

## РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА

УДК 539.87, 51-74, 533.6.013.413, 622.6

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ ЛИФТА И ПРОТИВОВЕСА В ПОТОКЕ ВОЗДУХА ВЕНТИЛЯЦИОННОГО ШАХТНОГО СТВОЛА

**М. А. Журавков, М. А. Николайчик, И. Н. Карпович**

*Белорусский государственный университет,  
E-mail: zhuravkov@bsu.by, nikolaitchikma@bsu.by, karpovichin@bsu.by,  
Проспект Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь*

Рассмотрена задача численного моделирования динамики движения лифта и противовеса при эксплуатации лифтоподъемника в вентиляционном стволе с учетом поступающего в шахтный ствол потока воздуха. Разработана конечно-элементная модель исследуемой системы. При решении выполнен учет поворота и перемещения лифта и противовеса, а также упругих сил, действующих со стороны ролика. Изучены положения движения лифта и противовеса при различных жесткостях пружин, обеспечивающих непрерывный контакт ролика с направляющей. Получены распределения давлений в шахтном стволе и поле горизонтальных перемещений элементов лифтоподъемника и значения сил упругости, возникающих в пружинах роликов лифта и противовеса.

*Боковые колебания, лифтоподъемник, вентиляционный ствол, метод конечных объемов, шахтный ствол, численное моделирование, CFD*

DOI: 10.15372/FTPRPI20250111

EDN: XQXYVG

Шахтные подъемные комплексы — важный элемент функционирования горнодобывающих предприятий, использующих подземный метод разработки месторождений полезных ископаемых. Это сложные инженерные сооружения, эффективность и безопасность эксплуатации которых зависят от надежной и безаварийной работы всех их составляющих элементов и систем. Один из компонентов шахтного подъемного комплекса — система лифтоподъемника. Обеспечение его надежной, безопасной и оптимальной работы — непростая задача, требующая учета большого количества факторов. Она особенно актуальна в условиях подземной работы горнодобывающего предприятия, где продольное движение транспортных средств и вентиляция существенно влияют на динамику движения лифта и противовеса.

Построение механико-математической модели для решения данной задачи — сложный процесс, так как объект исследования состоит из множества компонентов. В многоэлементную систему входят подъемный сосуд, направляющие проводники, металлические конструкции, армировка шахтного ствола, канатные системы и другие элементы, функционирующие в различных режимах.

Исследования в указанном направлении достаточно активно ведутся и широко представлены в научно-технической литературе. В последние годы особое внимание уделяется разработке механико-математических моделей, оптимизирующих работу роликовых направляющих в лифтовых системах, построению решений с учетом сейсмических воздействий, которые могут влиять на устойчивость и безопасность лифтовых установок [1–5]. Актуальны исследования, связанные с учетом динамических характеристик направляющих при проектировании лифтов, построение математических моделей, позволяющих предсказывать поведение системы под действием внешних факторов динамического характера [6–9]. Колебания роликовых направляющих — одна из ключевых проблем эксплуатации лифтов. В литературе рассматриваются разные подходы по снижению колебаний, включая использование демпферов и адаптивных систем управления.

Численные методы, такие как вычислительная гидродинамика (CFD), играют важную роль в оценке движения лифтов и их взаимодействия с противовесами в шахтных стволах. Численное моделирование позволяет анализировать динамические характеристики лифта, включая влияние ускорения и торможения на характеристики нагрузок на металлоконструкции армировки, а также изучать взаимодействие между лифтом и противовесом для повышения устойчивости системы [10–14]. Оно способствует улучшению проектирования лифтовых систем и повышению эффективности и безопасности их эксплуатации. Численные методы помогают оценивать аэродинамические эффекты, возникающие при движении лифта, что важно для оптимизации вентиляционных систем и обеспечения комфорта пассажиров [14–18].

Перемещение транспортных средств в стволе обуславливает возникновение боковых аэродинамических сил, влияющих на устойчивость движения лифтоподъемника, а поток воздуха — боковые смещения транспортных средств, вызывая дополнительные нагрузки на систему армировки шахтного ствола [7–9]. Взаимодействие транспортных средств с потоками воздуха необходимо учитывать с целью повышения общей безопасности и эффективности работы шахтных подъемных систем. Важен комплексный подход к проектированию и эксплуатации оборудования, чтобы минимизировать риски и обеспечить бесперебойную работу всех систем.

Цель настоящей работы — решение модельной задачи по исследованию движения лифта и противовеса в шахтном стволе на примере конструкции шахтного ствола, предполагающей движение лифта и противовеса в пределах двух направляющих.

### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Рассматривается шахтный ствол глубиной 500 м и радиусом 3 м с шестью горизонтами. Соседние горизонты располагаются по отношению друг к другу с шагом  $\sim 70$  м, начиная с глубины 80 м и ниже. В одном из секторов ствола имеется лестница стремяночного типа со ступенями, расстояние между которыми 4 м (рис. 1). При создании твердотельных моделей лифта, противовеса и ступеней принята упрощенная геометрия их формы в виде прямоугольного параллелепипеда. Размеры лифта, м: высота 2.3, длина 1.5, ширина 4.3, противовеса, соответственно,  $5.0 \times 0.2 \times 2.0$  м. Ступени имеют высоту 0.2 м, длину 1.3 м и ширину 0.9 м. Для корректного моделирования движения лифтов и элеваторов важно точно определить положение их центров тяжести. При решении модельных задач предполагалось, что центр тяжести отдельных элементов транспортной системы находится точно в геометрическом центре масс рассматриваемых тел.

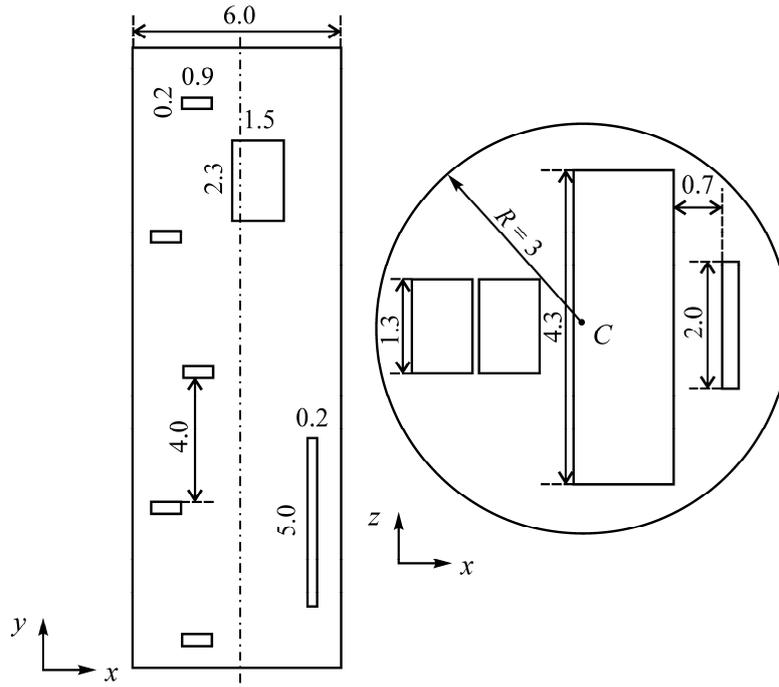


Рис. 1. Расчетная схема шахтного ствола, лифта и противовеса ( $R$  — радиус ствола,  $C$  — его центр)

В начальный момент времени лифт и противовес находились на расстоянии 26 м. Ускорение при разгоне составляло  $2 \text{ м/с}^2$ . Расстояние между лифтом и противовесом выбрано так, чтобы до момента их встречи каждый из объектов смог разогнаться до максимальной скорости 4 м/с. Горизонтальными осями в данном случае являются  $Ox$  и  $Oz$ , вертикальной, вдоль которой происходит движения лифта и противовеса, —  $Oy$  (рис. 1).

Для решения задачи использовался метод вычислительной гидродинамики как эффективный инструмент моделирования динамики воздушных потоков с учетом движения твердых тел. Учет таких внешних факторов, как изменение давления и скорости потока воздуха, позволяет более точно предсказать поведение системы в реальных условиях.

Численное решение сформулированной задачи строилось с помощью метода конечных объемов. Он включает интегрирование уравнения Навье–Стокса по каждому контрольному объему, приводя к получению системы алгебраических уравнений, выражающих закон сохранения импульса. Контрольный объем представляет собой ограниченную область в пространстве, в пределах которой интегрируются уравнения Навье–Стокса, при этом сохраняется выполнение уравнения неразрывности [19, 20]. Уравнения Навье–Стокса для каждой ячейки записываются в матричной форме. Сначала вычисляется поле скоростей, которое подставляется в уравнение неразрывности. Если полученные скорости не удовлетворяют этому уравнению, то рассчитываются давления, которые подставляются в матричную форму, и процесс повторяется до тех пор, пока не будет достигнута сходимость решений.

Базовая система уравнений модельной задачи включает уравнения неразрывности и Навье–Стокса:

$$\frac{\partial}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = 0, \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla(\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla[\vec{\tau}] + \vec{F},$$

где  $\vec{\tau}_{i,j} = 2\mu[1/2[\partial U_i / \partial x_j + \partial U_j / \partial x_i] - 1/3 \nabla \vec{V} \delta_{i,j}]$ ;  $\mu$  — динамическая вязкость;  $\delta_{i,j}$  — символ Кронекера.

Движение твердого тела можно разложить на перемещение по трем осям и вращение вокруг трех осей относительно центра масс. Для описания каждого компонента движения используются две системы координат: локальная (связана с телом) и глобальная (остаётся неподвижной). Начало координат локальной системы располагается в центре масс движущегося тела. Движение тела в глобальной системе определяется согласно второму закону Ньютона, описывающему связь между массой тела  $m$ , его ускорением  $\vec{v}$  и силами  $\sum \vec{F}$ , действующими на него:  $m\vec{v} = \sum \vec{F}$ . Вращательное движение описывается в локальной системе координат, связанной с телом (рис. 2). Кинетический момент тела равен  $\vec{L}_B = I\vec{u}_B$  ( $I$  — тензор инерции,  $\vec{u}_B$  — вектор угловой скорости тела в локальной системе координат). Вращательное движение жесткого тела решается в локальной системе, согласно теореме об изменении кинетического момента:  $d\vec{L}_B / dt = \vec{M}_B$ .

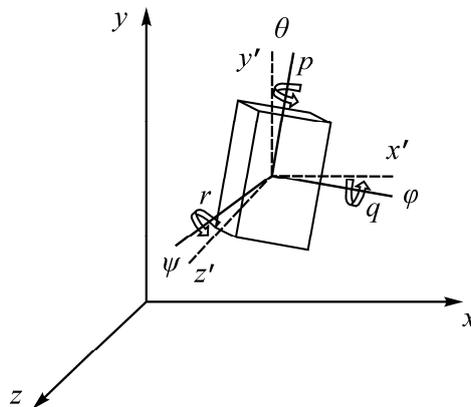


Рис. 2. Локальная и глобальная системы координат ( $\varphi$ ,  $\theta$ ,  $\psi$  — углы Эйлера)

Уравнение, описывающее вращательное движение, имеет следующий вид:

$$I \frac{d\vec{u}_B}{dt} + \vec{u}_B \times (I\vec{u}_B) = \vec{M}_B,$$

а векторы моментов преобразуются из локальной системы координат в глобальную:  $\vec{M}_B = T\vec{M}_I$ .

Матрица преобразования определяется как

$$T = \begin{pmatrix} \cos[\theta]\cos[\psi] & \cos[\theta]\sin[\psi] & -\sin[\theta] \\ \sin[\varphi]\sin[\theta]\cos[\psi] & \sin[\varphi]\sin[\theta]\sin[\psi] & \cos[\varphi]\sin[\theta] \\ \cos[\varphi]\sin[\theta]\cos[\psi] + \sin[\varphi]\sin[\psi] & \cos[\varphi]\sin[\theta]\sin[\psi] - \sin[\varphi]\cos[\psi] & \sin[\varphi]\sin[\theta] \end{pmatrix}.$$

Угловые и линейные скорости лифта и противовеса находятся с помощью численного интегрирования по результатам определения ускорений. Это позволяет точно отслеживать движение лифта и противовеса в обеих системах координат и учитывать их взаимное смещение.

Система разрешающих уравнений в проекциях для данной задачи выглядит как

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= F_{spring\_x} + F_{aero\_x}, \\ m\ddot{z} &= F_{spring\_z} + F_{aero\_z}, \\ M_x &= I_{xx}\dot{p} + qr(I_{zz} - I_{yy}), \\ M_y &= I_{yy}\dot{q} + pr(I_{xx} - I_{zz}), \\ M_z &= I_{zz}\dot{r} + pq(I_{xx} - I_{zz}), \end{aligned}$$

где  $p, q, r$  — угловые скорости относительно осей локальной системы координат;  $F_{spring\_x}, F_{spring\_z}$  — силы, действующие со стороны пружины ролика на лифт вдоль соответствующих осей;  $F_{aero\_x}, F_{aero\_z}$  — силы, возникающие от воздействия воздушного потока;  $M_x, M_y, M_z$  — моменты, создающиеся силами упругости подпружиненных роликов и аэродинамическими силами соответственно (рис. 3);  $I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}$  — моменты инерции лифта.

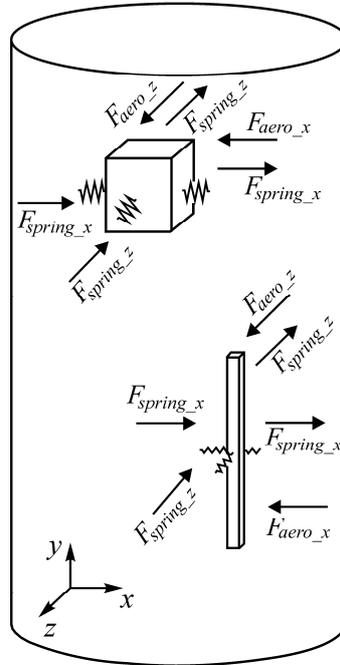


Рис. 3. Силы, действующие на лифт и противовес со стороны роликов

Для уравнений приняты следующие параметры: масса лифта 5000 кг; масса противовеса 6250 кг; моменты инерции для лифта,  $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ :  $I_x=9782, I_y=8473, I_z=3122$ ; для противовеса —  $I_x=14707, I_y=17083, I_z=13041$ ; плотность воздуха  $1.225 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; вязкость  $1.78\cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$ .

Граничные условия модельной задачи:

- на нижней границе области моделирования задан поток воздуха, поступающий со скоростью 15 м/с при атмосферном давлении;
- на верхней границе области моделирования воздух выходит при атмосферном давлении;
- на границе лифта, противовеса и стенки задано условие непроницаемости:  $v_n=0$ ;
- на каждом расчетном шаге обновляется положение лифта и противовеса.

Задача решалась с учетом движения лифта и противовеса, положение которых выступали в роли движущихся границ. На лифте также принималось условие непроницаемости, так как движение лифта и противовеса как движущихся границ существенно влияет на распределение потоков и их характеристики в системе.

Узел контакта лифта с проводниками представляет собой по два ролика с каждой стороны, совершающих качение по проводнику и воздействующих на него в лобовом направлении (вдоль оси  $Ox$ ). Также по четыре ролика с каждой стороны совершают качение вдоль оси  $Oz$  и воздействуют на проводники в боковом направлении. Лифт находится в непрерывном контакте с проводниками через 12 подпружиненных роликов и имеет пять степеней свободы: перемещения по осям  $Ox, Oz$  и вращение по осям  $Ox, Oy, Oz$ . Движение по оси  $Oy$  происходит по заданному закону движения. Аналогично обеспечивается контакт роликов противовеса с проводниками. Единственное отличие — их уменьшенное количество (шесть роликов).

Для учета контактного взаимодействия роликов лифта и направляющих к центрам масс лифта и противовеса прикладывались горизонтальные силы, равные силе упругости пружин роликов, а также моменты, создаваемые данными силами. Силы и моменты определялись положением лифта и противовеса в горизонтальной плоскости, т. е. растяжением / сжатием пружин (рис. 4).

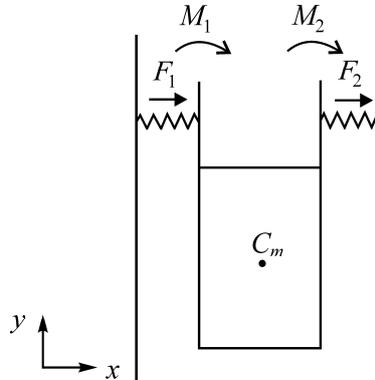


Рис. 4. Кинематическая схема системы “лифт – ролики – пружины – направляющие” без поворота лифта

В случае, когда отсутствует вращение лифта, при боковых смещениях лифта и пружины с одной стороны возникает удлинение пружины, с другой — ее сжатие. Из-за растяжения / сжатия пружин по оси  $Ox$  образуются упругие силы. Для удобства силы упругости  $F_{spring\_x}$  заменим на

$$F_1 = k(l_1 - l) \text{ и } F_2 = k(l_2 - l), \quad (1)$$

где  $k$  — жесткость пружины;  $l_1, l_2$  — длина пружин 1 и 2 после растяжения / сжатия;  $l$  — начальная длина пружин.

В системе возникают моменты сил упругости пружин относительно центра масс лифта:

$$M_1 = F_1 h, \quad M_2 = F_2 h, \quad (2)$$

$h$  — расстояние от центра масс  $C_m$  до пружин роликов. Принято, что  $\cos(\alpha) = 1$  в силу допущения о малости угла  $\alpha$ .

При повороте лифта часть пружин сжимается, другие удлиняются (рис. 5).

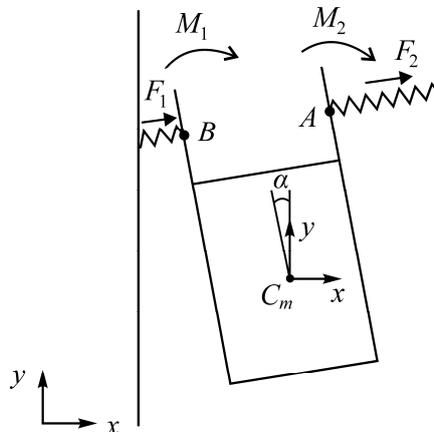


Рис. 5. Кинематическая схема системы “лифт – пружины роликов – направляющие” с учетом поворотов лифта

Для расчета новой длины пружины необходимо знать положение роликов в подвижной системе координат  $xuz$ . Она находится в центре масс лифта/противовеса. В начальный момент времени координата точки  $C_m$  равна  $(0, 0)$ . Положение координат роликов — это координаты  $A$  и  $B$ . Рассмотрим координату  $A$  (координата  $B$  определяется аналогично). В начальный момент времени координата  $A$ , согласно геометрии лифта, принимает значение 0.735, 2.300. При повороте на угол  $\alpha$  ее положение меняется:

$$\begin{aligned} A_2x &= \cos[\alpha]x - \sin[\alpha]y, \\ A_2y &= \sin[\alpha]x + \cos[\alpha]y, \end{aligned} \tag{3}$$

где  $x, y$  — координаты  $A$ ;  $A_2$  — новое положение координаты  $A$ .

Учитывая (3), найдем новые координаты точки  $A$  при повороте на угол  $\alpha$ , обозначив данное положение  $A_2$ . Так как тело совершает поступательное движение в горизонтальной плоскости, необходимо учитывать его положение в неподвижной системе координат  $xuz$  для точного определения положения ролика. Следовательно, находим новое положение точки  $A_2$  — точки  $A_3$ :  $A_3x = C_{mx} + A_2x$ ,  $A_3y = C_{my} + A_2y$  ( $C_{mx}$ ,  $C_{my}$  — координаты центра масс по осям  $x$  и  $y$ ).

Удлинение пружины (рис. 6) вычисляется как  $l_1 = (l_4 - A_3x) / \cos[\alpha]$  ( $l_4$  — координаты точки контакта с направляющей по оси  $x$ ). Значение  $l_1$  рассчитывается аналогично, как и соответствующие удлинения по оси  $z$ . Воспользовавшись (1), (2), находим упругие силы и моменты и прикладываем их к центру масс. Когда углы поворота малы ( $< 0.3^\circ$ ), удлинение определяется как  $l_1 - l = C_{mx} - C_{m0x}$  ( $C_{mx}$  — координата центра масс,  $C_{m0x}$  — координата центра масс в начальный момент времени). В этом случае угол поворота в силу его малости, не учитывается.

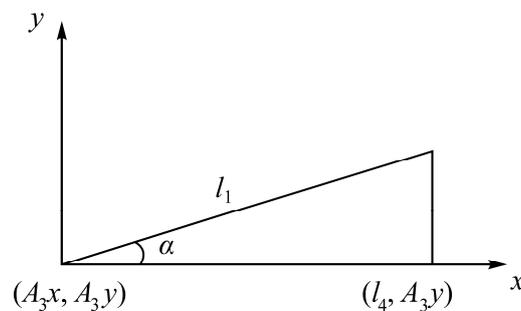


Рис. 6. Расчет длины пружины

### РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В численном эксперименте рассматривалось два случая: лифт движется вниз, а противовес едет вверх; лифт поднимается, а противовес опускается. На рис. 7 представлены горизонтальные перемещения лифта и противовеса в направлении оси  $Ox$  (лобовом) при движении лифта в шахтном стволе сверху вниз и снизу вверх при жесткостях пружин в узле контакта 35, 20, 10 кН/м. Кривые перемещений в направлении оси  $Oz$  (боковом) не приводятся в силу малости их значений. На графиках точка пересечения лифта и противовеса (момент, когда крайние точки тел находятся друг напротив друга): для лифта — 225 м, для противовеса — 228 м.

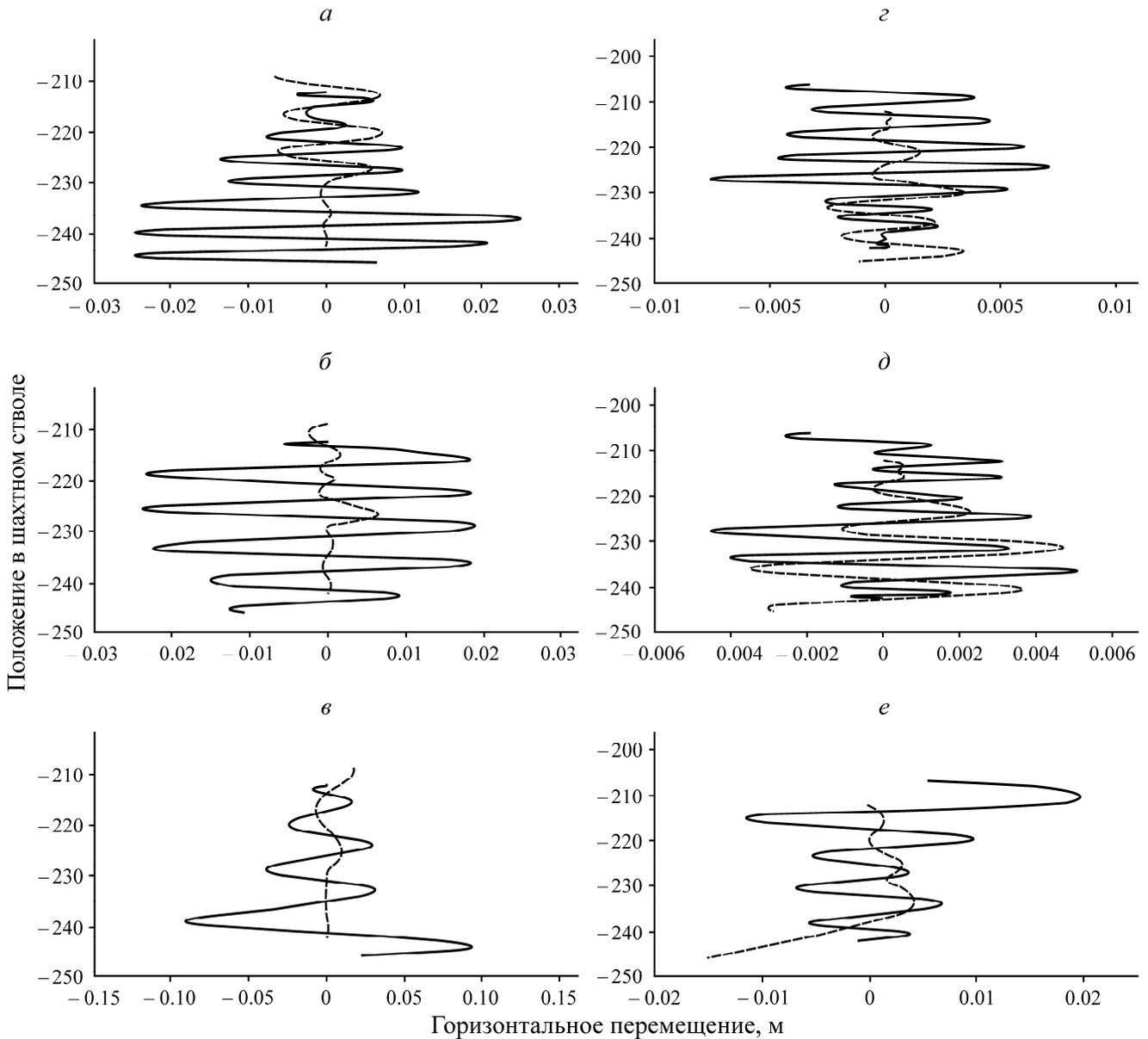


Рис. 7. Горизонтальные перемещения лифта (сплошная линия) и противовеса (штриховая) при спуске (*a*, *б*, *в*) и подъеме (*г*, *д*, *е*). Жесткость 35 (*a*, *г*), 20 (*б*, *д*) и 10 кН/м (*в*, *е*)

На рис. 8 приведено распределение давления в случае, когда воздушный поток направлен навстречу движению лифта. Давление, создаваемое лифтом, влияет на противовес. Изменения давления вокруг лифта способствуют возникновению аэродинамических сил, воздействующих на противовес. В свою очередь вокруг лифта во время движения увеличиваются области отрицательного давления. Поэтому важно учитывать влияние аэродинамических сил, когда движение воздушного потока направлено навстречу движению лифта. Точкой 2 на рис. 8 отмечены давления посередине грани противовеса, точкой 1 — в средней точке грани лифта.

Значения давлений как функций от времени представлены на рис. 9. Установлено, что наибольшее давление возникает в тех случаях, когда лифт движется навстречу воздушному потоку, что вызывает смещение как противовеса, так и самого лифта.

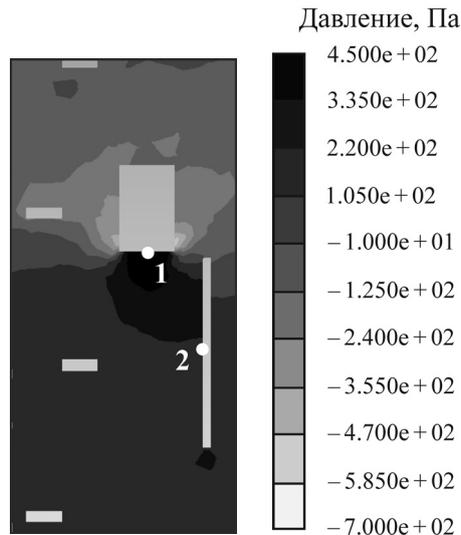


Рис. 8. Распределение давления в окрестности лифта и противовеса

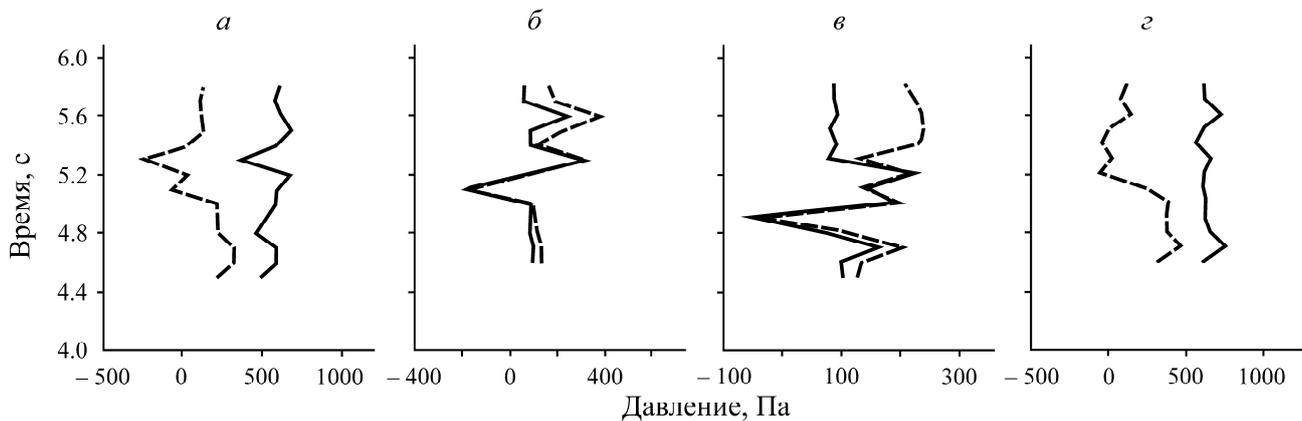


Рис. 9. Распределение давления на грани лифта и противовеса: *а, б* — поток воздуха направлен снизу вверх; *в, г* — сверху вниз. Лифт опускается (*а, в*), лифт поднимается (*б, г*), сплошная линия — давление в середине стороны лифта, штриховая — давление в середине боковой грани лифта

На основе выполненной работы получены следующие результаты:

- при использовании пружин с большей жесткостью наблюдаются меньшие амплитуды колебаний лифта и противовеса. Это свидетельствует о том, что увеличение жесткости пружин способствует улучшению устойчивости системы к горизонтальным перемещениям и снижению амплитуды колебаний, но вызывает увеличение нагрузки роликов на направляющие. Данный вывод указывает на физичность разработанной механико-математической модели;
- после “точки встречи” противовеса и лифта отмечается увеличение смещений по горизонтальной оси  $x$ . Перемещения по горизонтальной оси  $x$  объясняются динамикой потока воздуха в шахтном стволе, что подчеркивает необходимость учета аэродинамических факторов при проектировании систем подъема;
- контуры давления быстро меняются, когда лифт и противовес проходят друг мимо друга. При этом зоны отрицательного давления увеличиваются в области боковых поверхностей тел. На нижней или верхней стенках лифта, в свою очередь, возникает область повышенного давления, оказывающего влияние на противовес;

- максимальные горизонтальные перемещения лифта и противовеса наблюдаются в момент, когда воздушный поток направлен навстречу движению лифта. Это подчеркивает значимость учета аэродинамических факторов при проектировании лифтоподъемных систем;
- с уменьшением жесткости пружин требуется больший период времени для стабилизации траектории движения системы. Пружины малой жесткости увеличивают период отклика системы, что может негативно сказаться на роликах и направляющих в системах лифтоподъемника.

## ВЫВОДЫ

Получено распределение давления в шахтном стволе, а также поле горизонтальных перемещений элементов лифтоподъемника и противовеса. Поток воздуха влияет на движение лифта и противовеса. Полученные результаты могут использоваться для определения напряженно-деформированного состояния проводников вследствие силового контактного воздействия на них со стороны роликов; полезны при выборе параметров пружин, что позволит повысить производительность лифтоподъемника и оптимизировать параметры колебаний системы при эксплуатации; важны в разработке новых технологий и усовершенствовании существующих систем, что будет способствовать повышению безопасности и надежности работы лифтоподъемников в шахтах. Оптимизация параметров движения системы обеспечит более стабильную и безаварийную работу лифта и противовеса.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang X., Günay S., and Lu W. Mechanical model and seismic study of the roller guide–rail assembly in the counterweight system of elevators, *Earthquake Eng. Struct. Dynam.*, 2021, Vol. 50, No. 2. — P. 518–537.
2. Shima Y. and Furuya O. Study on a vibration reduction system for lift roller guides, 11<sup>th</sup> Symp. Lift and Escalator Technol., 2020, Vol. 11. — P. 97–108.
3. Drzewosz A. and Wolny S. The problem of stability in mechanical systems using the example of mine hoist installations, *Appl. Sci.*, 2024, Vol. 14. — 6472.
4. Журавков М. А., Николайчик М. А. Построение цифровых двойников элементов рудника // Горная механика и машиностроение. — 2023. — № 2. — С. 5–14.
5. Hu D., Wang Q., and Zhan J. Research on vibration reduction characteristics of high-speed elevator with rolling guide shoes based on hydraulic damping actuator, *Actuators*, 2024, Vol. 13. — 356.
6. Ни Б., Пэн Б., Го Ц., Лью С., Лью С., Шэнь Ц. Исследование характеристик нарушения воздушного потока в воздухоподающих стволах // ФТПРПИ. — 2018. — № 3. — С. 97–111.
7. Журавков М. А., Хвесеня С. С., Савчук В. П., Николайчик М. А. Моделирование динамического воздействия подъемного сосуда на направляющие в стволе с использованием данных системы мониторинга плавности движения // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2019. — Т. 6. — № 2. — С. 97–102.
8. Трифанов Г. Д., Микрюков А. Ю. Результаты испытания системы контроля плавности движения подъемного сосуда в шахтном стволе // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромыслового оборудования. — 2014. — Т. 1. — С. 41–47.
9. Nikolaitchik M. Determination of the skip force effect on guides in mine shaft, *E3S Web of Conf.*, 2020, Vol. 201. — 01017.

10. Левин Л. Ю., Семин М. А. Оценка влияния местных сопротивлений на воздухораспределение в шахтах и рудниках // ФТПРПИ. — 2019. — № 2. — С. 120–130.
11. Wu R., Zhu Z., and Cao G. Computational fluid dynamics modeling of rope-guided conveyances in two typical kinds of shaft layouts, PloS One, 2015, Vol. 10. — e0118268.
12. Park Y., Na J., Sung K. H., and Ryou H. S. Numerical study on the effect of elevator movement on pressure difference between vestibule and living room in high-rise buildings, Building Simulation, 2019, Vol. 12. — P. 313–321.
13. Wu R., Zhu Z., Chen G., Cao G., and Li W. Simulation of the lateral oscillation of rope-guided conveyance based on fluid-structure interaction, J. Vibroengineering, 2014, Vol. 16. — P. 1555–163.
14. Казаков Б. П., Шалимов А. В., Паршаков О. С., Богомялков А. В. Улучшение проветривания тупиковой выработки путем увеличения начальной скорости воздуха в вентиляционной струе // ФТПРПИ. — 2022. — № 1. — С. 112–118.
15. Ang J. H., Yusup Y., Zaki S. A., Salehabadi A., and Ahmad M. I. CFD study on the behaviour and turbulence of the airflow induced by the moving elevator car in elevator shaft using K-epsilon model, CFD Letters, 2019, Vol. 11. — P. 1–2.
16. Ang J. H., Yusup Y., Salim S. A., and Ahmad M. I. A CFD study of flow around an elevator towards potential kinetic energy harvesting, J. Adv. Res. Fluid Mech. Thermal Sci., 2019, Vol. 59. — P. 54–65.
17. Левин Л. Ю., Семин М. А., Клюкин Ю. А., Накаряков Е. В. Исследование аэро- и термодинамических процессов, протекающих на начальном этапе организации сквозного проветривания рудника // Вестн. ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. — 2016. — Т. 15. — № 21. — С. 367–377.
18. Zhang T., Wei G., and Liu S. Numerical modeling of cross-transmission of airborne pollutants in a high-rise building induced by elevator car movement, Appl. Sci., 2023, Vol. 13. — 7400.
19. Moukalled F., Mangani L., and Darwish M. The finite volume method, Springer Int. Publish., 2016. — P. 103–135.
20. Barth T., Herbin R., and Ohlberger M. Finite volume methods: foundation and analysis, Encyclopedia of Computational Mechanics, 2018. — P. 1–60.

*Поступила в редакцию 16/X 2024*

*После доработки 20/I 2025*

*Принята к публикации 23/I 2025*