [45, 46], закономерности переноса вредных примесей (пыли), выделяющихся с поверхностей скипов [47–49].

Заключение

В рамках описанного в статье исследования предложен алгоритм расчета аэродинамических нагрузок на скипы, движущиеся по вентиляционно-скиповому стволу. Алгоритм основан на численном решении уравнений неразрывности, Навье – Стокса и переноса турбулентных характеристик воздушного потока в программе ANSYS Fluent, а также реализует динамическое перестроение расчетной сетки в процессе моделирования движения скипов и воздушного потока.

Данные об аэродинамических нагрузках использованы для расчета суммарных аэродинамических сил, действующих на скипы в процессе их движения. Получено, что максимальная величина пика горизонтальной компоненты аэродинамической силы существенно зависит от учета движения скипов. Это указывает на то, что анализ колебаний скипов в стволе в предположении о мгновенно покоящихся скипах является некорректным.

Определено, что максимальные значения аэродинамической силы имеют место при прохождении двух скипов друг около друга – в этом случае максимально перекрывается сечение шахтного ствола. Кратковременное возрастание аэродинамической силы, действующей на скип, приводит к колебанию скипа в горизонтальной плоскости. Максимальная амплитуда колебаний увеличивается с ростом скорости воздуха в стволе. Для

ненагруженного скипа максимальная амплитуда колебаний выше, чем для ненагруженного скипа. Эффективная жесткость канатов по отношению к горизонтальным колебаниям системы оказывает существенное влияние на максимальную амплитуду колебаний скипа, а потому при практических расчетах движения скипов в воздушном пространстве ствола следует уделять особое внимание заданию данного параметра.

Библиографический список

1. Особенности формирования микроклиматических условий в горных выработках глубоких рудников / В.Н. Карелин, А.В. Кравченко, Л.Ю. Левин, Б.П. Казаков, А.В. Зайцев // Горный журнал. – 2013. – № 6. – С. 65–68.
2. Казаков Б.П., Трушкова Н.А., Зайцев А.В. Применение частичного повторного использования воздуха для снижения количества выпадающей влаги в калийных рудниках // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология, нефтегазовое и горное дело. – 2012. – № 3. – С. 129–133.
3. Казаков Б.П., Мальцев С.В., Семин М.А. Способ оптимизации параметров работы нескольких главных вентиляторных установок для проектирования энергоэффективных режимов проветривания рудников сложной топологии // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2017. – № 1. – С. 101–108.
4. Поспелов Д.А., Зайцев А.В., Семин М.А. Обоснование максимальной допустимой скорости воздуха в стволах по фактору аэродинамической нагрузки на технологическое оборудование // Горное эхо. – 2020. – № 1. – С. 90–94.
5. Жигула Т.И. Обоснование параметров шахтных многоканатных подъемных установок на основе исследования продольно-поперечных колебаний канатов: дис. ... канд. техн. наук. – 1985. – 202 с.
6. Таугер В.М., Волков Е.Б., Леонтьев А.А. Теоретико-механический расчет устойчивости движения сосуда в шахтной скиповой пневмоподъемной установке // Известия Уральского государственного горного университета. – 2018. – № 1 (49).
7. Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых: федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности утв. 08.12.2021, № 505. – М., 2021.
8. Brake D.J., Mine Ventilation: A Practitioner's Manual. – Brisbane, Australia, 2013. – 791 с.
9. McPherson M.J. An analysis of the resistance and airflow characteristics of mine shafts // Fourth International Mine Ventilation Congress, 1988. – Brisbane, Queensland. – 8 с.
10. Investigation of Dynamic Load in Superdeep Mine Hoisting Systems Induced by Drum Winding / J. Yao, X. Deng, C. Ma, T. Xu // Shock and Vibration. – 2021. – Т. 2021. – Ст. № 4756813.
11. Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений подземным способом. – М.: Недра, 1972. – 224 с.
12. Белый В.Д. Канатные проводники шахтных подъемных установок. – М.: Углетехиздат. – 1959. – 212 с.
13. Страданченко С.Г., Прокопов А.Ю., Ткачева К.Э. Вероятностный подход к определению временных нагрузок на жесткую армировку вертикальных стволов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № 8. – С. 61–68.
14. Chen X. Analysis of the Soviet calculation formula for the clearance between rope-guided conveyance and conveyance // Design of Coal Mine (China). – 1979. – Vol. 26, № 4. – P. 17–23.
15. Chen X. Swing of hoisting conveyance using steel rope guides // Coal Science and Technology (China). – 1985. – Vol. 13, № 2. – P. 23–26.
16. Wu R., Zhu Z., Cao G. Computational Fluid Dynamics Modeling of Rope-Guided Conveyances in Two Typical Kinds of Shaft Layouts // PLoS One. – 2015. – Vol. 17, № 2. – P. 978–987.
17. Simulation of the lateral oscillation of rope-guided conveyance based on fluid-structure interaction / R. Wu, Z. Zhu, G. Chen, G. Cao, W. Li // Journal of Vibroengineering. – 2014. – Vol. 16, № 3. – P. 1555–1563.
18. Vibration Analysis of Winding Hoisting System based on ADAMS/Cable / C. Ma, J. Yao, X. Xiao, X. Di, Y. Jiang // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Vol. 1750, № 1. – Art. № 012033.
19. Wang N., Cao G., Yan L. The Study of Hoisting System for Vertical Shaft Construction Without the Protection of Guided-cable // 8th Symposium on Lift and Escalator Technologies. – 2018. – Vol. 8, № 1. – P. 153–159.
20. Ji-hu B.A.O., Peng Z., Chang-ming Z.H.U. Modeling and control of longitudinal vibration on flexible hoisting systems with time-varying length // Procedia Engineering. – 2011. – Vol. 15. – P. 4521–4526.
21. Повышение энергоэффективности системы вентиляции глубокого рудника за счет изменения аэродинамических параметров скипового ствола / Д.А. Поспелов, А.В. Зайцев, М.А. Семин, С.В. Мальцев, Е.Н. Мизонов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 9. – С. 135–144.
22. Semin M., Levin L. Theoretical study of partially return air flows in vertical mine shafts // Thermal Science and Engineering Progress. – 2021. – Vol. 23. – Art. № 100884.
23. Исследование динамики пылевоздушной смеси при проветривании тупиковой выработки в процессе работы комбайновых комплексов / Л.Ю. Левин, А.Г. Исаевич, М.А. Семин, Р.П. Газизуллин // Горный журнал. – 2015. – № 1. – С. 72–75.
24. Continuing invariant solutions towards the turbulent flow / E. Parente, M. Farano, J.C. Robinet, P. De Palma, S. Cherubini // Philosophical Transactions of the Royal Society A. – 2022. – Т. 380, № 2226. – Art. № 20210031.
25. Menter F.R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications // AIAA Journal. – 1994. – Vol. 32, № 8. – P. 1598–1605.
26. Adanta D., Fattah I.M.R., Muhammad N.M. Comparison of standard k-epsilon and SST k-omega turbulence model for breastshot waterwheel simulation // Journal of Mechanical Science and Engineering. – 2020. – Vol. 7, № 2. – P. 39–44.
27. Semin M., Golovatyi I., Pugin A. Analysis of Temperature Anomalies during Thermal Monitoring of Frozen Wall Formation // Fluids. – 2021. – Vol. 6. – № 8. – Art. № 297.
28. Ceilometer monitoring of boundary-layer height and its application in evaluating the dilution effect on air pollution / J. Lee, J.W. Hong, K. Lee, J. Hong, E. Velasco, Y.J. Lim, J. Park // Boundary-Layer Meteorology. – 2019. – Vol. 172, № 3. – P. 435–455.
29. Jandaghian Z. Flow and pollutant dispersion model in a 2D urban street canyons using computational fluid dynamics // Computational Engineering and Physical Modeling. – 2018. – Vol. 1, № 1. – P. 83–93.
30. Validation of a fluid-structure interaction model of a heart valve using the dynamic mesh method in fluent / K. Dumont, J.M.A. Stijnen, J. Vierendeels, F.N. Van De Vosse, P.R. Verdonck // Computer methods in biomechanics and biomedical engineering. – 2004. – Vol. 7, № 3. – P. 139–146.
31. A CFD model of frost formation based on dynamic meshes technique via secondary development of ANSYS fluent / Y. You, S. Wang, W. Lv, Y. Chen, U. Gross // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2021. – Т. 89. – Art. № 108807.
32. Mrinal K.R., Siddique M.H., Samad A. A transient 3D CFD model of a progressive cavity pump // Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. – American Society of Mechanical Engineers, 2016. – Vol. 49873. – Art. № V009T24A009.
33. Mesh smoothing algorithm based on exterior angles split / Y. Hai, S. Cheng, Y. Guo, S. Li // Plos one. – 2020. – Vol. 15, № 5. – Art. № e0232854.
34. Analysis of the effects of dynamic mesh update method on simulating indoor airflow induced by moving objects / H. Zhou, K. Zhong, H. Jia, Y. Kang // Building and Environment. – 2022. – Art. № 108782.
35. Adedeji O.E., Duarte C.A. R. Prediction of thickness loss in a standard 90° elbow using erosion-coupled dynamic mesh // Wear. – 2020. – Vol. 460. – P. 203400.
36. Krige G.J. Guidelines for the design of rope guides // International Conference on Hoisting and Haulage 2005, Perth, Australia. – 2005. – P. 275–283.
37. Русских С.В., Шклярчук Ф.Н. Применение метода Бубнова-Галеркина для расчета нелинейных колебаний математического маятника переменной длины при конечном передвижении из одного состояния покоя в другое // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2018. – № 10 (82). – С. 1–15.
38. Суриков И.Ю., Суббота А.Д., Тархов Д.А. Применение новых методов решения дифференциальных уравнений к задаче стабилизации перевернутого маятника // Нейрокомпьютеры и их применение. – 2018. – С. 358–359.
39. Штеттер Х. Анализ методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений. – М.: Мир, 1978. – 461 с.
40. Явная схема расщепления для уравнений Максвелла / И.В. Мингалев [и др.] // Математическое моделирование. – 2018. – Т. 30, № 12. – С. 17–38.
41. Kulshreshtha A., Gupta S.K., Singhal P. FEM/CFD analysis of wings at different angle of attack // Materials Today: Proceedings. – 2020. – Vol. 26. – P. 1638–1643.
42. Computational fluid dynamics simulation of changes in the morphology and airflow dynamics of the upper airways in OSAHS patients after treatment with oral appliances / B. Song, Y. Li, J. Sun, Y. Qi, P. Li, Y. Li, Z. Gu // PloS one. – 2019. – Vol. 14, № 11. – Art. e0219642.
43. Brook R.J., Arnold G.C. Applied regression analysis and experimental design. – CRC Press, 2018.
44. Сравнение точности аппроксимации экспериментальных данных методом наименьших квадратов с методом наименьших квадратов / А.Б. Голованчиков, М.К. Доан, А.В. Петрухин, Н.А. Меренцов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2020. – Т. 8, № 1. – С. 38–39.
45. Левин Л.Ю., Кормщиков Д.С., Семин М.А. Решение задачи оперативного расчета распределения продуктов горения в сети горных выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 12. – С. 179–184.
46. Разработка энергосберегающих технологий обеспечения комфортных микроклиматических условий при ведении горных работ / Б.П. Казаков, Л.Ю. Левин, А.В. Шалимов, А.В. Зайцев // Записки Горного института. – 2017. – Т. 223. – С. 116–124.

47. Field measurement and numerical simulation of dust migration in a high-rise building of the mine hoisting system / X. Feng, F. Geng, H. Teng, C. Gui, S. Wu, S. Li, S. Yuan // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2022. – Т. 29, № 25. – С. 38038–38053.
48. Исаевич А.Г., Кормщиков Д.С. Исследование пылевой обстановки в условиях калийного рудника, опыт снижения запыленности атмосферы рабочих мест // *Известия Тульского государственного университета. Науки о земле*. – 2018. – № 4. – С. 60–74.
49. Пылевая обстановка на руднике / М.Ю. Лискова, Р.А. Ковалев, А.Б. Копылов, Ю.А. Воронкова // *Известия Тульского государственного университета. Науки о земле*. – 2018. – № 3. – С. 49–61.

References

- Karelin V.N., Kravchenko A.V., Levin L.Iu., Kazakov B.P., Zaitsev A.V. Osobennosti formirovaniia mikroklimaticeskikh uslovii v gornyykh vyrabotkakh glubokikh rudnikov [Features of the formation of microclimatic conditions in the mine workings of deep mines]. *Gornyi zhurnal*, 2013, no. 6, pp. 65–68.
- Kazakov B.P., Trushkova N.A., Zaitsev A.V. Primenenie chastichnogo povtornogo ispol'zovaniia vozdukh dlia snizheniia kolichestva vypadaushchei vlagi v kaliinykh rudnikakh [Application of partial reuse of air to reduce the amount of moisture precipitate in potash mines]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya, neftegazovoe i gornoe delo*, 2012, no. 3, pp. 129–133.
- Kazakov B.P., Mal'tsev S.V., Semin M.A. Sposob optimizatsii parametrov raboty neskol'kikh glavnykh ventilatornykh ustanovok dlia proektirovaniia energoeffektivnykh rezhimov provetrivaniia rudnikov slozhnoi topologii [Working parameters optimization technique for several main ventilation installations to design energy-efficient modes of mines of complex topology aeration]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Gornyi zhurnal*, 2017, no. 1, pp. 101–108.
- Pospelov D.A., Zaitsev A.V., Semin M.A. Obosnovanie maksimal'noi dopustimoi skorosti vozdukh v stvolakh po faktoru aerodinamicheskoi nagruzki na tekhnologicheskoe oborudovanie [Justification of the maximum allowable air speed in the shafts by the factor of aerodynamic load on process equipment]. *Gornoe ekho*, 2020, no. 1, pp. 90–94. DOI: 10.7242/echo.2020.1.19
- Zhigula T.I. Obosnovanie parametrov shakhtnykh mnogokanatnykh pod'emnykh ustanovok na osnove issledovaniia prodol'no-poperechnykh kolebani kanatov [Justification of the parameters of mine multi-rope lifting installations based on the study of longitudinal-transverse vibrations of ropes]. Ph. D. thesis, 1985, 202 p.
- Tauger V.M., Volkov E.B., Leont'ev A.A. Teoretiko-mekhanicheskii raschet ustoiichivosti dvizheniia sosuda v shakhtnoi skipovoi pnevmopod'emnoi ustanovke [Theoretical mechanical calculations of the stability of the vessel motion in a mine skip pneumatic elevating equipment]. *Izvestiia Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*, 2018, no. 1 (49). pp. 89–93. DOI: 10.21440/2307-2091-2018-1-68-79
- Pravila bezopasnosti pri vedenii gornyykh rabot i pererabotke tverdykh poleznykh iskopaemykh: federal'nye normy i pravila v oblasti promyshlennoi bezopasnosti utv. 08.12.2021, № 505 [Safety rules for mining operations and processing of solid minerals: federal norms and rules in the field of industrial safety approved. 12/08/2021, No. 505]. Moscow, 2021.
- Brake D.J. *Mine Ventilation: A Practitioner's Manual*. Brisbane, Australia, 2013, 791 p.
- McPherson M.J. An analysis of the resistance and airflow characteristics of mine shafts. *Fourth International Mine Ventilation Congress*, 1988. Brisbane, Queensland, 8 p.
- Yao J., Deng X., Ma C., Xu T. Investigation of Dynamic Load in Superdeep Mine Hoisting Systems Induced by Drum Winding. *Shock and Vibration*, 2021, vol. 2021, 4756813 p. DOI: 10.1155/2021/4756813
- Edinye pravila bezopasnosti pri razrabotke rudnykh, nerudnykh i rossypnykh mestorozhdenii podzemnym sposobom [Uniform safety rules for the development of ore, non-ore and alluvial deposits by underground mining]. Moscow: Nedra, 1972, 224 p.
- Belyi V.D. Kanatnye provodniki shakhtnykh pod'emnykh ustanovok [Rope guides for mine hoists]. Moscow: Ugletekhizdat, 1959, 212 p.
- Stradanchenko S.G., Prokopov A.Iu., Tkacheva K.E. Veroiatnostnyi podkhod k opredeleniiu vremennykh nagruzok na zhestkuiu armirovku vertikal'nykh stvolov [Probabilistic approach to determination of the temporal loadings on reinforcement of vertical shafts]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhniceskii zhurnal)*, 2012, no. 8, pp. 61–68.
- Chen X. Analysis of the Soviet calculation formula for the clearance between rope-guided conveyance and conveyance. *Design of Coal Mine (China)*, 1979, vol. 26, no. 4, pp. 17–23.
- Chen X. Swing of hoisting conveyance using steel rope guides. *Coal Science and Technology (China)*, 1985, vol. 13, no. 2, pp. 23–26.
- Wu R., Zhu Z., Cao G. Computational Fluid Dynamics Modeling of Rope-Guided Conveyances in Two Typical Kinds of Shaft Layouts. *PLoS One*, 2015, vol. 17, no. 2, pp. 978–987. DOI: 10.1371/journal.pone.0118268
- Wu R., Zhu Z., Chen G., Cao G., Li W. Simulation of the lateral oscillation of rope-guided conveyance based on fluid-structure interaction. *Journal of Vibroengineering*, 2014, vol. 16, no. 3, pp. 1555–1563.
- Ma C., Yao J., Xiao X., Di X., Jiang Y. Vibration Analysis of Winding Hoisting System based on ADAMS/Cable. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2021, vol. 1750, no. 1, Art. no. 012033. DOI: 10.1088/1742-6596/1750/1/012033
- Wang N., Cao G., Yan L. The Study of Hoisting System for Vertical Shaft Construction Without the Protection of Guided-cable. *8th Symposium on Lift and Escalator Technologies*, 2018, vol. 8, no. 1, pp. 153–159.
- Ji-hu B.A.O., Peng Z., Chang-ming Z.H.U. Modeling and control of longitudinal vibration on flexible hoisting systems with time-varying length. *Procedia Engineering*, 2011, vol. 15, pp. 4521–4526. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.08.849
- Pospelov D.A., Zaitsev A.V., Semin M.A., Mal'tsev S.V., Mizonov E.N. Povyshenie energoeffektivnosti sistemy ventilatsii glubokogo rudnika za schet izmeneniia aerodinamicheskikh parametrov skipovogo stvola [Enhancement of ventilation system energy efficiency through the change of aerodynamic characteristics in skip shafts in deep mines]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhniceskii zhurnal)*, 2021, no. 9, pp. 135–144. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_9_0_135
- Semin M., Levin L.I. Theoretical study of partially return air flows in vertical mine shafts. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2021, vol. 23, Art. no. 100884. DOI: 10.1016/j.tsep.2021.100884
- Levin L.Iu., Isaevich A.G., Semin M.A., Gazizullin R.R. Issledovanie dinamiki pylevozdushnoi smesi pri provetrivaniitupikovoi vyrabotki v protsesse raboty kombinovannykh kompleksov [Investigation of the dynamics of the dust-air mixture during the ventilation of a dead-end working in the process of operation of combine complexes]. *Gornyi zhurnal*, 2015, no. 1, pp. 72–75. DOI: 10.17580/gzh.2015.01.13
- Parente E., Farano M., Robinet J.C., De Palma P., Cherubini S. Continuing invariant solutions towards the turbulent flow. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2022, vol. 380, no. 2226, Art. no. 20210031. DOI: 10.1098/rsta.2021.0031
- Menter F.R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*, 1994, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605. DOI: 10.2514/3.12149
- Adanta D., Fattah I.M.R., Muhammad N.M. Comparison of standard k-epsilon and SST k-omega turbulence model for breastshot waterwheel simulation. *Journal of Mechanical Science and Engineering*, 2020, vol. 7, no. 2, pp. 39–44. DOI: 10.36706/jmse.v7i2.44
- Semin M., Golovaty I., Pugin A. Analysis of Temperature Anomalies during Thermal Monitoring of Frozen Wall Formation. *Fluids*, 2021, vol. 6, no. 8, Art. no. 297. DOI: 10.3390/fluids6080297
- Lee J., Hong J.W., Lee K., Hong J., Velasco E., Lim Y.J., Park J. Ceilometer monitoring of boundary-layer height and its application in evaluating the dilution effect on air pollution. *Boundary-Layer Meteorology*, 2019, vol. 172, no. 3, pp. 435–455. DOI: 10.1007/s10546-019-00452-5
- Jandaghian Z. Flow and pollutant dispersion model in a 2D urban street canyons using computational fluid dynamics. *Computational Engineering and Physical Modeling*, 2018, vol. 1, no. 1, pp. 83–93. DOI: 10.22115/CEPM.2018.122506.1014
- Dumont K., Stijnen J.M.A., Vierendeels J., Van De Vosse F.N., Verdonck P.R. Validation of a fluid-structure interaction model of a heart valve using the dynamic mesh method in fluent. *Computer methods in biomechanics and biomedical engineering*, 2004, vol. 7, no. 3, pp. 139–146. DOI: 10.1080/10255840410001715222
- You Y., Wang S., Lv W., Chen Y., Gross U. A CFD model of frost formation based on dynamic meshes technique via secondary development of ANSYS fluent. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2021, vol. 89, Art. no. 108807. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2021.108807
- Mrinal K.R., Siddique M.H., Samad A. A transient 3D CFD model of a progressive valve pump. *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*. American Society of Mechanical Engineers, 2016, vol. 49873, Art. no. V009T24A009. DOI: 10.1115/GT2016-56599
- Hai Y., Cheng S., Guo Y., Li S. Mesh smoothing algorithm based on exterior angles split. *Plos one*, 2020, vol. 15, no. 5, Art. no. e0232854. DOI: 10.1371/journal.pone.0232854
- Zhou H., Zhong K., Jia H., Kang Y. Analysis of the effects of dynamic mesh update method on simulating indoor airflow induced by moving objects. *Building and Environment*, 2022, Art. no. 108782. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.108782
- Adedeji O.E., Duarte C.A. R. Prediction of thickness loss in a standard 90° elbow using erosion-coupled dynamic mesh. *Wear*, 2020, vol. 460, 203400 p. DOI: 10.1016/j.wear.2020.203400
- Krige G.J. Guidelines for the design of rope guides. *International Conference on Hoisting and Haulage 2005*. Perth, Australia, 2005, pp. 275–283.
- Russkikh S.V., Shklyarchuk F.N. Primenenie metoda Bubnova-Galerkina dlia rascheta nelineinykh kolebani matematicheskogo maiatnika peremennoi dliny pri konechnom peredvizhenii iz odnogo sostoiianiia pokoia v drugoe [Using the Bubnov–Galerkin method to calculate the nonlinear oscillations of the variable-length mathematical pendulum at final movement from one state of rest into another]. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii*, 2018, no. 10 (82), pp. 1–15. DOI: 10.18698/2308-6033-2018-10-1809
- Surikov I.Iu., Subbota A.D., Tarkhov D.A. Primenenie novykh metodov resheniia differentsialnykh uravnenii k zadache stabilizatsii perevernutogo maiatnika [Application of new methods for solving differential equations to the problem of stabilization of an inverted pendulum]. *Neirokompiutery i ikh primeneniye*, 2018, pp. 358–359.
- Shtetter Kh. Analiz metodov diskretizatsii dlia obyknovennykh differentsialnykh uravnenii [Analysis of discretization methods for ordinary differential equations]. Moscow: Mir, 1978, 461 p.
- Mingalev I.V. et al. Iavnaia skhema rasshchepleniia dlia uravnenii Maksvela [The explicit splitting scheme for Maxwell's equations]. *Matematicheskoe modelirovaniye*, 2018, vol. 30, no. 12, pp. 17–38. DOI: 10.1134/S2070048219040094

41. Kulshreshtha A., Gupta S.K., Singhal P. FEM/CFD analysis of wings at different angle of attack. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 26, pp. 1638-1643. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.02.342
42. Song B., Li Y., Sun J., Qi Y., Li P., Li Y., Gu Z. Computational fluid dynamics simulation of changes in the morphology and airflow dynamics of the upper airways in OSAHS patients after treatment with oral appliances. *PLoS one*, 2019, vol. 14, no. 11, Art. e0219642. DOI: 10.1371/journal.pone.0219642
43. Brook R.J., Arnold G.C. Applied regression analysis and experimental design. CRC Press, 2018.
44. Golovanchikov A.B., Doan M.K., Petrukhin A.V., Merentsov N.A. Sravnenie tochnosti approksimatsii eksperimental'nykh dannykh metodom naimen'shikh otositel'nykh kvadratov s metodom naimen'shikh kvadratov [Comparison of the accuracy of experimental data approximation using the least relative squares method with the least squares method]. *Modelirovanie, optimizatsiya i informacionnye tekhnologii*, 2020, vol. 8, no. 1, pp. 38-39. DOI: 10.26102/2310-6018/2020.28.1.042
45. Levin L.Iu., Kormshchikov D.S., Semin M.A. Reshenie zadachi operativnogo rascheta raspredeleniia produktov goreniia v seti gornykh vyrabotok [Rapid determination of combustion gas distribution in mine workings]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, 2013, no. 12, pp. 179-184.
46. Kazakov B.P., Levin L.Iu., Shalimov A.V., Zaitsev A.V. Razrabotka energosberegaiushchikh tekhnologii obespecheniia komfortnykh mikroklimaticheskikh uslovii pri vedenii gornykh rabot [Development of energy-saving technologies providing comfortable microclimate conditions for mining]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2017, vol. 223, pp. 116-124. DOI: 10.18454/pmi.2017.1.116
47. Feng X., Geng F., Teng H., Gui C., Wu S., Li S., Yuan S. Field measurement and numerical simulation of dust migration in a high-rise building of the mine hoisting system. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, vol. 29, no. 25, pp. 38038-38053. DOI: 10.1007/s11356-022-18605-4
48. Isaevich A.G., Kormshchikov D.S. Issledovanie pylevoi obstanovki v usloviakh kaliinogo rudnika, opyt snizheniia zapylennosti atmosfery rabochikh mest [Investigation of dust conditions in a potash mine, experience in dust reduction in the working areas]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o zemle*, 2018, no. 4, pp. 60-74.
49. Liskova M.Iu., Kovalev R.A., Kopylov A.B., Voronkova Iu.A. Pylevaia obstanovka na rudnike [Dust station on mine]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o zemle*, 2018, no. 3, pp. 49-61.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта № 19-35-90076, а также при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от «29» декабря 2020 г. (рег. номер НИОКТР 122030100425-6).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.