

УДК 629.464.4

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ СНЕЖНОЙ ЧАСТИЦЫ
В ВЕРТИКАЛЬНОМ ПИТАТЕЛЕ РОТОРНОГО СНЕГООЧИСТИТЕЛЯTHEORETICAL INVESTIGATIONS OF SNOW PARTICLES MOVEMENT
IN VERTICAL FEEDER OF ROTARY SNOW BLOWERАлешков Д.С., Корчагин П.А., Тетерина И.А.
Aleshkov D.S., Korchagin P.A., Teterina I.A.Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (Омск, Россия)
Siberian State Automobile and Highway University (Omsk, Russian Federation)

Аннотация. В работе рассматривается движение снежной частицы в вертикальном питателе роторного снегоочистителя с учетом удара. Цель исследования – определение общих закономерностей при ударе снежной частицы о неподвижную обечайку вертикального питателя, а также обоснование условия окончания удара и перехода к описанию движения снежной частицы уравнениями, не учитывающими ударных эффектов. Для достижения поставленной цели был проведен однофакторный численный эксперимент, варьируемым параметром в котором было значение коэффициента восстановления скорости при ударе. В результате получены возможные траектории движения снежной частицы, характер изменения скорости движения снежной частицы, обусловленный возникающими ударами о неподвижную поверхность, а также предложено условие, которое может быть использовано в качестве момента окончания удара и рассмотрения дальнейшего безударного движения частицы. Произведено сравнение ударного импульса и импульса нормальной реакции вертикальной стенки. Предложен алгоритм определения движения снежной частицы в условиях наличия одной неударяющей связи и учетом ее удара.

Ключевые слова: дорожная машина, роторный снегоочиститель, вертикальный питатель, снежная частица

Дата принятия к публикации: 02.11.2022
Дата публикации: 10.03.2023

Сведения об авторах:

Алешков Денис Сергеевич – кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», e-mail: denisaleshkov@mail.ru
ORCID 0000-0003-4204-7221

Корчагин Павел Александрович – доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», e-mail: korchagin_pa@mail.ru
ORCID 0000-001-8936-5679

Тетерина Ирина Алексеевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник ФГБОУ

Abstract. The paper considers the description of the movement of a snow particle in a vertical feeder of a rotary snow blower, taking into account the impact phenomenon. The main purpose of the presented studies is to determine the general patterns when a snow particle hits a fixed shell of a vertical feeder, as well as to substantiate the conditions for the end of the impact and the transition to describing the motion of a snow particle by equations that do not take into account impact effects. To achieve this goal, a one-factor numerical experiment was carried out, in which the variable parameter was the value of the velocity recovery coefficient upon impact. As a result, possible trajectories of the movement of a snow particle, the nature of the change in the speed of movement of a snow particle, due to emerging impacts on a fixed surface, are obtained, as well as a condition is proposed that can be used as a condition for the end of the impact and consideration of further impactless particle motion. A comparison is made between the shock pulse and the pulse of the normal reaction of a vertical wall. An algorithm for determining the motion of a snow particle in the presence of one non-retaining bond and taking into account its impact is proposed.

Keywords: road machine, snow blower, vertical feeder, snow particle,

Date of acceptance for publication: 02.11.2022
Date of publication: 10.03.2023

Authors' information:

Denis S. Aleshkov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
e-mail: denisaleshkov@mail.ru
ORCID 0000-0003-4204-7221

Pavel A. Korchagin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
e-mail: korchagin_pa@mail.ru
ORCID 0000-001-8936-5679

Irina A. Teterina – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at Siberian State Automobile and

ВО «Сибирский государственный автомобильно-
дорожный университет (СибАДИ)»,
e-mail: iateterina@mail.ru
ORCID: 0000-0001-8012-8511

† Highway University (SibADI),
† e-mail: iateterina@mail.ru
† ORCID: 0000-0001-8012-8511
†

1. Введение

В общем виде существующие подходы, характеризующие такой феномен как удар, представлены в [1]. В [2] также представлены теоретические обобщения современной теории удара.

В соответствии с [3], использование классической теории удара, базирующейся на законе сохранения импульса и такой характеристике как коэффициент восстановления скорости при ударе, позволяет определить общие черты ударного процесса в конкретных рассматриваемых условиях. В работе [4] рассмотрен подход к определению связи между коэффициентом восстановления скорости при ударе и плотностями и прочностной характеристикой материалов взаимодействующих тел. В [2] проведены сравнительные исследования коэффициента восстановления скорости при ударе различных материалов. В теории удара коэффициент восстановления характеризует не упругость тел, а их твердость [2].

Описание установки и методики по измерению скоростей удара твердых тел, базирующихся на положениях теоретической механики, делающей описываемую систему в процессе удара однозначно определенной, представлено в работе [5].

Уравнения удара с учетом вращения тел на основе положений теоретической механики описаны в [6, 7]. Также в работе [3] была рассмотрена задача одновременного удара n тел. В работе [8] представлена система коэффициентов восстановления для характеристики ударного взаимодействия с точки зрения классической теории удара в механической системе, на основании которой применительно к машинам ударного действия делается вывод о необходимости обеспечения одинаковых масс бойка и наковальни с реализацией их встречного движения до удара. Исследованы вопросы устойчивого движения твердого тела, сопровождающегося ударом о горизонтальную плоскость. Получены

условия устойчивости и неустойчивости [9]. В [10] показано, что в отсутствии трения условия отрыва на стационарных движениях не выполняются, при малых значениях угла между осью симметрии и вертикалью в окрестности стационарных движений контакт между телом и плоскостью не прерывается. В работе [11] отмечается, что взаимодействие достаточно крупных (по сравнению с высотой шероховатости) сферических тел после удара о шероховатую стенку при сравнительно невысоких скоростях хорошо описывается с помощью модели Рауса. Экспериментально показано, что коэффициент восстановления при ударе шара о неподвижную наклонную поверхность является функцией угла наклона.

Однако использование положений теоретической механики обладает рядом недостатков. В частности, в [12] говорится о необходимости рассмотрения конечной длительности фазы удара в связи с возможностью применения в ней конечных управляющих сил импульсного управления, что трансформирует исходную задачу с импульсными воздействиями и разрывными траекториями, с ограниченными входными воздействиями и непрерывными траекториями. Вопрос получения более точного поведения соударяемых тел и перехода к ненулевой длительности удара приводит к необходимости рассмотрения упруго-вязких и упругопластических тел. Например, в [13] рассмотрены методы, использующие подходы классической механики сплошной среды, а также модели, основанные на теории распространения упругих волн в твердом материале.

В [14] представлена нелинейная вязкоупругая модель удара тела о неподвижное препятствие Ханта-Кроссли. Определены коэффициент восстановления, потерянная при ударе кинетическая энергия и их зависимость от скорости соударения. Также в [14] отмечается, что при косом ударе тела о неподвижное препятствие (движение тела до удара и после удара произвольное) следует

использовать определение коэффициента восстановления в трактовке Пуассона.

В [15, 16] для описания упруго-пластического ударного взаимодействия твердых деформируемых тел используется модель Герца. Некоторые механизмы выбора формы и закономерности фрагментации упругих тел простой геометрии, подвергшихся ударному воздействию, рассмотрены в [17].

В [18] в рамках приближения Герца построена нелинейная математическая модель поперечного удара абсолютно жесткого твердого тела в форме шара массой M с поверхностью льда, моделируемого тонкой пластиной, плавающей на воде большой глубины. Также установлено, что разрушение льда происходит при достижении контактным напряжением предела прочности льда на сжатие.

В [19] предложен способ расчета сферической оболочки при неосесимметричном ударе массивного тела, где контактная сила взаимодействия определялась на основе упругопластической модели местного смятия для параболического ударника.

Аналитическое решение задачи удара цепочки связанных материальных точек с определением условия окончания фазы удара в вязкоупругой трактовке предложено в [20].

В [21] представлен алгоритм численного разрешения кратного удара для случая, когда РіС метод не применим.

Таким образом, существующие теории контактного взаимодействия позволяют решать разнообразные технические задачи. В зависимости от поставленных целей используются различные математические модели, описывающие удар. Очевидно, существует некоторое условие, которое определяет момент перехода от первого варианта движения ко второму. Получение данного условия позволит корректно проводить описание движения снежной частицы и тем самым повысить точность моделирования работы вертикального питателя.

В данной работе проведены дополнительные теоретические исследования, описывающие переход при движении снежной частицы конечного размера от удара о неподвижную вертикальную стенку кожуха

питателя роторного снегоочистителя к скольжению в условиях действия неудерживающих связей.

2. Основная часть

Рассмотрим движение снежной частицы конечного размера в вертикальном питателе роторного снегоочистителя в системе координат, связанной с осью вращения вертикального питателя $O_{\phi}X_{\phi}Y_{\phi}Z_{\phi}$. Возможны два варианта ее движения в вертикальном питателе (рис. 1). При этом переход от первого варианта движения ко второму и наоборот сопровождаются таким явлением как удар. Рассмотрим математические модели движения снежной частицы до удара и после. Для составления расчетных схем ее движения были приняты следующие допущения:

- частица имеет сферическую форму;
- частица скользит по горизонтальному режущему диску;
- частица движется без отрыва по поверхности горизонтального режущего диска.

Необходимо отметить, что в соответствии с [10] для рассматриваемого случая, где допущения говорят об абсолютной симметрии, в процессе скольжения частицы по горизонтальной поверхности режущего диска отрыва наблюдаться не будет [10].

Уравнения движения снежной частицы в процессе ее скольжения по горизонтальной поверхности режущего диска вертикального питателя роторного снегоочистителя имеют вид [22]:

$$\ddot{x} = -\omega^2 x - 2\omega \dot{x} + \frac{N_{\phi}}{m} f_{\phi} \sin\left(\operatorname{atan}\frac{x}{y}\right), \quad (1)$$

$$\ddot{y} = -\omega^2 y - 2\omega \dot{y} + \frac{N_{\phi}}{m} f_{\phi} \cos\left(\operatorname{atan}\frac{x}{y}\right). \quad (2)$$

$$\ddot{z} = \frac{N_{\phi}}{m} - \frac{G}{m}, \quad (3)$$

где f_{ϕ} – коэффициент внешнего трения снега по материалу горизонтального режущего диска.

В случае контакта снежной частицы с неподвижной поверхностью вертикального питателя роторного снегоочистителя, условие которого имеет вид:

$$x^2 + y^2 = R^2, \quad (4)$$

где R – радиус горизонтального режущего диска.

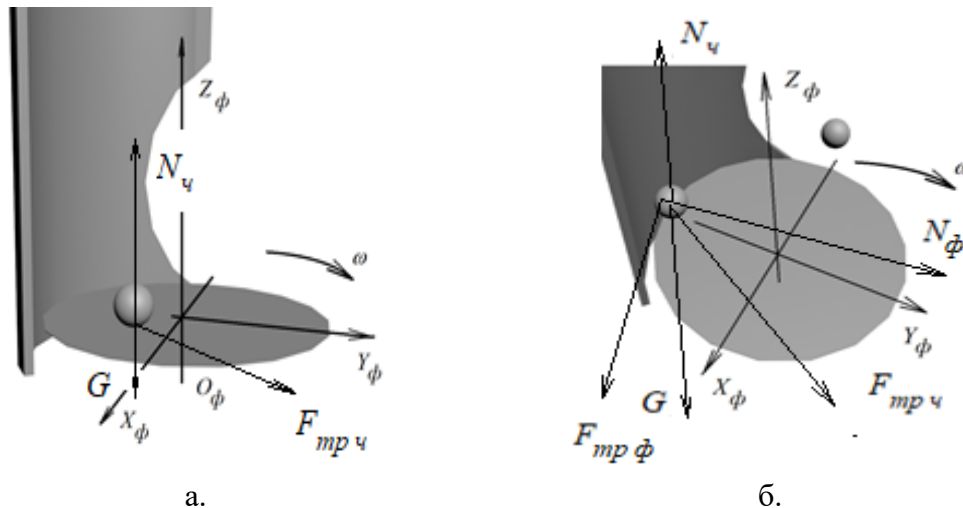


Рис. 1. Возможные варианты движения снежной частицы в вертикальном питателе роторного снегоочистителя: а - скольжение частицы по поверхности горизонтального режущего диска; б - скольжение снежной частицы вдоль неподвижной стенки вертикального питателя роторного снегоочистителя (G – сила тяжести; ω – угловая скорость вращения горизонтального режущего диска; N_q – нормальная реакция горизонтального режущего диска; N_ϕ – нормальная реакция стенки вертикального питателя; $F_{тр\phi}$ – сила трения снежной частицы о горизонтальную поверхность режущего диска; $F_{трq}$ – сила трения снежной частицы о поверхность стенки вертикального питателя роторного снегоочистителя)

Удар частицы о стенку, в начальной фазе характеризующийся мгновенным изменением значений проекций вектора скорости снежной частицы v_{x0} и v_{y0} на оси принятой системы координат, описывается коэффициентом восстановления скорости k снежной частицы при ударе и ее коэффициентом мгновенного трения p . На рис. 2 представлены расчетные схемы определения значений проекций скоростей снежной частицы v_x и v_y после удара.

В общем виде проекции вектора скорости частицы в начальной фазе удара в системе координат ont имеют вид:

В общем виде проекции вектора скорости частицы в начальной фазе удара в системе координат, ont имеют вид:

$$v_{n0} = v_{x0} \sin \alpha + v_{y0} \cos \alpha, \quad (5)$$

$$v_{t0} = v_{x0} \cos \alpha - v_{y0} \sin \alpha, \quad (6)$$

где

$$\alpha = \arctan\left(\frac{X}{Y}\right).$$

Предполагаем, что в конечной фазе удара нормальная v_n и касательная v_t составляющие

скорости снежной частицы изменяются скачкообразно по закону:

$$v_n = -k \cdot v_{n0}, \quad (7)$$

$$v_t = p \cdot v_{t0}. \quad (8)$$

В соответствии с расчетной схемой выражения новых значений проекций вектора скорости снежной частицы в системе координат $O_\phi X_\phi Y_\phi$ будут описываться уравнениями:

$$v_n^x = -v_n \cdot \sin \alpha = k \cdot v_{n0} \sin \alpha, \quad (9)$$

$$v_t^x = -v_t \cdot \cos \alpha = -p \cdot v_{t0} \cdot \cos \alpha, \quad (10)$$

$$v_n^y = -v_n \cdot \cos \alpha = k \cdot v_{n0} \cdot \cos \alpha, \quad (11)$$

$$v_t^y = v_t \cdot \sin \alpha = p \cdot v_{t0} \cdot \sin \alpha. \quad (12)$$

С учетом (5) и (6) получаем:

$$v_x = k \cdot (v_{x0} \sin \alpha + v_{y0} \cos \alpha) \sin \alpha - p \cdot (v_{x0} \cos \alpha - v_{y0} \sin \alpha) \cdot \cos \alpha, \quad (13)$$

$$v_y = k \cdot (v_{x0} \sin \alpha + v_{y0} \cos \alpha) \sin \alpha + p \cdot (v_{x0} \cos \alpha - v_{y0} \sin \alpha) \cdot \cos \alpha. \quad (14)$$

Уравнения, описывающие движение частицы в условия действия новой неудерживающей связи – неподвижной стенки вертикального питателя, согласно [21]:

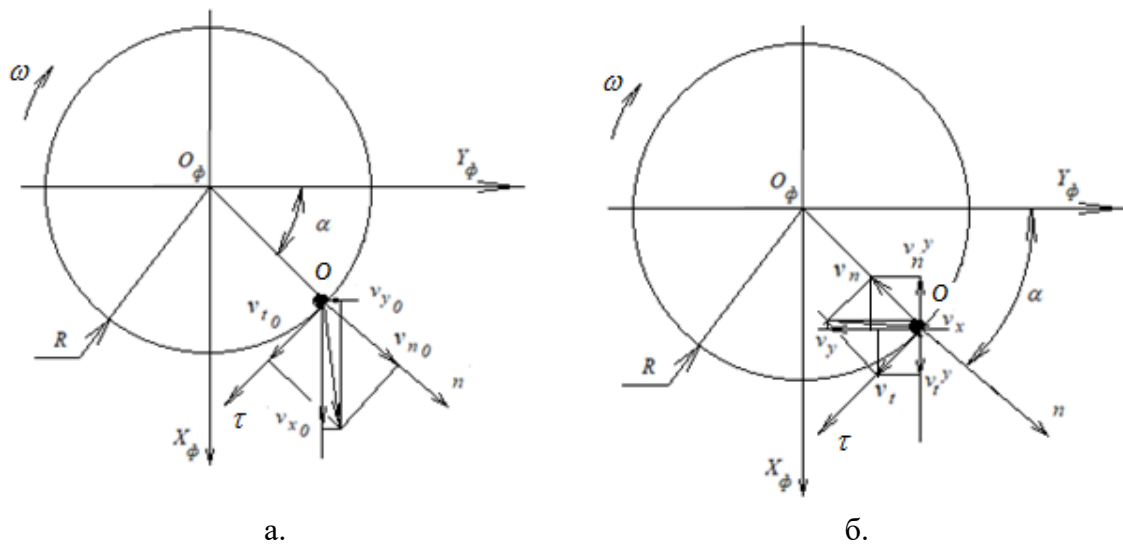


Рис. 2. Расчетные схемы определения значений проекций скоростей снежной частицы после удара о неподвижную стенку вертикального питателя (вид сверху): а - в начальной фазе удара; б - в конечной фазе удара

$$\ddot{x} = x \cdot \omega^2 - 2 \cdot \dot{x} \cdot \omega - g \left(f_u \frac{y}{R} \right) + \lambda_x \left(\frac{x}{R} + f \frac{y}{R} \right); \quad (15)$$

$$\ddot{y} = y \cdot \omega^2 - 2 \cdot \dot{y} \cdot \omega - g \left(f_u \frac{x}{R} \right) + \lambda_x \left(\frac{y}{R} + f \frac{x}{R} \right); \quad (16)$$

$$\lambda_z = -g, \quad (17)$$

где

$$\lambda_x \left(R + 2f \frac{x \cdot y}{R} \right) = -\dot{x}^2 \left(\frac{R^2}{y^2} \right) - \omega^2 R^2 + 2g \cdot f_u \cdot \frac{x \cdot y}{R}. \quad (18)$$

Исходные данные, на основании которых проводились вычисления:

- радиус горизонтального режущего диска $R = 0,3$ м;
- угловая скорость вращения рабочего органа вертикального питателя роторного снегоочистителя $\omega = 18$ рад/с;
- радиус снежной частицы $r = 0,01$ м;
- коэффициент внешнего трения снежной частицы по поверхности горизонтального режущего диска $f_u = 0,03$;
- коэффициент внешнего трения снежной частицы по неподвижной стенке вертикального питателя $f = 0,03$;

- коэффициент мгновенного трения снежной частицы при ударе $p = 0,025$;

- коэффициент восстановления скорости в точке контакта при ударе k принимал следующие значения $k = 0,5; 0,58; 0,6$.

В качестве начальных условий были приняты следующие значения:

- координаты положения снежной частицы в момент времени $t = 0$, по оси $O_\phi X_\phi$ $x = 0,19$ м, по оси $O_\phi Y_\phi$ $y = 0,19$ м;
- проекции вектора скорости снежной частицы в момент времени $t = 0$, на оси $O_\phi X_\phi$ $v_x = 0,19$ м, по оси $O_\phi Y_\phi$ $v_y = 0,19$ м;
- шаг вычислений по времени $\Delta t = 0,001$ с.

В результате решения с использованием уравнений, описывающих удар о неподвижную стенку при постоянном значении шага вычислений по времени Δt , частица постепенно проникает за неподвижную стенку вертикального питателя (рис. 3), что невозможно в реальной системе.

Одним из возможных вариантов получения таких результатов численного решения (1) - (3) является несоответствие шага вычислений Δt . В первом приближении перемещения и скорости могут быть представлены следующими соотношениями:

$$v_x = v_0 + a_x \Delta t, \quad (19)$$

$$x = x_0 + v_0 \Delta t + \frac{a_x \Delta t^2}{2}. \quad (20)$$

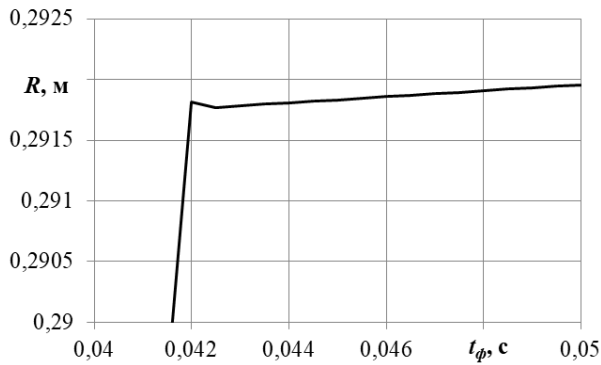


Рис. 3. Изменение радиуса положения частицы в зависимости от времени после контакта с неподвижной стенкой вертикального питателя

В момент удара значение скорости частицы скачкообразно меняет свой знак на противоположный. Соответственно, на следующей итерации вычислений значения скоростей и перемещений определяются также выражениями (19) и (20). В зависимости от значений слагаемых, значения которых получены на предыдущей итерации и шага численного интегрирования по времени Δt , определяется новое значение положения частицы. Произведем оценку влияния Δt на текущее положение частицы. Для этого рассмотрим выражение приращения по перемещению, которое из (20) имеет вид:

$$\Delta x = v_0 \Delta t + \frac{a_x \Delta t^2}{2}. \quad (21)$$

Очевидно, чтобы обеспечить непроницаемость границы для частицы после удара необходимо, чтобы $\Delta x \leq 0$:

$$v_0 \Delta t + \frac{a_x \Delta t^2}{2} \leq 0. \quad (22)$$

Из (22) выражаем шаг численного интегрирования:

$$\Delta t \left(v_0 + \frac{a_x \Delta t}{2} \right) \leq 0. \quad (23)$$

Поскольку Δt не может быть меньше нуля, соответственно:

$$\Delta t_x \leq \frac{2v_0}{a_x}. \quad (24)$$

Аналогичные выражения справедливы для проекции ускорения на ось $O_\phi Y_\phi$:

$$\Delta t_y \leq \frac{2v_0}{a_y}. \quad (25)$$

3. Результаты исследований

Рассмотрим численное решение удара, возникающее при движении снежной частицы в питателе при указанных выше исходных данных. Результаты вычислений при различных Δt представлены на рис. 4 и 5.

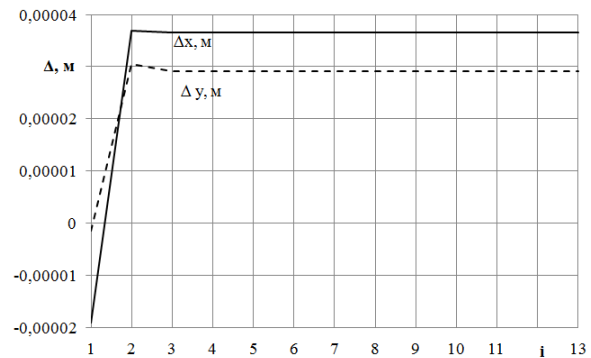


Рис. 4. Приращение по осям $O_\phi X_\phi$ и $O_\phi Y_\phi$ при ударе снежной частицы о неподвижную поверхность при $\Delta t = 0,0005$ с

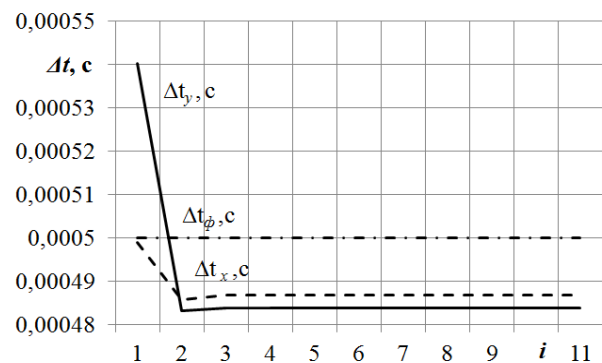


Рис. 5. Максимальное значение шага численного интегрирования по времени по условию (23)

Из рис. 5 следует, что фактическое значение шага численного интегрирования по времени превышает допустимые значения по условию (24). Это приводит к «проникновению» частицы через неподвижную обечайку вертикального питателя роторного снегоочистителя, что на практике невозможно, так как приращения перемещений как по оси $O_\phi X_\phi$, так и по оси $O_\phi Y_\phi$ являются положительными (рис. 4).

Для случая обеспечения соблюдения условия (24) при ударе снежной частицы о неподвижную стенку вертикального питателя

роторного снегоочистителя при тех же начальных условиях получаем следующие изменения в решении уравнений движения снежной частицы (1) - (3): характер изменения величины шага численного интегрирования по времени Δt представлен на рис. 6; на рис. 7 представлено изменение величины абсолютной скорости снежной частицы V_{abs} ; на рис. 8 – характер изменения приращения расстояния положения частицы от оси вращения рабочего органа вертикального питателя в полярной системе координат, связанной с осью вращения вертикального питателя, где:

$$\Delta R = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}. \quad (26)$$

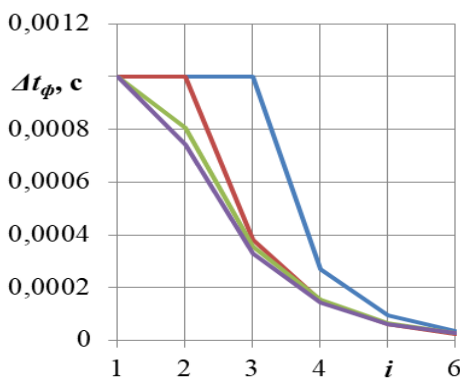


Рис. 6. Зависимость изменения величины шага численного интегрирования по времени от числа итераций, при которых соблюдается условие (4)

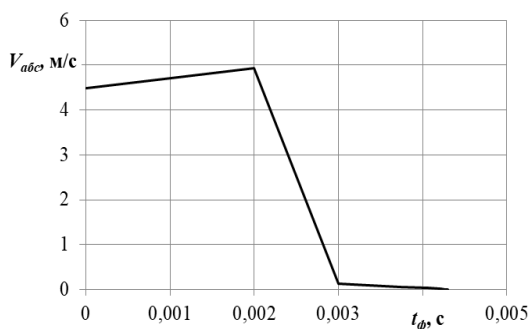


Рис. 7. Зависимость изменения абсолютной скорости снежной частицы от времени

Из рис. 8 следует, что процесс «проникновения» частицы сквозь неподвижную стенку остановлен, при этом наблюдается торможение частицы и стремление величины ее абсолютной скорости к нулю.

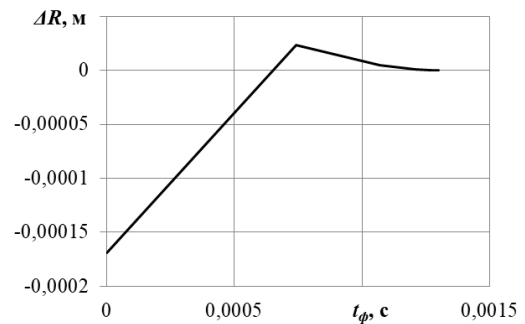


Рис. 8. Приращение расстояния между положением частицы и осью вращения рабочего органа вертикального питателя от времени

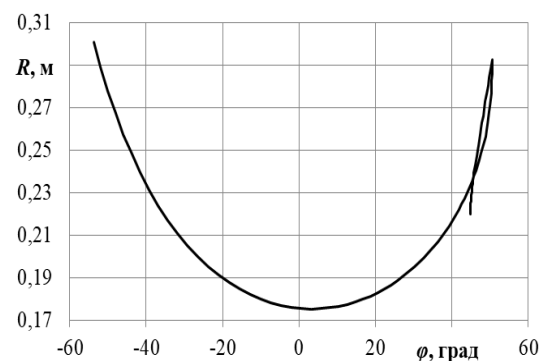


Рис. 9. Траектория движения снежной частицы при величине, $k=0,75$ в полярной системе координат

Таким образом, возникает эффект прилипания снежной частицы к неподвижной стенке вертикального питателя.

В случае изменения значения коэффициента восстановления скорости при ударе $k=0,75$ частица отскакивает от поверхности вертикального питателя и движется в обратном направлении (рис. 9).

На рис. 10 представлены траектории движения снежной частицы по поверхности горизонтального режущего диска вертикального питателя роторного снегоочистителя при значениях $k=0,75$; $0,58$ и $0,5$. На рис. 10 показан отскок снежной частицы с ее последующим прилипанием к неподвижной стенке вертикального питателя, при значениях $k=0,58$ и $0,5$.

В связи с этим возникает необходимость определения условия скольжения по второй связи (неподвижной стенки) и отсутствие явления удара, т.е. условия, когда неудерживающая связь становится удерживающей.

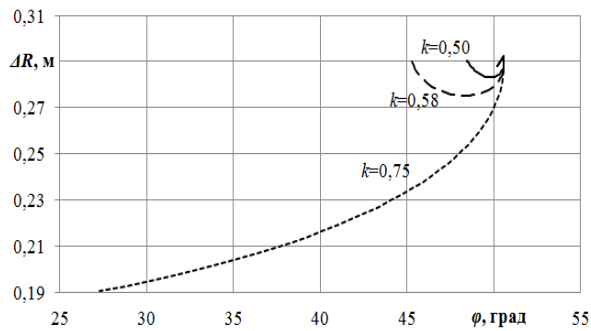


Рис. 10. Траектория движения снежной частицы при различных значениях k и $p = 0,025$ в полярной системе координат

Закон сохранения импульса S , при ударе записывается как разница скоростей снежной частицы до удара v_1 , и после v_2 :

$$\vec{v}_2 - \vec{v}_1 = \frac{\vec{S}}{m}. \quad (27)$$

Произведение действующей силы на момент времени:

$$\frac{\vec{S}}{m} = \frac{\vec{F}}{m} \cdot \Delta t. \quad (28)$$

Соответственно, единственной силой является сила нормальной реакции неподвижной обечайки вертикального питателя N_ϕ , значение которой однозначно определяется из уравнения (18).

Численное решение уравнений движения снежной частицы, носит дискретный характер с определенным шагом по времени Δt . Иначе говоря, в результате численного решения уравнений движения определяются значения перемещений, скоростей снежной частицы за интервал Δt . Что касается значений изменений скорости частицы в момент удара, то они происходят мгновенно через интервал времени. Рассмотрим, как изменяются значения силы нормальной реакции в моменты времени, когда выполняется условие контакта частицы с неподвижной обечайкой вертикального питателя и скорость изменяется скачкообразно. Результаты вычислений проекций импульсов силы нормальной реакции S_N , вертикальной режущей полосы на осях $O_\phi X_\phi$ и $O_\phi Y_\phi$, и величина импульса S , вычисленная по (28), представлены на рис. 11.

Графики имеют одну общую точку пересечения, после которой величина импульса

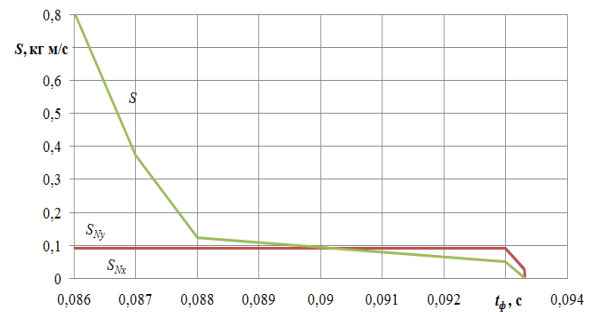


Рис. 11. Значения мгновенных изменений скорости снежной частицы в момент удара и значений силы нормальной реакции неподвижной обечайки в вертикальной фрезе в момент контакта частицы с этой поверхностью

от силы нормальной реакции неподвижной обечайки вертикальной фрезы $N_\phi \Delta t$, превышает значение ударного импульса. Таким образом, при условии постоянного значения коэффициента восстановления скорости при ударе, принимаем, что с этого момента времени движение частицы описывается уравнениями движения без учета явления удара. Это может быть записано в виде следующего условия:

$$\vec{v}_2 - \vec{v}_1 < \frac{\vec{F}}{m} \cdot \Delta t. \quad (29)$$

На рис. 12 представлена зависимость абсолютной скорости частицы, при которой величина импульса нормальной реакции стенки вертикального питателя $N_\phi \Delta t$, больше изменения скорости частицы при ударе, от коэффициента восстановления скорости при ударе.

Из графика следует, что с увеличением значения коэффициента восстановления скорости при ударе, абсолютная скорость частицы, при которой наблюдается превышение импульса $N_\phi \Delta t$, возрастает. Аппроксимирующее уравнение, описывающее данное поведение системы при заданных численных значениях основных параметров снежной частицы и вертикального питателя, имеет вид:

$$V_{\text{abc}} = 0,0527 \cdot k^{4,296}.$$

Последующее увеличение значения, k приводит к отскоку и обратному движению снежной частицы по горизонтальной поверхности режущего диска.

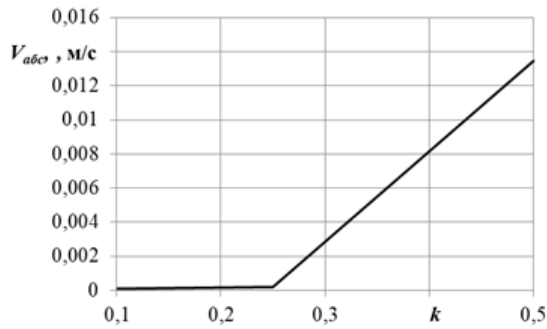


Рис. 12. Зависимость абсолютной скорости частицы, при которой величина импульса нормальной реакции стенки вертикального питателя больше изменения скорости частицы при ударе, от коэффициента восстановления скорости при ударе

Алгоритм определения движения снежной частицы в условиях наличия одной не-удерживающей связи и учетом ее удара представлен на рис. 13.

4. Выводы

В результате проведенных исследований получено значение коэффициента восстановления, при котором снежная частица продолжает движение вдоль стенки вертикального питателя. Произведено сравнение ударного импульса и импульса нормальной реакции вертикальной стенки.

Подтверждена гипотеза о наличии границы перехода от ударного взаимодействия к безотрывному скольжению снежной частицы вдоль поверхности стенки вертикального питателя роторного снегоочистителя. Получено аппроксимирующее уравнение границы перехода от одной математической модели движения снежной частицы к другой для рассматриваемых в работе значений параметров снежной частицы и вертикального питателя. Описан алгоритм перехода от уравнений удара к уравнениям движения с дополнительной связью.

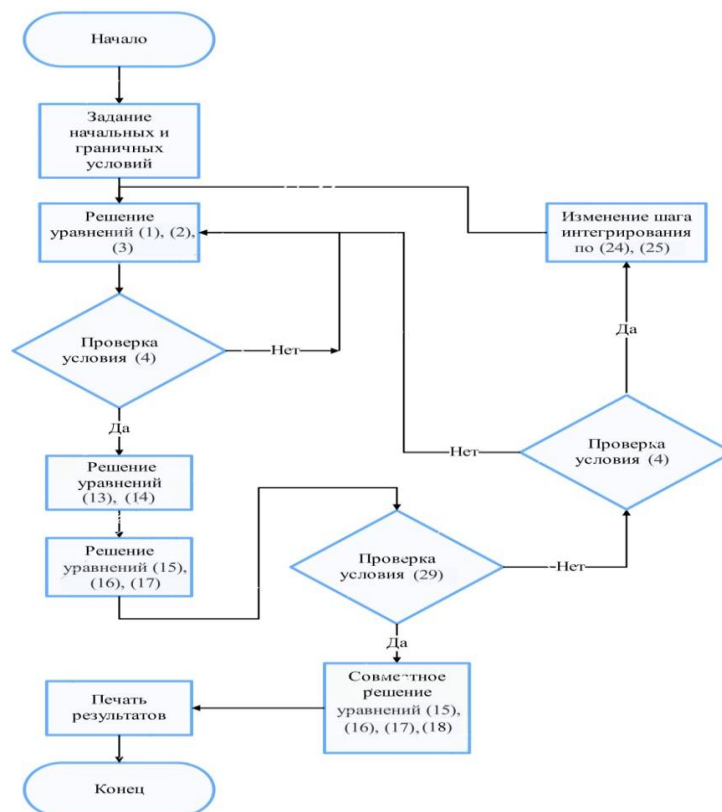


Рис. 13. Алгоритм перехода от уравнений удара к уравнениям движения с дополнительной связью

Список литературы

1. Pluta Z., Hryniewicz T. On the Quantum Theory of Impact Phenomenon for the Conditions of Elastic Deformation of Impacted Body // *International Letters of Chemistry, Physics and Astronomy*. 2013. № 12. Pp. 45-59. DOI:10.18052/www.scipress.com/ILCPA.12.4
2. Кочетков А.В., Федотов П.В. Некоторые вопросы теории удара // *Интернет-журнал Науковедение*. 2013. № 5(18). С. 108.
3. Чернявский Д.И., Чернявская Д.Д. Определение уравнения закона сохранения энергии при центральном ударе нескольких тел // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2016. № 1. С. 252-260.
4. Лашков В.А. Коэффициент восстановления скорости при прямом ударе // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия*. 2010. № 4. С. 127-136.
5. Стихановский Б.Н., Чернова Е.С. Методика измерения скоростей удара твердых тел // *Новая наука: От идеи к результату*. 2016. № 6-2(90). С. 190-192.
6. Жариков Е.У. Удар двух тел при движении в пространстве // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2006. № 1(133). С. 16-21.
7. Жариков Е.У. Динамика косоугольного удара двух твердых тел при движении в пространстве // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2005. № 2(130). С. 45-49.
8. Бурьян Ю.А., Чернявская Д.Д., Чернявский Д.И. Закон сохранения энергии при центральном ударе двух тел // *Омский научный вестник*. 2016. № 2(146). С. 5-8.
9. Маркеев А.П., Сухоручкин Д.А. Об устойчивости поступательного движения твердого тела с ударами о горизонтальную плоскость // *Доклады Академии наук*. 2016. Т. 466. № 5. С. 550. DOI: 10.7868/S0869565216050121.
10. Иванов А.П. Об условиях отрыва в задаче о движении твердого тела по шероховатой плоскости // *Нелинейная динамика*. 2008. Т. 4. № 3. С. 287-302.

References

1. Pluta Z., Hryniewicz T. On the Quantum Theory of Impact Phenomenon for the Conditions of Elastic Deformation of Impacted Body. *International Letters of Chemistry, Physics and Astronomy*, 2013, No.12, pp. 45-59. DOI:10.18052/www.scipress.com/ILCPA.12.45
2. Kochetkov A.V., Fedotov P.V. Nekotorye voprosy teorii udara. *Internet-zhurnal Naukovedenie*, 2013, No. 5(18), p. 108. (In Russian)
3. Chernjavskij D.I., Chernjavskaja D.D. Opredelenie uravnenija zakona sohraneniya jenerгии pri tsentralnom udare neskol'kikh tel. *Dinamika sistem, mehanizmov i mashin*, 2016, No.1, pp. 252-260 (In Russian)
4. Lashkov V.A. Koeffitsient vosstanovleniya skorosti pri prjamom udare. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Matematika. Mehanika. Astronomija*, 2010, No.4, pp. 127-136 (In Russian)
5. Stihanovskij B.N. Chernova E.S. Metodika izmereniya skorostej udara tverdyh tel. *Novaja nauka: Ot idei k rezu'tatu*, 2016, No. 6-2(90), pp. 190-192. (In Russian)
6. Zharikov E.U. Udar dvukh tel pri dvizhenii v prostranstve. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Tehnicheskie nauki*, 2006, No.1(133), pp. 16-21 (In Russian)
7. Zharikov E.U. Dinamika kosogo udara dvuh tverdyh tel pri dvizhenii v prostranstve. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Tehnicheskie nauki*, 2005, No.2(130), pp. 45-49 (In Russian)
8. Burjan Ju.A., Chernjavskaja D.D., Chernjavskij D.I. Zakon sohraneniya jenerгии pri central'nom udare dvuh tel. *Omskij nauchnyj vestnik*, 2016, No. 2(146), pp. 5-8. (In Russian)
9. Markeev A.P., Suhoruchkin D.A. Ob ustojchivosti postupatel'nogo dvizhenija tverdogo tela s udarami o gorizontalnuju ploskost. *Doklady Akademii nauk*, 2016, No. 5, pp. 550. DOI: 10.7868/S0869565216050121 (In Russian)
10. Ivanov A.P. Ob uslovijah otryva v zadache o dvizhenii tverdogo tela po sherohovatoj ploskosti. *Nelinejnaja dinamika*, 2008, No. 3, pp. 287-302 (In Russian)

11. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Корягин С.И., Тарасов Д.А. Упругий удар тела о наклонную поверхность // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2013. № 10. С. 36-42.
12. Галяев А.А. Об одной задаче оптимального управления в фазе удара и унификации моментов окончания взаимодействия // Автоматика и телемеханика. 2010. № 12. С. 11-24.
13. Бобков С.П., Полищук И.В. Сравнение различных подходов к определению продолжительности удара твердых тел при измельчении // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2016. № 6. С. 66-70. DOI: 10.17588/2072-2672.2016.6.066-070.
14. Алешков Д.С., Суковин М.В. Модель формирования снежных валов при работе фрезерно-роторного снегоочистителя // Вестник евразийской науки. 2018. Т. 10, № 6. 58 с.
15. Дягель Р.В., Лапшин В.В. О нелинейной вязкоупругой модели удара Ханта Кроссли // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2011. № 5. С. 164-173.
16. Bobillier G., Bergfeld B., Capelli A., Dual J., Gaume J., Herwijnen A., Schweizer J. Micromechanical modeling of snow failure // *Cryosphere*. 2020. №14. Pp. 39-49. DOI: 10.5194/tc-14-39-2020
17. Твердохлебов В.А. Определение рационального состава транспортно-технологического комплекса, задействованного в снегоуборочных работах // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2016. № 6. С. 120–124.
18. Козлов Д.В. Математическая модель поперечного удара твердого шарообразного тела с поверхностью ледяного покрова // Полярная механика. 2016. № 3. С. 115-122.
19. Бирюков Д.Г., Кадомцев И.Г. Упругопластический неосесимметричный удар параболического тела по сферической оболочке // Прикладная механика и техническая физика. 2005. Т. 46. № 1(269). С. 181-186.
20. Галяев А.А. О математической модели одномерного удара цепочки тел, обла-
11. Velikanov N.L., Naumov V.A., Korjagin S.I., Tarasov D.A. Uprugij udar tela o naklonnuju poverhnost. *Vestnik Baltijskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta*, 2013, No. 10. pp. 36-42 (In Russian)
12. Galjaev A.A. Ob odnoj zadache optimal'nogo upravlenija v faze udara i unifikacii momentov okonchanija vzaimodejstvija. *Avtomatika i telemehanika*, 2010, No. 12, pp. 11-24 (In Russian)
13. Bobkov S.P., Polishhuk I.V. Sravnenie razlichnyh podhodo v k opredeleniju prodolzhitel'nosti udara tverdyh tel pri izmelchenii. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2016, No.6, pp. 66-70. DOI: 10.17588/2072-2672.2016.6.066-070 (In Russian)
14. Aleshkov D.S., Sukovin M.V. Model formirovanija snezhnyh valov pri rabote frezerno-rotornogo snegoochistitelja. *Vestnik evrazijskoj nauki*, 2018, No.6, pp. 58 (In Russian)
15. Djagel R.V., Lapshin V.V. O nelinejnoj vjzskouprugoj modeli udara Hanta Krossli. *Izvestija Rossijskoj akademii nauk. Mehanika tverdogo tela*, 2011, No. 5, pp. 164-173 (In Russian)
16. Bobillier G., Bergfeld B., Capelli A., Dual J., Gaume J., Herwijnen A., Schweizer J. Micromechanical modeling of snow failure. *Cryosphere*, 2020, No.14, pp. 39-49. DOI: 10.5194/tc-14-39-2020
17. Tverdohlebo v V.A. Opredelenie racionalnogo sostava transportno-tehnologicheskogo kompleksa, zadejstvovannogo v snegouborochnyh rabotah. *Intellekt. Innovacii. Investitsii*, 2016, No.6, pp. 120–124 (In Russian)
18. Kozlov D.V. Matematicheskaja model poperechnogo udara tverdogo sharoobraznogo tela s poverhnost'ju ledjanogo pokrova. *Poljarnaja mehanika*, 2016, No.3, pp. 115-122. (In Russian)
19. Birjukov D.G., Kadomcev I.G. Uprugoplasticheskij neosesimmetrichnyj udar parabolicheskogo tela po sfericheskoj obolochke. *Prikladnaja mehanika i tehničeskaja fizika*, 2005, No. 1(269), pp. 181-186 (In Russian)

дающей вязкоупругими свойствами // Автоматика и телемеханика. 2015. № 10. С. 40-49.

21. Аптуков В.Н., Ландик Л.В., Романов П.А., Фонарев А.В. Численное моделирование процесса разрушения хрупких тел при ударе // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2012. № 2(10). С.15-19.

‡ 20. Galjaev A.A. O matematicheskoj modeli odnomernogo udara cepochki tel, obladajushhej vjazkouprugimi svojstvami. *Avtomatika i telemehnika*, 2015, No.10, pp. 40-49. (In Russian)

‡ 21. Aptukov V.N., Landik L.V., Romanov P.A., Fonarev A.V. Chislennoe modelirovanie processa razrushenija hrupkih tel pri udare. *Vestnik Permskogo universiteta. Matematika. Mehanika. Informatika*, 2012, No. 2(10), pp. 15-19 (In Russian)