

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-6-71-79

*\*Тихонов А.А., Польшин А.А., Любимый Н.С., Герасимов М.Д.**Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова**\*E-mail: cherep2240@rambler.ru*

## АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗГРУЗКИ КОВШЕЙ ЭЛЕВАТОРА

**Аннотация.** Целью статьи является анализ исследований, результаты которых используются при расчетах элеваторов с умеренными скоростными режимами, для выяснения пригодности их отдельных положений для разработки параметров центробежной разгрузки скоростных элеваторов. Значительный интерес представляют труды, посвященные непосредственно или косвенно исследованию работы скоростных элеваторов, результаты которых не получили достойной трактовки и развития. В связи с тем, что эффективность работы скоростных элеваторов определяется не только качеством центробежной разгрузки, но и работой ленточно-барабанного механизма без пробуксовки, возникает необходимость анализа исследований, направленных на решение этой проблемы. В статье приведены известные решения для определения параметров центробежной разгрузки, которые базируются на различных гипотезах движения частиц материала внутри ковша. Изучены физико-механические явления, которые влияют на движения частиц материала в ковше элеватора, выявлены преимущества и недостатки каждой гипотезы. Теоретическое исследование процесса центробежной разгрузки осложняется тем, что при движении и выходе материала из ковша мы имеем дело с неустойчивым движением сыпучего материала под действием изменяющейся системы сил: сил притяжения, центробежной и кориолисовой сил, силы трения. Между тем, как известно, даже самые простые случаи движения материала при гравитационном или смешанном режиме разгрузки трудно поддаются теоретическому анализу. В связи с этим, были установлены зависимости и методы построения траекторий движения материала, а также актуальность использования того или иного уравнения.

**Ключевые слова:** центробежная разгрузка, ковшовый элеватор, траектория движения, относительная скорость, норья, угол метания.

Данная статья актуальна для отрасли сельского хозяйства. Увеличение урожайности, зерновых культур является одним из главных направлений в сельском хозяйстве. Именно зерна, всё более уязвимы к механическому воздействию, при неоднократной перегрузке посевных материалов возникает травмирование значительной части зерна, что приводит к его последующим невсходам. Исходя из этого фактора, вопрос расчета параметров элеватора является важной и актуальной задачей, позволяющей на основе адекватных математических моделей оптимизировать конструкционные и технологические параметры элеватора по критерию минимального травмиривания зерна.

Основным фактором, определяющим параметры ленточного барабанного механизма норрии, является процесс разгрузки ковшей и связанный с ним характер свободного движения зернового потока в головке, от которых зависят производительность и качество перегрузки зерна. Как правило, высокопроизводительные элева-

торы с большой скоростью движения ленты работают в режиме центробежной разгрузки ковшей, который наименее изучен в связи со сложностью физико-механического процесса.

Элеватор – это машина непрерывного действия, представляющая собой вертикальный ленточный (в некоторых случаях цепной) конвейер, предназначенный для перемещения насыпных и штучных грузов под углом, как правило, 60–82 °. Основными параметрами являются мощность на приводном валу элеватора, мощность двигателя, частота вращения приводного вала элеватора, передаточное число между валом двигателя и приводным валом элеватора. Так же важнейшим параметром является процесс разгрузки, в котором большое внимание уделяется травмириванию материала о стенки корпуса элеватора. Процесс разгрузки сыпучего материала состоит из двух взаимосвязанных этапов: первый - это движение материала внутри ковша с дальнейшим выбросом, второй - свободный полет зерна в головке норрии по траектории, параметры которой зависят от

скорости и угла метания зерна. Данные параметры малоизучены, хотя очень актуальны, есть гипотезы различных ученых, которые вели разработки о теории движения частиц внутри элеватора, но каждая гипотеза разнится с другой и не учитывает того или иного фактора. Поэтому нужно провести анализ теоретических закономерностей расчета элеваторов, выявить преимущества и недостатки каждой методики, с целью создания расчетной базы для построения новых математических закономерностей, которые позволят создать теоретические основы расчета скоростных элеваторов, с учетом тех критериев и параметров, которые раньше учтены не были.

**Основная часть.** Начало разработки теории ковшовых элеваторов было положено работой А.В. Сикерина [10]. В основу была положена гипотеза о том, что при выбросе материала из ковша частицы должны двигаться вдоль нижней или верхней стенки в зависимости от кинематического режима. Были составлены и рассмотрены уравнения движения частицы материала по внутренней стенке ковша, выяснено существенное влияние кориолисового ускорения на сброс частицы [6].

Развивая идею А.В. Сикерина о движении частицы материала по плоской стенке ковша с учетом силы Кориолиса, профессор П.С. Козьмин составил и дал решение дифференциального уравнения движения частицы материала по внешней кромке ковша, которое дает зависимость между пройденной частицей по стенке путем  $S$  и углом поворота перпендикуляра, проведенного из центра вращения на линию плоскости прямолинейной стенки ковша, определяющего положение ковша [11]. Решение дано в виде отношения  $S/h$  ( $h$  - расстояние полюса), которое выражается громоздким сочетанием показательных и тригонометрических функций углов поворота  $\omega t$  и угла трения  $\rho$ . П.С. Козьмин построил ряд графиков, позволяющих получить приближенные выражения.

В дальнейшем Н.К. Фадеевым [19] было сделано предположение, что влияние сил трения при движении частиц по стенкам незначительно, так как составляющие силы инерции и силы тяжести действуют в разные стороны и разница их невелика, а кориолисовая сила мала. В связи с этим Н.К. Фадеев считает, что выражение для  $S/h$  может быть упрощено, принимая  $\rho = 0$ . Анализ решений А.В. Сикерина и П.С. Козьмина, проведенный Н.К. Фадеевым, показал, что движение частиц по внешней стенке при угле поворота менее  $90^\circ$  невозможен, поскольку не выполняется условие отсутствия отрыва частиц от стенки. При этом установлено, что длина верхней стенки

ковша  $l = s$ , не должна превышать величину  $l = 0,4 \cdot r_B$ , где  $r_B$  - радиус барабана.

Для того, чтобы частица прошла путь  $l = 0,4 \cdot r_B$ , ковш должен повернуться от вертикальной оси на угол:

$$\varphi = \omega t \approx 110 \cdot \sqrt[3]{\frac{0,4 \cdot r_B}{r_B}}, \quad (1)$$

Из формулы получаем  $\varphi \approx 81^\circ$ . Практические расчеты показывают, что этот угол больше, чем  $90 - \varphi_n$ , ( $\varphi_n$  - начальный угол движения), а, следовательно, материал не попадает в отводной рукав (лоток) элеватора. Поэтому для полного отсутствия обратной сыпи в холостую ветвь элеватора длина передней стенки не может быть больше, чем  $0,25 \cdot r_B$ . В связи с этим для высокоскоростных зерновых норий-элеваторов рекомендуется применять достаточно большие диаметры барабанов при относительно малых размерах ковшей, как и осуществлялось в нориях старых конструкций [3].

Н.К. Фадеев также отмечает, что эти зависимости нельзя использовать для анализа движения материала, который не лежит на стенках ковша, так как истинное направление движения частиц в ковше практически не известно. Н.К. Фадеев предполагает, что выход материала из ковша происходит в результате отрыва частиц от поверхности, образованной разделительной линией РА (рис. 1), соединяющей полюс Р с точкой А на кромке верхней стенки ковша. Такое направление движения материала в ковше не было подтверждено дальнейшими наблюдениями [5].

Профессор П.С. Козьмин предложил также метод построения траекторий, движение частицы в головке элеватора, полагая, что координаты точек параболической траектории можно определить с помощью уравнений:

$$x = \vartheta \cdot t; y = \frac{g \cdot t^2}{2}. \quad (2)$$

Координата  $x$  откладывается вдоль касательной, проведенной в любой точке на окружности радиуса внешней кромки ковша  $R_k$  [2]. Точки на касательной выходят соответственно для времени  $t$ , которое последовательно принимается в долях секунды порядка 0,1; 0,2; 0,3 и т.д. Из каждой точки на касательной, перпендикулярно к горизонтальной плоскости откладываются отрезки равные  $y$ . Соединяя концы отрезков плавной кривой, получаем параболическую траекторию движения частицы с началом в точке касания.

На рис. 2 приведена схема построения траекторий и формы головки по методу П.С. Козьмина для центробежно-гравитационной разгрузки [12].

Такой метод построения траекторий является приближенным, поскольку скорость метания  $\vartheta$  принимается равной переносной  $\vartheta_n$ , то есть

окружной скорости ленты. На самом деле при сочетании вращательного и поступательного движений абсолютная скорость метания будет определяться геометрической суммой переносной  $\vartheta_n$  и относительной  $\vartheta_s$  скоростей движения частицы при выбросе из ковша [4]. Величина и направление вектора абсолютной скорости будет зависеть от величины и направления вектора относительной скорости. Это обстоятельство учел Н.К. Фа-

деев, полагая, что относительной скоростью является скорость движения частицы вдоль верхней кромки ковша, и которую приближенно можно определить по зависимости:

$$\vartheta_s = \vartheta \frac{3S}{r_b \omega t}, \tag{3}$$

где  $S$  – пройденный до сброса путь,  $\omega t$  – угол поворота ковша за время движения частицы,  $\vartheta$  – скорость ленты.

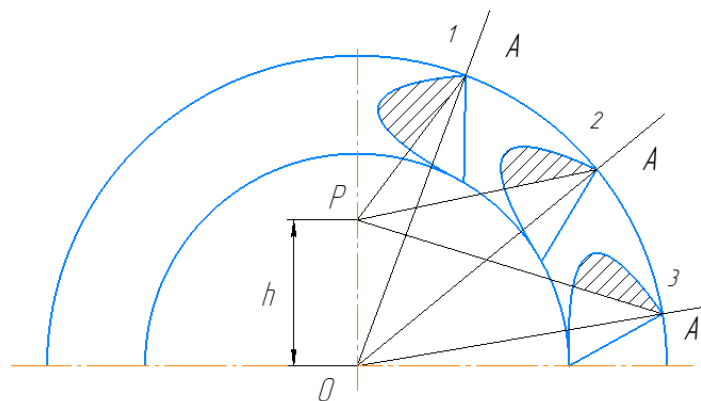


Рис. 1. Предельное положение поверхности материала по плоскости PA:  $h$  – высота полюса;  $P$  – полюс;  $A$  – кромки ковша

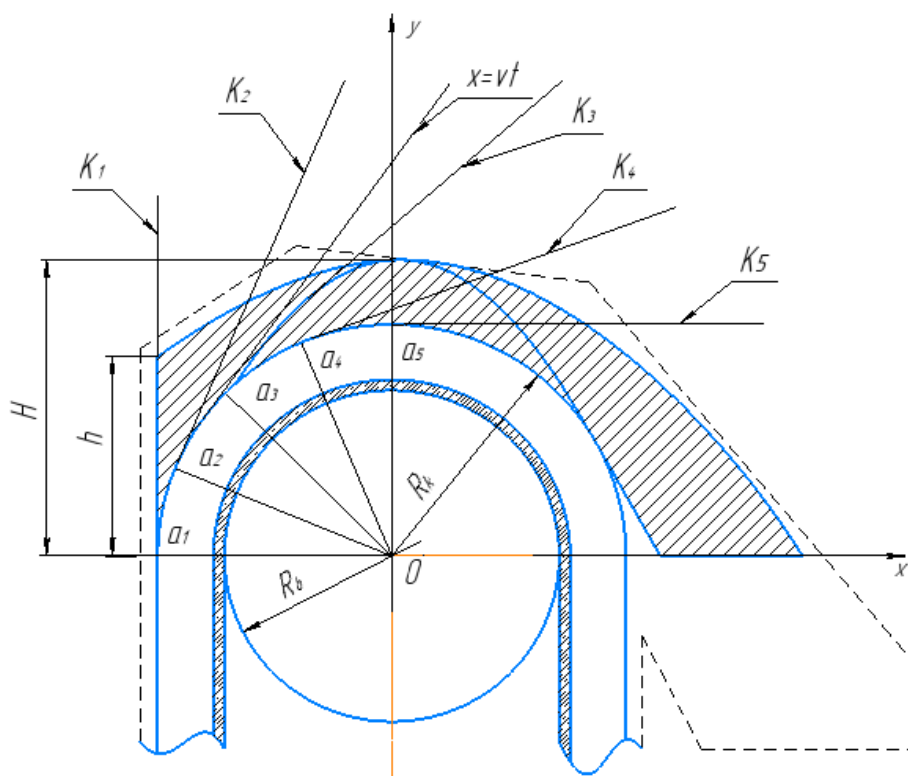


Рис. 2. Схема построения траекторий и формы огибающей головки по методу П.С. Козьмина:  $R_b$  – радиус барабана;  $R_k$  – радиус внешней кромки;  $a_1 - a_6$  – точки построения с шагом в  $30^\circ$ ;  $K_1 - K_6$  - касательные траектории;  $H$  - высота параболы;  $h$  – высота полюса;  $x = vt$  – уравнение движения зерна

Предварительный анализ показывает, что этот способ определения относительной скорости представляет большие трудности, поскольку требует громоздких вычислений. Кроме того, в этом случае вектор относительной скорости направлен в сторону движения ковша и,

следовательно, скорость метания будет больше переносной [7]. Величину абсолютной скорости можно определить только путем геометрических построений.

В работе [16] рассмотрен процесс разгрузки ковшей без дна, что входят друг в друга и

имеющие специфическую прямолинейную форму (рис. 3). В процессе исследования принято, что материал скользит вдоль верхней прямолинейной стенки ковша и вектор относительной скорости направлен вдоль этой стенки. В этом случае вектор относительной скорости направлен под углом к радиусу ковша и отклонен в сторону его движения. Для центробежной разгрузки получено следующее значение относительной скорости:

$$v_r = \omega \sqrt{(r + A)^2 - \frac{(r+A)\cos^2(\alpha-\varphi)}{\cos^2(\alpha-\varphi-\gamma)}}, \quad (4)$$

где  $A$  – вылет ковша,  $\alpha$  – угол поргрузки ковша,  $\gamma = 180/n$  – угол, образованный радиусами  $r_0$  и  $r_i$  ( $n$  – число ковшей на длине  $\pi \cdot r$ ),  $\varphi$  – угол трения. Согласно формулы скорость  $v_r$  увеличивается с увеличением углов  $\alpha$  и  $\gamma$  и уменьшается с увеличением угла трения (коэффициента трения). Абсолютная скорость выброса  $v_a$  больше переносной скорости  $v_e$  и согласно геометрической схеме увеличивается с увеличением относительной скорости  $v_r$  [8].

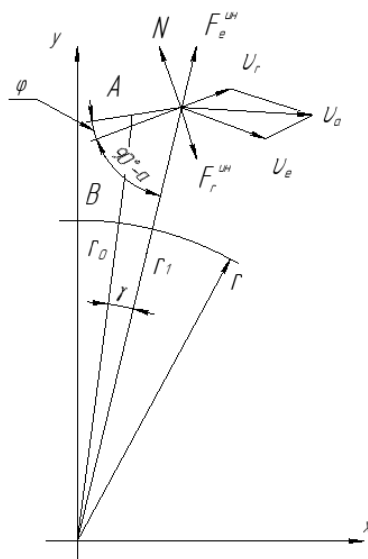


Рис. 3. Схема к определению относительной скорости перемещения материала при центробежной разгрузке ковша:  $A$  – вылет ковша;  $\varphi$  – угол трения;  $\gamma$  – угол между  $r_0$  и  $r_1$ ;  $v_a$  – абсолютная скорость выброса;  $v_e$  – переносная скорость;  $v_r$  – относительная скорость;  $F_e^{UH}$  и  $F_r^{UH}$  – силы инерции

С учетом значений  $v_r$ , построены траектории свободного полета частиц материала в головке норрии по методике П.С. Козьмина, а также нанесены верхняя и нижняя границы в виде кривых, полученных с помощью

скоростной киносъемки (рис. 4). Исследование проведено при кинематическом режиме с показателем  $p = 0,425$  ( $v_i = 2,4$  м/с,  $D_B = 0,5$  м) [18].

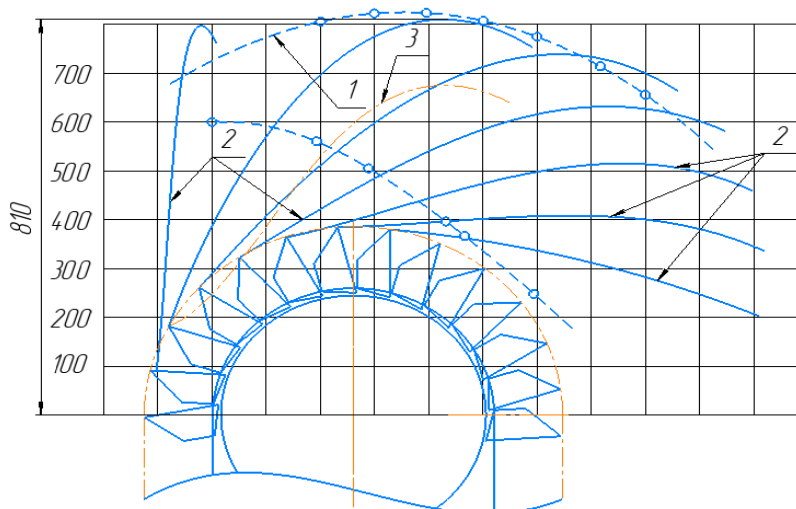


Рис. 4. Траектории движения частиц, определяющие движение головки: 1 – верхний предел траектории полета частиц, полученный скоростной киносъемкой; 2 – сумма кривых, полученных путем построения с учетом трения частиц о стенку ковша; 3 – верхний предел кривых, построенных без учета трения; 4 – нижний предел траекторий полета частиц, полученный скоростной киносъемкой

Как видно из рис. 4, построенные расчетные траектории движения частиц с учетом их трения о стенку ковша, так и без учета трения абсолютно не вписываются в реальные криволинейные границы потока, определенные с помощью скоростной киносъемки, однако Н.К. Фадеев не дает по этому поводу никаких объяснений. На самом деле траектории построены по неправильно определенному значению (как по величине, так и по направлению) относительной и абсолютной скорости. Значение относительной скорости  $v_r$  по формуле (4) не зависит от угла поворота ковша и при движении ковша по кругу является величиной постоянной, в то время, как будет показано далее, реально она увеличивается от нуля до максимума при угле поворота ковша в пределах  $0 \div 180^\circ$ . Вектор относительной скорости движения частиц будет направлен по отношению к радиусу ковша в сторону, противоположную направлению вращения, и, соответственно, величина абсолютной скорости и направление ее вектора будут другими, при этом величина абсолютной скорости  $v_a$  не будет большей, чем величина переносной  $v_e$  [9]. Вследствие этого траектории полета частиц будут короче и более кривыми, что и зафиксировала скоростная киносъемка.

Применение больших скоростей на элеваторных нориях исследовались Г.И. Креймерманом с сотрудниками "Союзпродмашины" [17]. Ставилась задача выяснить возможность повышения

производительности нории путем повышения скорости рабочих органов. Лимитом скорости служило одно из следующих условий: заметное разрушение зерна; обратная сыпь в нисходящую ветвь (не более 1,5...2 %); появление сыпа зерна на восходящей ветке; усложнение конструкции, главным образом, головки. Испытания проводились на скоростях 2,3; 3,68; 4,86 и 6,2 м/с для шести типов ковшей различной емкости и конструкции. В качестве положительных результатов можно отметить следующее: вопреки бытующему мнению о том, что с увеличением скорости без соответствующего увеличения диаметра барабана объем обратной сыпи будет увеличиваться [1], была совершенно четко выявлена тенденция к снижению обратной сыпи при увеличении скорости ленты. Почти полное выбрасывание было получено даже при малом диаметре барабана (500 мм) при принудительном движении зерна с низким криволинейным сводом головки в виде изогнутого железного листа, при достаточно высокой скорости ленты 3,68 м/с (рис. 5). Коэффициент заполнения ковша практически не влияет на выбрасывание зерна и обратную сыпь, но влияет на прямую сыпь (сыпь в восходящую ветвь нории). При подъеме уровень естественного откоса зерна в ковше не должен превышать  $5^\circ$  что и определяет необходимые параметры ковша [20].

Испытания проводились для пшеницы и овса, влажность зернового материала не указывалась.

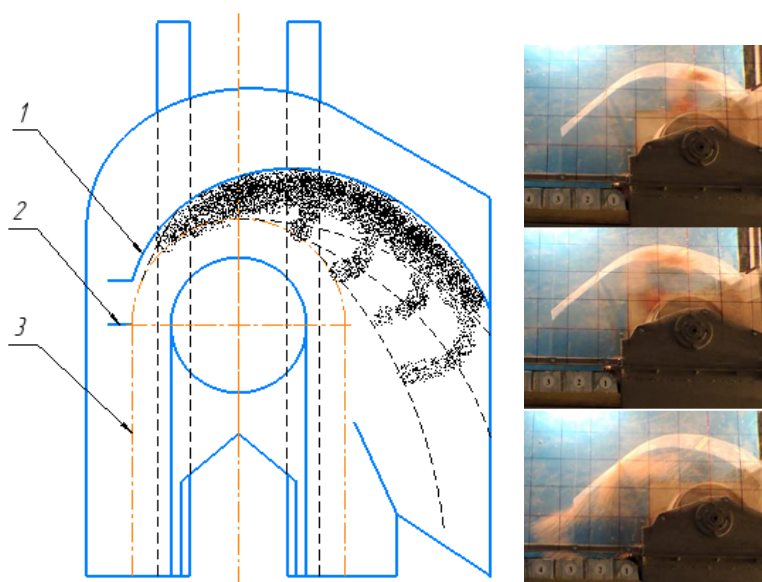


Рис. 5. Траектории движения зерна при принудительной разгрузке: 1 – железный кожух; 2 – лоток для сыпи; 3 – лента

Через специальные прозрачные стенки головки киносъемкой был зафиксирован характер траекторий выброса зерна в относительном движении и предполагаемые

траектории движения частиц в потоке зернового материала [20]. Полученные данные наглядно показывают, что относительное движение частиц не происходит вдоль стенки ковша, а под

действием центробежной силы выбрасывается вверх по криволинейной траектории, выпуклость которой направлена в сторону движения ковша. На рис. 5 четко видно, что относительная скорость выброса увеличивается от нуля до максимума при повороте ковша в пределах 0–180°. При такой траектории вектор относительной скорости будет отклоняться в сторону, противоположную направлению движения ковша, что существенно повлияет на величину и направление вектора абсолютной скорости метания [15]. К сожалению, Г.И. Креймерманом допущены ошибки в данных о количестве обратной сыпи при различных кинематических режимах и при различных типах испытываемых ковшей. Особый интерес вызывают данные о количестве сыпи в начале разгрузки (сыпь №2). Сыпь №1 измерялась в нижней части нисходящей ветви (в холостой трубе). Г.И. Креймерман подчеркивает особую положительную роль ограничительного свода головки. Однако предлагаемые им контуры головок, построенных на основе траекторий по методу П.С. Козьмина без учета относительной скорости, являются громоздкими и их параметры не соответствуют параметрам современных головок ведущих зарубежных производителей. Наиболее ценным материалом для изучения процесса движения зернового материала в ковше при выбрасывании являются результаты исследования, проведенного П.П. Артемьевым и приведенные в источнике [13]. Траектории, полученные П.П. Артемьевым с помощью скоростной киносъемки при отсутствии ограничительного свода головки, по характеру совпадают с траекториями, приведенными в работе [14], однако ценность заключается в том, что они получены для конкретных кинематических режимов.

Эlevator, работающий в режиме центробежной нагрузки, является метательной машиной. Поэтому построение параболических траекторий свободного полета зерна в головке нории в прямоугольных координатах с началом координат в точке вылета можно проводить по уравнению без учета сопротивления воздуха:

$$y = x \cdot tg\alpha_0 - \frac{g \cdot x^2}{2 \cdot v_0^2 \cdot \cos^2 \alpha_0}, \quad (5)$$

где  $x$  и  $y$  – горизонтальные и вертикальные координаты частицы,  $\alpha_0$  – угол наклона к горизонту касательной к траектории в начале полета, то есть угол вылета частицы,  $v_0$  – начальная скорость вылета (скорость метания).

**Выводы.** Были проанализированы методики отечественных и зарубежных ученых по расчету параметров движения частиц в головке элеватора-нории.

Сопоставление теоретических и экспериментальных данных показало, что выражения профессора П.С. Козьмина определения относительной скорости представляет большие трудности, поскольку требует громоздких вычислений и не могут быть применены в качестве зависимости в расчетной модели движения зерна в головке элеватора. Наиболее достоверной является методика П.П. Артемьева полученная с помощью скоростной киносъемки, хотя она не учитывает сопротивление воздуха. Данная модель позволяет построить траектории движения частицы в головке элеватора и может быть применена для расчета конструкции элеватора высокой производительности.

При выборе той или иной методики расчета параметров движения частиц в элеваторе следует учитывать влияние сопутствующего воздушного потока, а также то обстоятельство, что при движении частицы в потоке она встречает меньшее сопротивление, чем при одиночном движении тела. Окончательный выбор можно сделать при построении нескольких контрольных траекторий и оценить влияние сопротивления воздуха, и установить наиболее неблагоприятный характер траектории при ударе частицы о свода головки.

**Источник финансирования.** Гранта президента Российской Федерации № МК-4006.2021.4.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Романович А.А. Энергосбережение при производстве строительных изделий // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2011. № 3. С. 69–71.
2. Романович А.А., Воробьев Н.Д., Апухтин И.В. Определение усилия уплотнения материалов в валковом устройстве // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 7. С. 107–111.
3. Герасимов М.Д., Любимый Н.С., Рязанцев В.Г. Методика проектирования вибропогрузателей с асимметричными колебаниями // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 5. С. 135–142
4. Герасимов М.Д., Любимый Н.С. Технологические комплексы для производства дорожно-строительных материалов и работ: учебное пособие. Белгород. Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. С 25.
5. Герасимов М.Д. Способ получения направленных механических колебаний для практического применения в технологических процессах // Строительные и дорожные машины. 2014. №1. С. 35–38.
6. Шатохин И.В. Снижение травмирования зерна в нории // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2004. №2. С. 36–40.

7. Шатохин И.В. Совершенствование конструкции ковшового элеватора // Техника в сельском хозяйстве. 2004. №4. С. 38–43.
8. Тихонов А.А., Бабкин М.С. Анализ теорий движения частиц внутри ковшовых элеваторов // Синергия наук. 2020. № 54. С. 857–862.
9. Юдаев Н.В. Элеваторы, склады, зерносушилки. М.: ГИОРД. 2008. 178 с.
10. Демиденко А.И., Летопольский А.Б., Семкин Д.С. Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины. Омск: Изд-во СибАДИ. 2016. 264 с.
11. Рачков Е.В. Машины непрерывного транспорта. Алтайр: Изд-во МГАВТ. 2014. 145 с.
12. Ромакин Н.Е. Конструкция и расчет конвейеров. М.: ООО "ТНТ", 2012. 214 с.
13. Моряков О.С. Оборудование машиностроительного производства. М.: Изд-во Академия 2009. 86 с.
14. Гололобов Д.Ю., Союнов А.С., Кулаева А.Г., Кузьмин Д.Е. Анализ травмирования зерна в загрузочной части норрии // Сборник международной научно-исследовательской конференции, посвященной 70-летию создания факультета ТС в АПК (МЕХ ФАК). 2020. С. 84–87.
15. Турушин В.А. Машины промышленного транспорта непрерывного действия: учебное пособие. Луганск: Изд-во СЧУ им. В. Даля. 2009. 68 с.
16. Шатохин И.В., Щедрина Д.И., Пименов В.Б. Использование зерновых ковшовых элеваторов для транспортировки семян трав // Вестник воронежского государственного аграрного университета им. Императора Петра I. 2013. №1. С. 83–85.
17. Рогатинская О.Р. Исследование процесса транспортировки сыпучего груза наклонными винтовыми конвейерами // Вестник Тернопольского национального технического университета им. И. Пулюя. 2015. № 3. С. 137–143
18. Романеев Н.А., Варывдин В.В., Безик Д.А. Расчет напряженного состояния опоры норрии методом автоматизированного проектирования машин // Природообустройство. 2016. № 3. С. 86–91
19. Московский М.Н., Адамян Г.А., Бабенко О.С. Модернизация зерновых норрий в семяочистительных агрегатах // Естественные и технические науки. 2018. № 11 (125). С. 318–320.
20. Савиных П.А., Сычугов Ю.В., Казаков В.А. Перспективные технологии и технические средства для обработки зерна // Техника и оборудование для села. 2020. С. 22–26.

#### Информация об авторах

**Тихонов Александр Андреевич**, магистрант. E-mail: cherep2240@rambler.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, Костюкова, д. 46.

**Польшин Андрей Александрович**, инженер. E-mail: info@polshin.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, Костюкова, д. 46.

**Любимый Николай Сергеевич**, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры подъемно-транспортных и дорожных машин. E-mail: nslubim@bk.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, Костюкова, д. 46.

**Герасимов Михаил Дмитриевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры подъемно-транспортных и дорожных машин; руководитель учебно-научно-исследовательской лаборатории «Инновационные вибрационные машины и оборудование». E-mail: mail\_mihail@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, Костюкова, д. 46.

Поступила 30.03.2021 г.

© Тихонов А.А., Польшин А.А., Любимый Н.С., Герасимов М.Д., 2021

**\*Tikhonov A.A., Polshin A.A., Lyubimy N.S., Gerasimov M.D.**

*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*

*\*E-mail: cherep2240@rambler.ru*

## ANALYTICAL STUDY OF THE UNLOADING PROCESS OF ELEVATOR BUCKETS

**Abstract.** The purpose of the article is to analyze the main results of the works that are used in the calculations of elevators with moderate speed modes, to clarify the suitability of their individual positions for developing the parameters of centrifugal unloading of high-speed elevators. Works devoted to the study of the



operation of high-speed elevators, the results of which have not received a decent interpretation and development, are of considerable interest. As the efficiency of high-speed elevators is determined by the quality of centrifugal unloading and by the operation of the belt-drum mechanism without slipping, there is a need to analyze the work aimed at solving this problem. The paper presents known solutions for determining the parameters of centrifugal unloading, which are based on various hypotheses of the movement of material particles inside the bucket. The physical and mechanical phenomena that affect the movement of material particles in the elevator bucket are studied. The advantages and disadvantages of each hypothesis are revealed. The theoretical study of the process of centrifugal unloading is complicated by the fact that during the movement and exit of the material from the bucket, there is an unstable movement of the bulk material under the influence of a changing system of forces: the forces of attraction, centrifugal and coriolis forces, and the friction force. Meanwhile, even the simplest cases of material motion under a gravitational or mixed discharge regime are difficult to analyze theoretically. In this regard, the dependencies and methods of constructing the trajectories of the material movement are established, as well as the relevance of using a particular equation.

**Keywords:** centrifugal unloading, bucket elevator, trajectory, relative speed, noria, throwing angle.

## REFERENCES

1. Romanovich A.A. Energy saving in the production of construction products [Energoberezhenie pri proizvodstve stroitel'nykh izdeliy]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2011. No. 3. Pp. 69–71. (rus)
2. Romanovich A.A., Vorob'ev N.D., Apukhtin I.V. Determination of the compaction force of materials in a roll device [Opredelenie usiliya uplotneniya materialov v valkovom ustroystve]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 7. Pp. 107–111. (rus)
3. Gerasimov M.D., Lyubimiy N. S., Riazantsev V.G. Technique for designing vibrators with asymmetric vibrations [Metodika proektirovaniya vibropogruzhatel'ey s asimmetrichnymi kolebaniyami]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 5. Pp. 135–142. (rus)
4. Gerasimov M.D., Favorite N.S. Technological complexes for the production of road-building materials and works [Tekhnologicheskie komplekсы dlya proizvodstva dorozhno-stroitel'nykh materialov i rabot]. Belgorod. BSTU V.G. Shukhov. 2020. 25 p. (rus)
5. Gerasimov M.D. Method of obtaining directional mechanical vibrations for practical application in technological processes [Sposob polucheniya napravlennykh mekhanicheskikh kolebaniy dlya prakticheskogo primeneniya v tekhnologicheskikh protsessakh]. Construction and road machines. 2014. No. 1. Pp. 35–38. (rus)
6. Shatokhin I.V. Reduction of grain trauma in the bucket elevator [Snizhenie travmirovaniya zerna v norii]. Tractors and agricultural machines. 2004. No. 2. Pp. 36–40. (rus)
7. Shatokhin I. V. Improving the design of the bucket elevator [Sovershenstvovanie konstruksii kovshovogo elevatora]. Technics in agriculture. 2004. No. 4. Pp. 38–43. (rus)
8. Tihonov A.A. Babkin M.S. Particle theory analysis inside bucket elevators [Analiz teorij dvizheniya chastic vnutri kovshovykh elevatorov]. Synergy of Sciences. 2020. No. 54. Pp. 857–862. (rus)
9. Yudaev N.V. Elevators, warehouses, grain dryers [Elevatory, sklady, zernosushilki]. M. : GIOR, 2008. 178 p. (rus)
10. Demidenko A.I., Letopolsky A.B., Semkin D. S. Road, construction and lifting and transport machines [Dorozhnye, stroitel'nye i pod'emno-transportnye mashiny]. Omsk: SibADI Publishing House, 2016. 264 p. (rus)
11. Rachkov E.V. Machines of continuous transport [Mashiny nepreryvnogo transporta]. Altair: MGAVT Publishing House, 2014, 145 p. (rus)
12. Romakin N.E. Conveyor design and calculation [Konstruktsiya i raschet konveyerov]. M. : OOO "TNT", 2012. 214 p. (rus)
13. Moryakov O.S. Equipment of machine-building production [Oborudovanie mashinostroitel'nogo proizvodstva]. M.: Academy. 2009 p. (rus)
14. Gololobov D.Yu., Soyunov A.S., Kulaeva A.G. Kuzmin D.E. Analysis of grain injury in the loading part of the noria [Analiz travmirovaniya zerna v zagruzochnoy chasti norii]. Collection of the international research conference dedicated to the 70th anniversary of the creation of the Faculty of Technical Cooperation in Agriculture (MEKH FAK). 2020. Pp. 84–87. (rus)
15. Turushin V.A. Machines of industrial transport of continuous action. [Mashiny promyshlennogo transporta nepreryvnogo deystviya]. Lugansk: Publishing house of SNU V. Dahl. 2009. 68 p. (rus)
16. Shatokhin I.V., Shchedrina D.I., Pimenov V.B. The use of grain bucket elevators for transporting grass seeds [Ispol'zovanie zernovykh kovshovykh elevatorov dlya transportirovki semyan trav]. Vestnik voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta im. Emperor Peter I. 2013. No. 1. Pp. 83–85. (rus)
17. Rogatinskaya O.R. Research of the process of transportation of bulk cargo by inclined screw conveyors [Issledovanie protsessa transportirovki



syuchego gruzu naklonnymi vintovymi konveyerami]. Bulletin of the Ternopil National Technical University named after I. Pulyuya. 2015. No. 3. Pp. 137–143 (rus)

18. Romaneev N.A., Varyvdin V.V., Bezik D. A. Calculation of the stress state of the norii support by the method of computer-aided design of machines [Raschet napryazhennogo sostoyaniya opory norii metodom avtomatizirovannogo proektirovaniya mashin]. Nature management. 2016. No. 3. Pp. 86–91. (rus)

19. Moskovsky M.N., Adamyan G.A., Babenko O.S. Modernization of grain burrows in seed-cleaning aggregates [Modernizatsiya zernovykh noriy v semyaochistitel'nykh agregatakh]. Natural and Technical Sciences. 2018. No. 11 (125). Pp. 318–320. (rus)

20. Chantsev V.F. Methodology for determining the coefficients of friction between the conveyor belt and the drive drum [Metodika opredeleniya koeffitsientov treniya mezhdu transportnoy lentoy i privodnym barabanom]. Problems of theory and design of construction machines. KISS. Publishing house of Lviv University. 1964. Pp. 146–151. (rus)

#### *Information about the authors*

**Tikhonov, Aleksandr A.** Master's student. E-mail: cherep2240@rambler.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova, 46.

**Polshin, Andrey A.** Engineer. E-mail: info@polshin.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova, 46.

**Lubimyi, Nikolai S.** PhD, Senior lecturer. E-mail: nslubim@bk.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, ul. Kostyukova, 46.

**Gerasimov, Mikhail D.** PhD, Assistant professor. E-mail: mail\_mihail@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, ul. Kostyukova, 46.

---

*Received 30.03.2021*

#### **Для цитирования:**

Тихонов А.А., Польшин А.А., Любимый Н.С., Герасимов М.Д. Аналитическое исследование процесса разгрузки ковшей элеватора // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 6. С. 70–79. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-6-70-79

#### **For citation:**

Tikhonov A.A., Polshin A.A., Lyubimyi N.S., Gerasimov M.D. Analytical study of the unloading process of elevator buckets. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 6. Pp. 70–79. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-6-70-79