

при изотермическом нагружении пластины радиальными нагрузками с подобными максимальными значениями ($T = 293 \text{ K}$): $1 - p_r = p_{r0}$; $2 - p_r = p_{r1}(r_0 - r)$; $3 - p_r = p_{r2}(r_0^2 - r^2)$. Перемещения от постоянной радиальной нагрузки превышают перемещения от линейной и квадратичной нагрузок в 3,51 и 2,25 раза соответственно, что объясняется ее большей равнодействующей.

Рисунок 1, б иллюстрирует изменения радиальных перемещений вдоль радиуса пластины при статически эквивалентных нагрузках: $1 - p_r = p_{r0}$; $2 - p_r = 3p_{r0}(1 - r/r_0)$; $3 - p_r = 2p_{r0}(1 - r^2/r_0^2)$. Здесь максимальные перемещения от нагрузки с постоянной составляющей преобладают. Их величины больше перемещений от линейной и квадратичной нагрузок соответственно на 14,6 и 11,1 %.

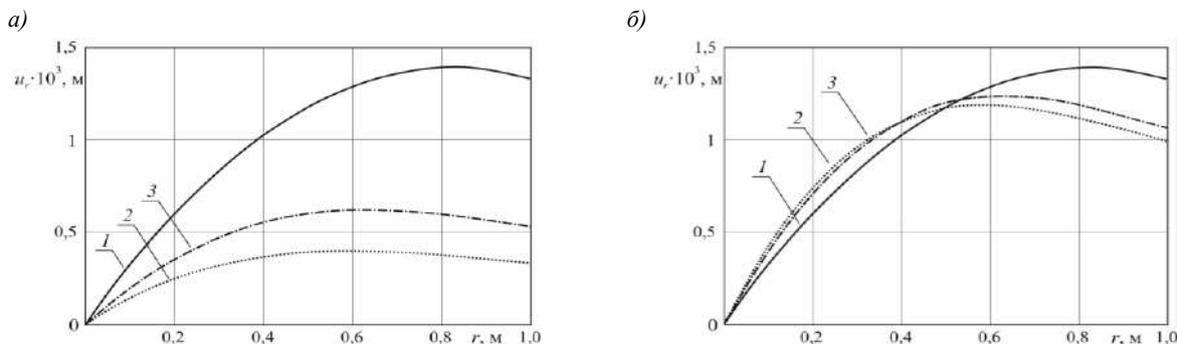


Рисунок 1 – Изменение радиальных перемещений $u_r(r)$ при нагрузке с одинаковой
а – интенсивностью; б – равнодействующей

Таким образом, в пластине со свободным контуром перемещения от равномерно распределенной радиальной нагрузки превышают перемещения от линейной и квадратичной нагрузок как при их одинаковой амплитуде, так и при одинаковом статическом эквиваленте.

Работа выполнена при финансовой поддержке БР ФФИ (проект № T22M-072).

Список литературы

- 1 Журавков, М. А. Математические модели механики твердого тела // М. А. Журавков, Э. И. Старовойтов. – Минск : БГУ, 2021. – 535 с.
- 2 Нестерович, А. В. Радиальное и тангенциальное неосесимметричное нагружение круговой трехслойной пластины / А. В. Нестерович // Механика. Исследования и инновации : междунар. сб. науч. тр. – Гомель : БелГУТ, 2020. – Вып. 13. – С. 116–121.
- 3 Нестерович, А. В. Осесимметричное нагружение круглой физически нелинейной трехслойной пластины в своей плоскости / А. В. Нестерович // Проблемы физики, математики и техники. – 2021. – № 3 (48). – С. 24–29.

УДК 539.3, 51-74, 534.014.1, 534.014.2, 539.62

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ШАХТНОГО ПОДЪЕМНОГО КОМПЛЕКСА

М. А. НИКОЛАЙЧИК, М. А. ЖУРАВКОВ

Белорусский государственный университет, г. Минск

Комплекс шахтного подъемного сосуда (скипа) является одним из ключевых систем подъемного шахтного комплекса. Скипы занимают чрезвычайно важное место в работе предприятия по подземной добыче полезного ископаемого. Они предназначены не только для подъема полезных ископаемых на поверхность, но и для спуска в шахты крупногабаритной техники. Обеспечение безаварийного и оптимального режима работы системы требует решения сразу нескольких задач механики.

Сложность исследования таких проблем обусловлена большим количеством элементов в системе и тем, что каждый элемент может выполнять отдельную функцию и иметь собственный режим работы.

Конструкции, обеспечивающие безопасность движения скипов, имеют следующий вид. К полкам тубинговой колонны ствола с помощью болтового соединения присоединяются горизонталь-

ные балки прямоугольного сечения (расстрелы), составляющие структуру, вид которой зависит от расположения скипов в стволе. Данная структура повторяется каждые несколько метров (как правило, 3–6 м – шаг армировки). Также с помощью болтового соединения обеспечивается связь между расстрелами и вертикально расположенными направляющими устройствами – проводниками. Проводники обеспечивают движение скипа в пределах выделенного контура армировки.

На протяжении всего движения скип находится в постоянном контакте с проводниками в четырех точках. Постоянный контакт скипа с проводниками обеспечивается через подпружиненные ролики. В каждом узле контакта находятся три подпружиненных ролика, совершающие плоскопараллельное движение относительно проводника.

Целью данного исследования являлось моделирование напряженно-деформируемого состояния элементов конструкций шахтного подъемного комплекса при движении подъемного сосуда.

На начальном этапе исследования встает вопрос о создании модели, описывающей динамику скипа. В предыдущих исследованиях [1–4] разработан ряд механико-математических моделей движения шахтного подъемного сосуда. При этом разработанные алгоритмы позволяют находить величины силового взаимодействия скипа с проводниками с помощью системы мониторинга плавности движения [2, 3], установленной на подъемном сосуде и фиксирующей величины горизонтальных ускорений, а также с использованием данных профилировки проводников [4] – отклонений проводников от вертикальной оси между расстрелами. К преимуществам использования данных системы мониторинга плавности движения можно отнести возможность нахождения контактных усилий в режиме реального времени, однако данная модель позволяет определять только суммарные силовые характеристики вдоль горизонтальных осей подвижной системы координат. При этом модель, использующая в качестве входных параметров данные профилировки проводников, позволяет определять значения контактных нагрузок вдоль всех осей координат, однако требует актуальных данных профилировки проводников. Это осложняется тем, что измерение профилировки проводится не чаще, чем в раз несколько месяцев. За это время могут заменяться и, соответственно, изменяться многие звенья проводников профиль проводников, что сказывается на корректности расчетов.

В дальнейшем встает задача о детальном анализе контактного взаимодействия скипа с проводниками [5, 6]. Рассматривается задача определения напряженно-деформированного состояния контактной зоны взаимодействия пары «ролик – проводник» методами численного моделирования. При моделировании контактного взаимодействия ролика с проводником рассматриваются различные конфигурации контакта как без трения, так и с различными коэффициентами трения [3]. Найдены критические значения сил воздействия скипа на проводник через ролики, приводящие к возникновению остаточных (пластических) деформаций проводника. Результаты моделирования верифицированы аналитическими решениями для некоторых условий контакта.

Разработанные алгоритмы решения контактной задачи позволяют произвести оценку количества циклов нагружения со стороны скипа, приводящих к усталостному разрушению проводника. При этом также рассматриваются различные условия контакта, в том числе возможность взаимодействия проводника как с одним роликом, так и с двумя одновременно. В рамках решения задачи многоциклового контактного взаимодействия и износа проводника принимаются различные методы корректировки среднего напряжения. Получены значения количества циклов до усталостного износа проводника в зависимости от условий контактного взаимодействия с роликами, а также метода корректировки среднего напряжения.

Также рассмотрена задача оценки колебательных характеристик системы «ролик – проводник». Получены собственные частоты колебаний проводника и собственные частоты колебаний в условиях контакта с роликом. Определены некоторые режимы движения подъемного сосуда, которые могут потенциально приводить к резонансным колебаниям системы.

Таким образом, в рамках исследований рассмотрен ряд задач, возникающих при эксплуатации шахтных подъемных комплексов. Произведена оценка сил взаимодействия скипа с проводниками в зависимости от типа входных данных. Разработана численная модель контактного взаимодействия ролика с проводником, которая позволяет производить оценку напряженно-деформируемого состояния контактной зоны, а также получать величины воздействия скипа на элементы армировки, приводящие к возникновению пластических деформаций проводника. Помимо этого, решение контактной задачи позволило получить количество циклов воздействия скипа на проводник до усталостного разрушения последнего. Рассмотрена задача определения колебательных характеристик

контактной пары «ролик – проводник», позволяющая находить опасные с точки зрения возникновения резонанса режимы движения скипа. Полученные в рамках исследований результаты могут быть использованы для обеспечения безопасной эксплуатации шахтных подъемных комплексов, а также оценки возможности повышения скорости движения скипов, что, в свою очередь, обеспечит повышение экономических показателей добычи полезного ископаемого.

Список литературы

- 1 **Zhuravkov, M. A.** Analytical model of skip motion taking into account influence of head and balancing ropes / M. A. Zhuravkov, V. P. Savchuk, M. A. Nikolaitchik // Journal of the Belarusian State University. Mathematics and Informatics. – 2021. – Vol. 2 – P. 105–113.
- 2 **Nikolaitchik, M. A.** Determination of the skip force effect on guides in mine shaft / M. A. Nikolaitchik // E3S Web of Conferences. – Vol. 201. – 01007.
- 3 Моделирование динамического воздействия подъемного сосуда на направляющие в шахтном стволе с использованием данных системы мониторинга плавности движения / М. А. Журавков [и др.] // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2019. – Т. 6, № 2. – С. 97–103.
- 4 Определение силового взаимодействия скипа с направляющими по данным профилировки проводников / М. А. Журавков [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения. – Минск, 2020. – Вып. 9. – С. 38–41.
- 5 Моделирование контактного взаимодействия между элементами подъемного шахтного комплекса при оценках безопасности / М. А. Журавков [и др.] // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. Научный информационный сборник. – 2021. – № 4. – С. 9–25.
- 6 **Журавков, М. А.** Контактная задача взаимодействия направляющего ролика с шахтным проводником / М. А. Журавков, М. А. Николайчик, П. С. Маевский // Механика машин, механизмов и материалов. – 2021. – № 3 (56). – С. 82–88.

УДК 656.21:004.8

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СКАТЫВАНИЯ ПРОСТЕЙШИХ ИМИТАЦИЙ ВАГОНОВ С ПОВЕРХНОСТИ СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ

С. П. НОВИКОВ, А. К. ГОЛОВНИЧ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

При расформировании составов на станции вагоны после прохождения горба сортировочной горки скатываются под воздействием силы тяжести и тормозящего или ускоряющего влияний сил сопротивления, ветровой нагрузки в зависимости от массы вагонов, характера продольного профиля, состояния пути, длины скатывающихся отцепов, наличия дефектов подвижного состава и др. Поэтому динамическая модель, конструирующая данные процессы, оказывается достаточно сложной и требует задания большого количества исходных данных по всем путям головы сортировочного парка, структуре расформировываемого вагонопотока, техническому состоянию путей скатывания вагонов [1, 2]. Кроме того, динамику движения отцепов на горке определяют режимы торможения, корректирующие интервалы между смежными отцепами для безопасного перевода стрелок по маршрутам следования вагонов в сортировочный парк.

В качестве наиболее простой имитации движущегося по сортировочной горке одиночного вагона рассматривается его идеализированный образ в виде металлического шара постоянной плотности массой M , скатывающегося с некоторой наклонной поверхности, профиль которой описывается уравнением $y = f(x)$ (рисунок 1).

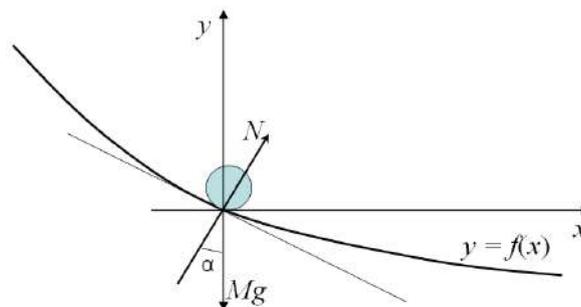


Рисунок 1 – Расчетная схема движения шара по наклонной поверхности