

УДК (UDC) 625.768

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ДВИЖЕНИЯ
НОЖА ВИБРОСКАЛЫВАТЕЛЯ УПЛОТНЕННОГО СНЕГАINVESTIGATION OF TRANSIENT PROCESSES OF BLADE MOVEMENT OF
COMPACTED SNOW VIBROCLEAVERВоскресенский Г.Г., Клигунов Е.С., Сверкунова А.А.
Voskresenskiy G.G., Kligunov E.S., Sverkunova A.A.Тихоокеанский государственный университет (Хабаровск, Россия)
Pacific national university (Khabarovsk, Russian Federation)

Аннотация. В статье рассмотрен процесс обратного движения ножа виброскалывателя уплотненного снега при удалении уплотненного снега с поверхности автомобильных дорог, внутри дворовых территорий, автобусных остановок, парковок автомобилей. Особенностью процесса разрушения уплотненного снега в режиме виброрезания является прерывистый контакт ножа с разрушаемой средой. Условием установившегося режима виброрезания является критерий выхода ножа виброскалывателя из контакта с разрушаемой средой. Целью исследования является установление времени, при котором прерывается контакт ножа с уплотненным снегом. Полученные результаты расчетов дают возможность установить значения, при которых возможен режим виброрезания и выбрать параметры гидроаккумулятора, обеспечивающего перемещение ножа виброскалывателя уплотненного снега. В результате численных расчетов установлено влияние диаметра гидротолкателя на изменение давления в гидроневмоаккумуляторе, рабочего объема и объема газовой камеры на основе исследования динамических процессов идеального газа в оболочке гидроневмоаккумулятора.

Ключевые слова: уплотненный снег, виброрезание, виброскалыватель, гидропривод, переходный процесс.

Дата принятия к публикации: 17.02.2021
Дата публикации: 25.03.2021

Сведения об авторах:

Воскресенский Геннадий Гаврилович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Транспортно-технологические системы в строительстве и горном деле», ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет»,
e-mail: 004179@pnu.edu.ru.

ORCID: 0000-0002-7951-6987

Клигунов Евгений Сергеевич – старший преподаватель кафедры «Транспортно-технологические системы в строительстве и горном деле», ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», e-mail: 005196@pnu.edu.ru.

ORCID: 0000-0002-1874-7829

Abstract. The lack of the necessary amount of equipment for winter maintenance, significant precipitation in the form of snow, lead to a decrease in the efficiency of roads. Inside, courtyards and sidewalks are also covered with a layer of compacted snow due to untimely snow removal. Mechanic method of breaking compacted snow is currently insufficiently studied and so far there is no effective equipment to combat snow and ice formations. A peculiarity of the process of compacted snow destruction in the mode of vibration cutting is intermittent contact of the knife with the destroyed medium. Condition of the set mode of vibrocutting is the criterion of an exit of a blade of a vibroclevener from contact with the destroyed environment. The aim of the study is to establish the time at which the knife comes into contact with compacted snow. The obtained results of the calculations make it possible to set the values at which the mode of "vibration cutting" is set and to select parameters of the hydraulic accumulator, which ensures the movement of the blade of the vibroclevener of the compacted snow.

Keywords: compacted snow, vibration cutting, vibroclevener, hydraulic drive, transient process.

Date of acceptance for publication: 17.02.2021
Date of publication: 25.03.2021

Authors' information:

Gennadiy G. Voskresenskiy – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Department "Transport and technological machines in construction and mining" at Pacific National University,
e-mail: 004179@pnu.edu.ru.

ORCID: 0000-0002-7951-6987

Evgeniy S. Kligunov – senior lecturer of Department of "Transport and technological machines in construction and mining" at Pacific National University,
e-mail: 005196@pnu.edu.ru.

ORCID: 0000-0002-1874-7829

Сверкунова Анастасия Александровна – старший преподаватель кафедры «Иностранные языки», ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», e-mail: 000664@pnu.edu.ru.

Anastasia A. Sverkunova – senior lecturer of Department “Foreign languages” at Pacific National University, e-mail: 000664@pnu.edu.ru.

1. Введение

Транспортная система Российской Федерации включает сеть автомобильных и железных дорог, речного и морского транспорта. Автомобильным транспортом перевозится более 55% грузов и 60% пассажиров. Развитие протяженности дорог и инфраструктуры определено программными документами, по которым планируется увеличение протяженности автомобильных дорог к 2030 году в 1,5 раза с 1,508 млн. км до 2,25 млн. км [1].

Эффективность эксплуатации дорог зависит от качества их летнего и зимнего содержания. Летнее содержание в настоящее время обеспечено разнообразной и эффективной техникой [2].

Технологии зимнего содержания автомобильных дорог предусматривают очистку дорог от снега, предотвращают зимнюю скользкость и обеспечивают коэффициент сцепления шин автомобилей с поверхностью движения.

Эти мероприятия приобретают особое значение для городских автомобильных дорог, для которых незначительное нарушение требований приводят к существенным экономическим потерям. Следует отметить, что в настоящее время отсутствует высокопроизводительная техника для скалывания уплотненного снега и снежно-ледяных образований с дорожных покрытий.

Работы по очистке дорог от снега в городских условиях должны производиться в кратчайшие сроки (5...6 ч после выпадения осадков), так под воздействием шин автомобилей, передвижения пешеходов, колебаний температуры и влажности снега, его метаморфизма, происходит увеличение сил резания, контактной прочности. Буксование шин ведет к появлению температуры в зоне контакта и появлению обледенения поверхности. Важное значение приобретает процесс разрушения наледей на горных дорогах предприятий горнодобывающей отрасли.

Использование современных химических реагентов ограничено температурным режимом до -10°C , -12°C и оказывает отрицательное воздействие на экологию, обувь пешеходов, ведет к простудным заболеваниям и разрушению металлоконструкций автомобилей и мостовых сооружений.

Существующая техника для уборки уплотненного снега на дорожных покрытиях реализует статическое резание с использованием ножей бульдозеров, автогрейдеров, зубьев ковшей экскаватора, при этом должны быть обеспечены значительные удельные давления ножа в зоне контакта со средой и движущие силы резания

Влияние вибраций на снижение сил резания в 3...5 раз по сравнению со статическим резанием было установлено в 1934 году Г.И. Покровским и его сотрудниками и продолжено в работах Е.Г. Коновалова, А.В. Борисенко, В.Н. Баранова, Ю.Е. Захарова, Д. Кумабе [3, 4].

2. Материалы и методы

Новое оборудование, созданное по принципу «вибрационное резание» разработано и испытано в Тихоокеанском государственном университете в результате длительных теоретических и опытно-конструкторских исследований [5, 6].

В результате теоретических исследований установлено, что эффективность гидросистемы для осуществления высокочастотных колебаний определяется мощностью гидропривода, средним значения давления за цикл колебаний, быстродействием, частотой и амплитудой колебаний ножа. Использование гидроаккумуляторов дает возможность накапливать потенциальную энергию в период обратного движения ножа. Таким образом, достигается экономичность гидросистемы.

Новое рабочее оборудование является навесным на мобильной базовой машине независимо от ее массы и размеров и включает гидросистему для управления рабочим обо-

рудованием и гидравлическую систему (рис.1), обеспечивающую формирование пе-

риодических колебаний ножа виброскальывателя уплотненного снега и льда.

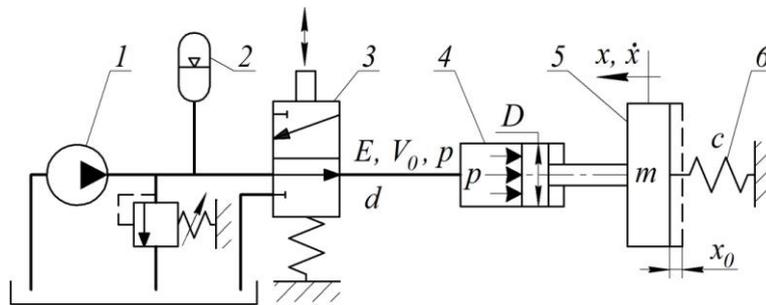


Рис. 1. Гидравлическая схема виброскальывателя уплотненного снега:

1 – гидронасос; 2 – гидропневмоаккумулятор; 3 – гидрораспределитель; 4 - гидротолкатель; 5 – приведенная масса ножа и упругой подвески 6; 7 – клапан предохранительный

Переходный процесс рабочего движения ножа виброскальывателя происходит при открытом положении гидрораспределителя 3 и рабочая жидкость от гидронасоса 1 и гидропневмоаккумулятора 2 поступает к двум гидротолкателям 4, воздействующими с упругой подвеской 6 и ножом. При достижении времени $T/2$ (полупериода колебаний) происходит закрытие окон гидрораспределителя 3, рабочая жидкость заряжает гидропневмоаккумулятор, а нож начинает обратное движение под действием сил упругости сжатой упругой подвески.

Рациональные параметры гармонических колебаний следует выбирать из условия расчета времени, при котором нож успевает возвратиться в первоначальное положение.

П.А. Семенцовым в соавторстве разработана математическая модель процесса возвратного движения ножа виброскальывателя [7].

Координата режущей кромки ножа составит

$$x_{\Sigma} = x_0 - x + V_m \cdot t, \quad (1)$$

где x_0 - начальная координата положения ножа; x - текущая координата возвратного движения ножа; V_m - поступательная скорость движения базовой машины.

Процесс возвратного движения ножа представим в виде:

$$m \cdot \ddot{x} + k \cdot \dot{x} + c \cdot x = c \cdot x_0 - P \cdot F, \quad (2)$$

где m - приведенная масса штока и ножа виброскальывателя; k - коэффициент вязкого трения; c - жесткость пружины; F - площадь

поршня; x_0 - начальное положение штока; P - давление в полости гидротолкателя.

Давление перед гидротолкателем с первоначального p_0 резко снижается, а затем по мере возвращения ножа в исходное положение возрастает за счет преодоления сопротивлений движению рабочей жидкости [8, 9]:

$$p = p_0 \cdot e^{-\alpha t} + \left(\lambda \cdot \frac{l}{d} + \xi \right) \cdot \left(\frac{2 \cdot F_T}{f_{mp}} \right)^2 \cdot \rho_{жс} \cdot \dot{x}^2, \quad (3)$$

где α - коэффициент, учитывающий интенсивность падения первоначального давления ($\alpha = 400$ 1/с); λ - коэффициент сопротивления движению рабочей жидкости; l , d - длина и диаметр трубопроводов; ξ - коэффициент местного сопротивления ($\xi = 10$); F_T - площадь гидротолкателя; D - диаметр гидротолкателя; f_{mp} - площадь трубопроводов; $\rho_{жс}$ - плотность рабочей жидкости.

Коэффициент сопротивления движению рабочей жидкости рассчитан по условию [8, 9]

$$\lambda = \frac{75}{Re},$$

где $Re = v_{pжс} d / \nu$ - число Рейнольдса; $v_{pжс} = F_T \dot{x}_1 / f_{mp}$ - средняя скорость движения рабочей жидкости; ν - вязкость рабочей жидкости при температуре $+20^{\circ}\text{C}$.

3. Обсуждение результатов

Решение уравнений (2) и (3) выполнено в программе MATLAB с принятыми значениями $m = 0,003 \text{ кг}\cdot\text{с}^2/\text{см}$; $k = 0,2 \text{ кг}\cdot\text{с}/\text{см}$; $F_T = 1,13 \text{ см}^2$; $f_{mp} = 0,5 \text{ см}^2$; $V_m = 100 \text{ см}/\text{с}$; $c = 91,8 \text{ кг}/\text{см}$; $x_0 = 0,6 \text{ см} \dots 1,6 \text{ см}$.

В результате численного решения получены графики переходных процессов движения ножа виброскальвателя. Установлено, что в момент открытия окон гидрораспределителя на слив нож достигает значения x_0 , а давление резко снижается со значения p_0 (рис. 2) до значений, определяемых потерями давления на местные сопротивления и по длине трубопроводов.

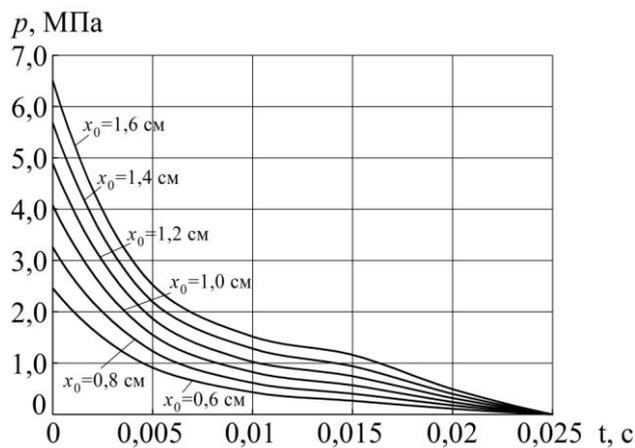


Рис. 2. Переходные процессы изменения давления в трубопроводе

Под действием упругой силы нож начинает возвратное движение (рис. 3). Скорость возвратного движения зависит от величины x_0 и p_0 . В то же время нож виброскальвателя продолжает движение вместе с базовой машиной со скоростью V_m .

Скорость возвратного движения ножа зависит от x_0 и p_0 (рис. 4).

Условием установившегося режима виброрезания является критерий выхода ножа виброскальвателя из контакта с разрушаемой средой

$$V_\Sigma = V_0 - \dot{x} < 0 \quad (4)$$

Установлено, что при скорости базовой машины $V_m = 1,0 \text{ м}/\text{с}$ (100 см/с) только при

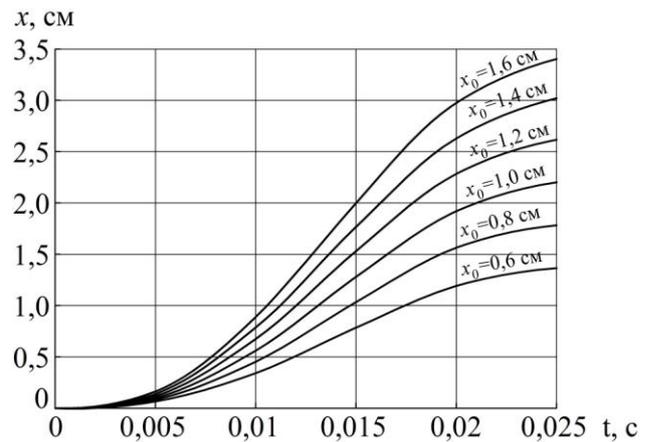


Рис. 3. Переходные процессы возвратного движения ножа виброскальвателя

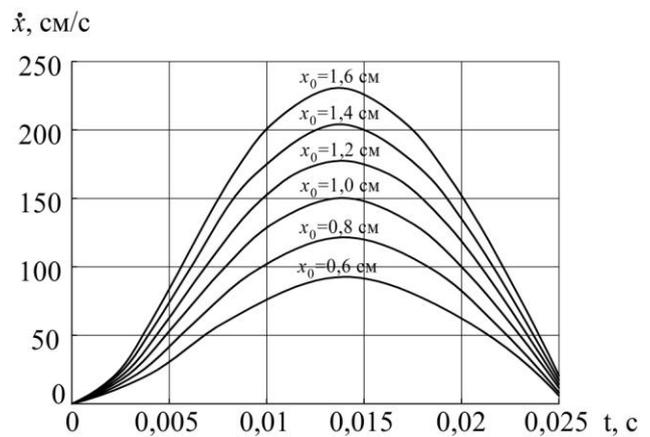
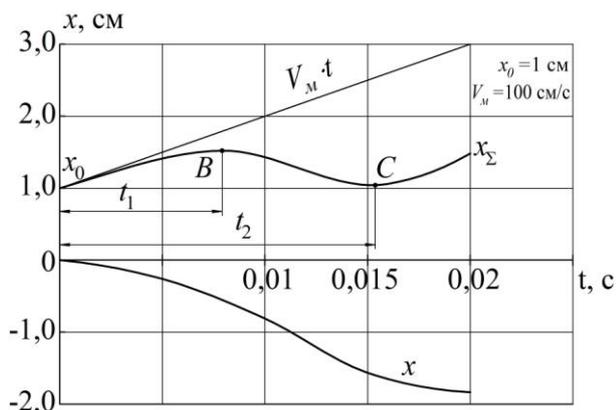


Рис. 4. Переходные процессы скорости возвратного движения ножа виброскальвателя

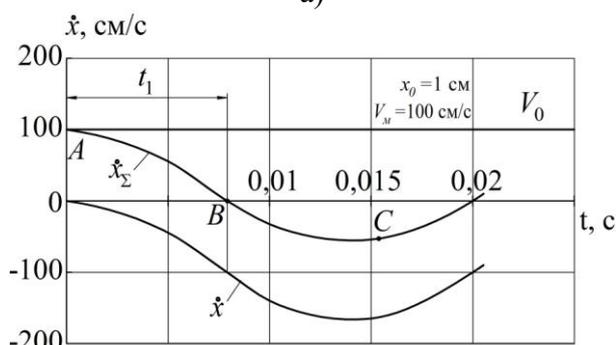
$x_0 > 0,8 \text{ см}$ скорость возвратного движения может обеспечить выход ножа из контакта с разрушаемой средой.

Выбор рациональных параметров гидросистемы и гидроаппаратуры определяется временными характеристиками процесса виброрезания. Критерием эффективности режима разрушения уплотненного снега является условие выхода ножа инструмента из зоны резания, т.е. когда скорость движения ножа виброскальвателя близка к нулю (рис. 5).

Из графиков (рис. 5, а) следует, что в момент достижения координаты ножа x_0 , нож вместе с базовой машиной движется вперед со скоростью V_m , в то же время нож начинает двигаться в противоположную сторону со скоростью \dot{x} . В точке В координата ножа достигает наибольшего значения за время t_1 ,



а)



б)

Рис. 5. Движение ножа виброскальвателя:
 а - перемещение; б) - скорость

а затем происходит снижение значения x до точки С за время t_2 , а затем скорость движения ножа вперед начинает возрастать.

В ходе расчетов установлено, что время t_1 не зависит от величины x_0 и определяется значениями скорости базовой машины. Время t_2 также зависит от скорости движения базовой машины V_m . Начальная координата x_0 определяет скорость обратного движения ножа (рис. 6). С увеличением x_0 пропорционально возрастает и максимальная скорость обратного движения ножа. Выход ножа из зоны резания определяется значением Δx

$$\Delta x = x_B - x_C. \quad (5)$$

Период колебаний T может быть установлен как двойная сумма времени t_2 .

Критерием эффективности процесса виброрезания является безразмерный показатель

$$\tau < \frac{V_m \cdot 10^2}{a \cdot \omega} (0,5 \dots 0,6), \quad (6)$$

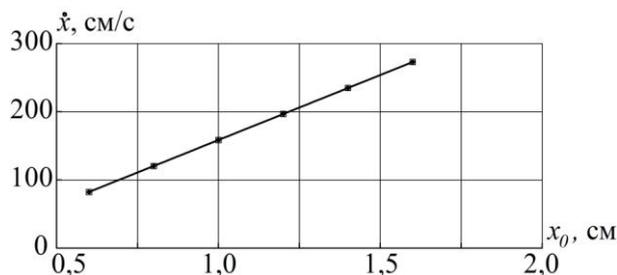


Рис. 6. Влияние начального положения ножа x_0 на максимальную скорость обратного движения ножа

где a - амплитуда колебаний, см; ω - частота колебаний, 1/с; V_m - скорость движения базовой машины, м/с.

Амплитуда колебаний может быть установлена

$$a > \frac{x_B + x_0}{2}, \quad (7)$$

а частота колебаний

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T}. \quad (8)$$

Рабочий объем гидроаккумулятора составит [8]

$$V_a = Q_n \cdot t_2 + \frac{V_0}{E} p, \quad (9)$$

где V_0 - объем нагнетательной магистрали; E - модуль упругости гидросистемы и гидроаккумулятора; Q_n - производительность гидронасоса.

С целью исключения прерывистого движения и обеспечения гармонических колебаний в т. С гидрораспределитель 3 должен переключаться в положение «рабочее движение ножа» и обеспечивать ускоренное движение ножа в зону резания.

Мощность гидропривода определяется рабочими нагрузками на ноже виброскальвателя и скоростью рабочего движения ножа, которая должна быть не менее скорости обратного движения

$$N_r = R \cdot \dot{x} \cdot 10^{-3}, \quad (10)$$

где R - нагрузка на ноже, Н; \dot{x} - скорость движения ножа, м/с.

В настоящее время отсутствуют результаты исследований о влиянии амплитуды

или частоты колебаний на эффективность разрушения уплотненного снега.

Применение гидроаккумулятора дает возможность создать экономичную гидросистему.

Основные параметры гидропневмоаккумулятора можно определить, рассмотрев уравнение состояния азота в гидропневмоаккумуляторе.

Уравнение состояния идеального газа имеет вид [10]

$$P_0 V_0 = RT, \quad (11)$$

где P_0 , V_0 , T - давление, объем и абсолютная температура газа соответственно; R - универсальная газовая постоянная.

При допущении, что процессы в гидроаккумуляторе скоротечны, температура неизменна, тогда уравнение (11) выражает изотермический процесс: $P_0 V_0 = const$.

Особенность работы гидроимпульсной системы состоит в том, что в период обратного движения ножа за время t_2 заряжает гидроаккумулятор, а рабочий ход обеспечивается подачей гидронасоса и объемом разряжаемого гидроаккумулятора. Давление начала зарядки гидроаккумулятора P_0 определяется усилиями на деформацию упругой подвески ножа и импульсного усилия резания снега

$$P_0 = \frac{cx_0 + P_p(t)}{2F_T}, \quad (12)$$

где $P_p(t)$ - импульсная сила резания снега, изменяющаяся от нуля до максимальных значений в период времени $T/2 = T_2$.

Процесс зарядки гидроаккумулятора можно представить как

$$P_0 V_0 = (P_0 + \Delta p)(V_0 + \Delta V), \quad (13)$$

где Δp и ΔV - приращение давления и объема в гидроаккумуляторе.

После преобразования уравнения (13) получим зависимость рабочего объема

$$\Delta V = \frac{\Delta p}{(P_0 + \Delta p)} V_0, \quad (14)$$

где V_0 - начальный объем гидроаккумулятора.

Уравнение расходов в рабочем режиме учитывает объем рабочей жидкости, поступающей от гидронасоса и гидроаккумулятора:

$$\Delta V + Q_n \cdot t_2 = x_0 \cdot 2F_T + \frac{V_1}{E}(P_0 + \Delta p), \quad (15)$$

где V_1 - объем рабочей жидкости в магистрали от насоса до гидротолкателей.

Представим, что $P_0 + \Delta p = p_n$ и найдем рабочий объем гидропневмоаккумулятора:

$$\Delta V = x_0 \cdot 2F_T + \frac{V_1}{E} p_n - Q_n \cdot t_2. \quad (16)$$

В гидросистеме принят шестеренный гидронасос НШ-10. Рабочий объем ΔV рассчитаем для значений $x_0 = 1,6$ см, $V_1 = 100$ см³, $E = 5000$ кг/см², $p_n = 160$ кг/см², $Q_n = 125$ см³/с, $t_2 = 0,02$ с.

Площадь гидротолкателей учтена для диаметра гидротолкателей $d = 1,2$ см; $d = 1,4$ см; $d = 1,6$ см; $d = 1,8$ см. С увеличением диаметра гидротолкателя d возрастает и рабочий объем ΔV гидропневмоаккумулятора (рис. 7).

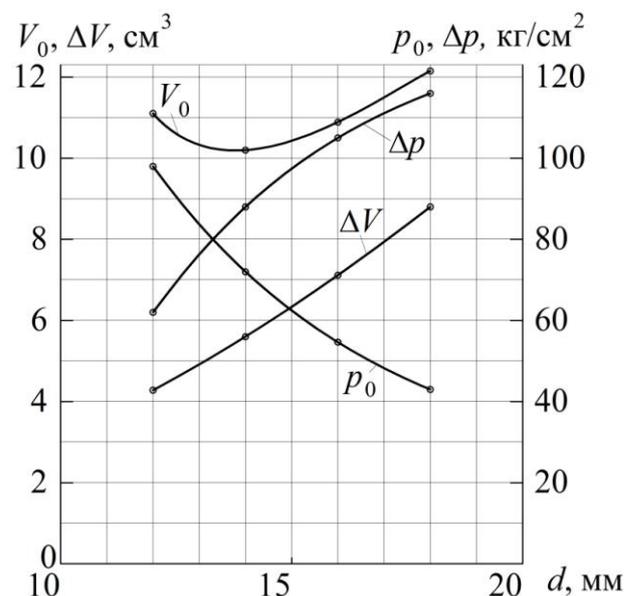


Рис. 7. Влияние диаметра гидротолкателя на рабочий объем гидропневмоаккумулятора и давления P_0 и Δp

Начальное давление P_0 определим для тех же численных значений гидросистемы и коэффициента упругости $c = 91,9$ кг/см под-

вески ножа и максимальных значений силы резания уплотненного снега $P_p(t)=750$ Н.

Из уравнения (14) найдем значение V_0 :

$$V_0 = \frac{P_n \cdot \Delta V}{\Delta p}. \quad (17)$$

Минимальное значение V_0 соответствуют $d = 14$ мм.

Рассчитанные значения ΔV , V_0 , Δp позволяют спроектировать гидропневмоаккумулятор с рациональными параметрами.

4. Заключение

Полученные результаты расчетов дают возможность установить значения, при которых возможен режим виброрезания и выбрать параметры гидроаккумулятора, обеспечивающего перемещение ножа виброскальвателя уплотненного снега до значений $x_0 > 0,8$ см. Уравнения состояния идеального газа (азота) могут применяться для расчета параметров гидроаккумулятора, работающего в режиме высокочастотных колебаний рабочего инструмента.

Установлено, что критерий эффективности τ определяется скоростью базовой ма-

шины V_m , амплитудой a и частотой колебаний $\omega = 2 \cdot \pi / T$. Увеличение скорости движения базовой машины приводит к росту производительности.

Разработанное оборудование обладает минимальными габаритами и мощностью двигателя внутреннего сгорания и предназначено для механизации ручного труда дворников. По расчетам производительность труда дворника возрастает в 25 раз, а себестоимость работ сокращается в 6 раз.

В дальнейших исследованиях предполагается изготовление виброскальвателя и доводка параметров нового оборудования для очистки тротуаров от снежно-ледяных образований по механизированной технологии. С учетом работы виброскальвателя в условиях низких температур одной из задач является исследование переходных процессов движения ножа при различных температурах окружающего воздуха, а также разработка методики и экспериментальная оценка качества очистки поверхности для различных скоростей движения виброскальвателя, амплитуды и частоты колебаний ножа.

Список литературы

1. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL:<https://mintrans.gov.ru/documents/3/1009>.
2. Коммунальные машины. Конструкция. Расчет. Потребительские свойства: учеб. пособие / Под общ. ред. В.И. Баловнева, С.Н. Иванченко. Хабаровск: Изд-во Тихоокеанского государственного университета, 2019. 384 с.
3. Кумабэ Д. Вибрационное резание. М.: Машиностроение, 1985. 424 с.
4. Баранов В.Н., Захаров Ю.Е. Электрогидравлические и гидравлические вибрационные механизмы. М.: Машиностроение, 1966. 243 с.
5. Воскресенский Г.Г. Основы механики разрушения уплотненного снега на автомобильных дорогах. Хабаровск: Изд-во Тихо-

References

1. *Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda* [Transport strategy of the Russian Federation until 2030] Available at: <https://mintrans.gov.ru/documents/3/1009/> (In Russian)
3. *Kommunalnye mashiny. Konstruktsiya. Raschet. Potrebitelskie svoystva* [Utility vehicles. Construction. Calculation. Consumer Properties]. Khabarovsk, Pacific national university, 2019. 384 p. (In Russian)
3. Kumabe D. *Vibratsionnoe rezanie* [Vibration cutting]. Moscow, Mashinostroenie, 1985. 424 p. (In Russian)
4. Baranov V.N., Zakharov Yu.E. *Elektrogidravlicheskie i gidravlicheskie vibratsionnye mekhanizmy* [Electrohydraulic and hydraulic vibration mechanisms]. Moscow, Mashinostroenie, 1966. 243 p. (In Russian)

океанского государственного университета, 2008. 250 с.

6. Воскресенский Г.Г., Клигунов Е.С. Исследование процесса движения малогабаритного виброскалывателя уплотненного снега // Вестник ТОГУ. 2017. №447). С. 67-72.

7. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике для инженеров и студентов вуза. М.: Наука, 1968. 939 с.

8. Башта Т.М. Машиностроительная гидравлика. М.: Машиностроение, 1971. 672 с.

9. Чупраков Ю.И. Гидропривод и средства гидроавтоматики. М.: Машиностроение, 1979. 232 с.

10. Семенцов П.А., Воскресенский Г.Г. Разработка математической модели процесса возвратного движения ножа виброскалывателя уплотненного снега // Мат. секционных заседаний 60-й студ. научно-практ. ТОГУ: в 2 т. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2020, Т.2, с. 115-118.

5. Voskresenskiy G.G. *Osnovy mekhaniki razrusheniya uplotnennogo snega na avtomobilnykh dorogakh* [Basic mechanics of compacted snow destruction on roads]. Khabarovsk, Pacific national university, 2008. 250 p. (In Russian)

6. Voskresenskiy G.G., Kligunov E.S. *Issledovanie protsessa dvizheniya malogabaritnogo vibroskalyvatelya uplotnennogo snega* [Investigation of the process of movement of small-barite vibration scraper of compacted snow]. *Vestnik TOGU*, 2017, №4 (47), pp. 67-72. (In Russian)

7. Yavorskiy B.M., Detlaf A.A. *Spravochnik po fizike dlya inzhenerov i studentov vuza* [Handbook of Physics for engineers and university students]. Nauka, 1968. 939 p. (In Russian)

8. Bashta T.M. *Mashinostroitelnaya gidravlika* [Mechanical Engineering Hydraulics]. Moscow, Mashinostroenie, 1971. 672 p. (In Russian)

9. Chuprakov U.I. *Gidroprivod i sredstva gidroavtomatiki* [Hydraulic drive and hydraulic automation equipment]. Moscow, Mashinostroenie, 1979. 232 p. (In Russian)

10. Sementsov P.A., Voskresenskiy G.G. *Razrabotka matematicheskoy modeli protsessa vozvratnogo dvizheniya nozha vibroskalyvatelya uplotnennogo snega* [Development of a mathematical model of the process of the return movement of the knife of the compacted snow shaker]. Khabarovsk, Pacific national university, 2020, pp. 115-118. (In Russian)