

Установление зависимости между параметрами ударного рабочего органа для разрушения льда на автодорогах с учетом характеристик льда

¹*ГУРЬЯНОВ Георгий Александрович, к.т.н., профессор, gguryanov@mail.ru,

¹ВАВИЛОВ Андрей Владимирович, к.т.н., ассоциированный профессор, avavilov@yandex.kz,

¹БАЙГЕРЕЕВ Самат Рахимгалиевич, PhD, старший преподаватель, samat.baigereyev@mail.ru,

¹ВАСИЛЬЕВА Ольга Юрьевна, старший преподаватель, ovasilyeva@ektu.kz,

¹ЛИКУНОВ Александр Викторович, преподаватель, alikunov@ektu.kz,

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Казахстан, 070004, Усть-Каменогорск, ул. А.К. Протозанова, 69,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Цель работы – получение математической зависимости для определения параметров рабочего органа для разрушения льда с учетом характеристик льда. Эффективным способом удаления льда с дорог и тротуаров является его механическое разрушение ударным воздействием рабочего органа со сферической ударной поверхностью. На основе теоретических предположений, результатов экспериментальных исследований процесса разрушения льда ударником со сферической рабочей поверхностью путем компьютерной обработки теоретических и экспериментальных результатов получена эмпирико-теоретическая зависимость, устанавливающая связь между параметрами рабочего органа и учитывающая характеристики льда, которая позволяет рассчитывать параметры рабочего органа при его проектировании и регулировать в процессе работы. Построенные на основе эмпирико-теоретической зависимости графики можно использовать на практике для подбора параметров рабочего органа для различных условий работы. Также даны практические рекомендации по регулированию процесса разрушения льда изменением параметров рабочего органа.

Ключевые слова: дорога, тротуар, лед, очистка, дорожное и коммунальное оборудование, рабочий орган, ударное действие, ударник, параметры, характеристики, математическая зависимость.

Введение

В зимний период для борьбы со скользкостью на дорогах и тротуарах часто применяют механический способ удаления льда с их поверхности [1, 2], который можно охарактеризовать как экологически безвредный, надежный по достигаемому результату и длительный по времени его сохранения. Эффективным способом механического разрушения льда является ударное воздействие [1, 2, 3], в том числе сферической поверхностью [3]. Авторами были разработаны рабочие органы (РО) ударного действия со сферическими ударниками, один из которых показан на рисунке 1.

При проектировании РО со сферической ударной поверхностью для разрушения льда, а также в процессе их работы возникает необходимость в подборе и регулировании величины ударного воздействия РО, необходимой для разрушения льда с заданными характеристиками, для чего необходимо иметь соответствующие расчетные зависимости.

Были проведены предварительные экспери-

ментальные исследования [4] по изучению и установлению первичных, самых общих закономерностей и взаимосвязей для процесса разрушения льда на твердом покрытии воздействием сферического ударника. Полученные предварительные результаты экспериментов, дополненные новыми исследованиями, выполняемыми в рамках проекта АР09258973 «Новая технология производства инновационного льдоуборочного дорожно-го оборудования» по гранту КН МОН РК, в ходе которого выполнена данная работа, позволяют перейти к установлению математической зависимости между параметрами РО со сферическими ударниками для разрушения льда с учетом характеристик льда.

Теоретическая зависимость между параметрами рабочего органа ударного действия для разрушения льда с учетом характеристик льда

При рассмотрении процесса разрушения льда на дорожном покрытии рабочим органом (РО)

ударного действия изначально предполагается, что в момент соударения вся кинетическая энергия ударника должна при его взаимодействии со льдом поглощаться последним (схема воздействия ударника на лед приведена на рисунке 2). То есть, в идеале, должен происходить полный переход кинетической энергии ударника в механическую работу разрушения и далее – в потенциальную энергию разрушающих напряжений [5].

На основании базовых положений механики упругодеформируемого твердого тела [6, 7], зависимостей, описывающих разрушение материала при сжатии и связывающих силы, деформации и напряжения, а также исходя из равенства кинетической энергии ударника и механической работы разрушения (или потенциальной энергии упругих деформаций) была получена теоретическая зависимость для определения массы ударника, связывающая между собой параметры РО и учитывающая основные характеристики льда:

$$m = \frac{3600 \cdot \sigma_{сж}^3 \cdot r \cdot h^2}{E^2 \cdot \pi \cdot n^2 \cdot R^2}, \text{ кг}, \quad (1)$$

где m – масса ударника, кг; $\sigma_{сж}$ – предельное допу-

стимое напряжение сжатия льда, Па; r – радиус сферической рабочей поверхности ударника, м; h – толщина льда на дорожном покрытии, м; E – модуль упругости для льда, Па; n – частота вращения рабочего органа, об/мин; R – расстояние от оси вращения РО до центра масс ударника, м.

По формуле (1) был произведен расчет массы m ударника для различных значений радиуса r сферической ударной поверхности и толщины h льда на дорожном покрытии при различных значениях температуры воздуха [8, 9] при следующих исходных данных: частота вращения рабочего органа $n=66$ об/мин, расстояние от оси вращения рабочего органа до центра масс ударника $R=400$ мм. Результаты расчетов массы m ударника представлены в таблице 1, из которой видно, что расчетная масса ударника очень мала. Это свидетельствует о неверной количественной оценке процесса разрушения льда по теоретической формуле (1), что можно объяснить сложностью процесса деформации и разрушения льда [7, 10], а также тем что в формуле не учитываются потери энергии. Поэтому получить пригодную для практического использования зависимость можно на

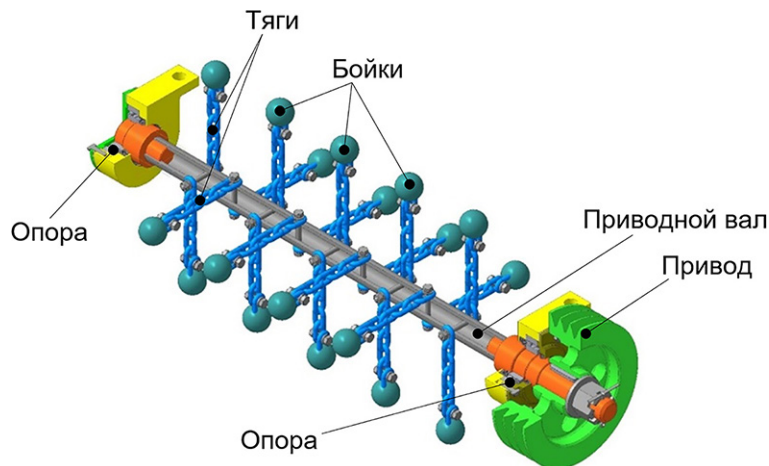
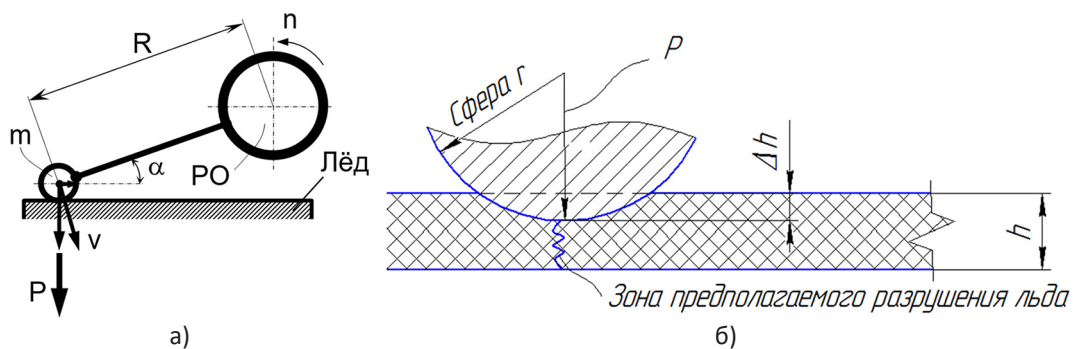


Рисунок 1 – Рабочий орган для разрушения льда со сферическими ударниками



R – расстояние от оси вращения до центра масс ударника (м); n – частота вращения рабочего органа (об/мин); v – скорость удара, м/с; P – сила удара (Н); r – радиус сферического ударника (м); Δh – деформация льда на дорожном покрытии (м); h – толщина льда на дорожном покрытии (м).

а) схема воздействия ударника на лед; б) площадь поверхности контакта сферического ударника со льдом

Рисунок 2 – Схема взаимодействия сферического ударника со льдом

Таблица 1 – Зависимость массы ударника от параметров рабочего органа и характеристик льда при различной температуре воздуха

		t° = −4°C		t° = −10°C		t° = −15°C		t = −20°C	
		толщина льда, h, мм							
		30	70	30	70	30	70	30	70
		масса ударника, m, г							
радиус сферической рабочей поверхности ударника, r, мм	25	0,010853	0,05909	0,011653	0,063446	0,009241	0,050312	0,006807	0,03706
	30	0,013024	0,070909	0,013984	0,076136	0,011089	0,060374	0,008168	0,044472
	35	0,015195	0,082727	0,016315	0,088825	0,012937	0,070436	0,00953	0,051884
	40	0,017365	0,094545	0,018645	0,101514	0,014785	0,080499	0,010891	0,059296
	45	0,019536	0,106363	0,020976	0,114204	0,016634	0,090561	0,012252	0,066708
	50	0,021707	0,118181	0,023307	0,126893	0,018482	0,100623	0,013614	0,07412
	55	0,023877	0,129999	0,025638	0,139582	0,02033	0,110686	0,014975	0,081532
	60	0,026048	0,141817	0,027968	0,152271	0,022178	0,120748	0,016337	0,088944
	65	0,028219	0,153635	0,030299	0,164961	0,024026	0,130811	0,017698	0,096356
70	0,030389	0,165453	0,03263	0,17765	0,025875	0,140873	0,019059	0,103767	

основании экспериментальных исследований. При этом за основу для получения зависимости примем теоретическую формулу (1), то есть зависимость будет носить эмпирико-теоретический характер.

Экспериментальное исследование процесса разрушения льда ударниками со сферической поверхностью

Проведем экспериментальное определение скорости v удара, необходимой для разрушения льда определенной толщины сферическим ударником массой m , а затем определим эквивалентную этой скорости удара частоту вращения n РО при постоянных значениях радиуса R расположения ударника относительно оси вращения, радиуса r сферической рабочей поверхности ударника и массы m ударника. Затем, на основании полученных экспериментальных данных, проведем эмпирическую корректировку теоретической формулы (1) так, чтобы результаты расчета по скорректированной формуле соответствовали действительности, что позволит использовать ее на практике.

Во всех экспериментах эквивалентная частота вращения РО при постоянном радиусе расположения ударника относительно оси вращения рабочего органа $R=0,4$ м, соответствующая линейной скорости ударника в момент соударения с поверхностью льда при его свободном падении определялась путем нахождения высоты свободного падения ударника, достаточной для разрушения льда при его однократном сбрасывании.

В первой серии экспериментов определяли эквивалентную частоту вращения РО, соответствующую линейной скорости при свободном падении ударника, – стального шара диаметром 50 мм ($r=25$ мм) и массой $m=0,5$ кг. Эксперимент

проводили на бетонной поверхности, покрытой ровным слоем льда толщиной $h=4...5$ мм при температуре воздуха $t^{\circ}_{\text{в}}=-2^{\circ}\text{C}$.

В результате экспериментов было установлено, что эффективная высота сбрасывания шара, при которой происходит разрушение льда за одно воздействие, $H=1200$ мм (или 1,2 м). Тогда скорость шара в момент соударения со льдом при падении шара с высоты $H=1,2$ м:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot H} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 1,2} = 4,85 \text{ м/с}, \quad (2)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с².

Эквивалентная высоте падения шара частота вращения рабочего органа:

$$n = \frac{30 \cdot v}{\pi \cdot R} = \frac{30 \cdot 4,85}{3,14 \cdot 0,4} = 115 \text{ об/мин.} \quad (3)$$

Во второй серии экспериментов определяли эквивалентную частоту вращения РО, соответствующую линейной скорости при свободном падении ударника, – стального цилиндра массой $m=5,5$ кг со сферической рабочей поверхностью диаметром $d=18$ мм (радиусом $r=9$ мм). Эксперимент проводили при температуре воздуха $t^{\circ}_{\text{в}}=-5^{\circ}\text{C}$ на бетонной поверхности с ровными участками с различной толщиной льда $h=15; 20; 30; 40; 65$ мм. На каждом участке поверхности с определенной толщиной льда ударник – цилиндр сбрасывался со все возрастающей высоты в новые точки, до тех пор, пока не произойдет разрушение льда. Максимальное количество сбрасываний до разрушения льда принималось не более 30-ти, иначе количество ударов считалось не определенным. Эффективным считалось разрушение льда, которое при сбрасывании с некоторой высоты H происходило за один удар. Высоты H , при сбрасывании ударника с которых происходило разрушение льда за один удар для разной толщины льда h ,

представлены в таблице 2.

Результаты определения скорости v (м/с) ударника – цилиндра по формуле (2), и определения частоты вращения n (об/мин) РО по формуле (3) при радиусе $R=0,4$ м для случаев эффективного разрушения льда приведены в таблице 3.

Получение эмпирико-теоретической зависимости между параметрами РО ударного действия для разрушения льда, с учетом характеристик льда

С помощью компьютера путем подбора уточним теоретическую формулу (1) следующим образом. Производим теоретический расчет по формуле (1) для толщин льда $h=15, 20, 30, 40, 65$ мм при радиусе сферической рабочей поверхности ударника $r=9$ мм, для каждой толщины льда задавая соответствующую, согласно результатам экспериментов, эффективную частоту вращения рабочего органа. Выявляем отклонение результатов теоретического расчета от действительных (экспериментальных) значений и находим величину эмпирического корректирующего коэффициента, которую подставляем в формулу (1). После подстановок и преобразований получаем уточненную эмпирико-теоретическую зависимость:

$$m = \frac{1,6848 \cdot 10^{15} \cdot \sigma_{\text{сж}}^6 \cdot r^2 \cdot h^2}{E^4 \cdot \pi^2 \cdot n^4 \cdot R^4}, \text{ кг.} \quad (4)$$

Полученная эмпирико-теоретическая формула (4) позволяет подобрать необходимую для

разрушения льда заданной прочности и толщины массу ударника, т.е. величину ударного воздействия, и устанавливает зависимость между параметрами РО со сферическими ударниками и характеристиками льда, что позволяет находить параметры РО при проектировании и регулировать при работе РО в зависимости от характеристик льда.

Путем простого преобразования формулы (4) можно получить формулы для определения и других параметров рабочего органа.

Результаты расчетов массы ударника (цилиндра и шара) по полученной формуле (4) для различных значений толщины слоя льда и частоты вращения РО с учетом температуры воздуха и при постоянных значениях радиусов R и r приведены в таблице 4. В скобках даны значения частоты вращения РО, при которых расчетная масса ударника точно соответствует экспериментальной. Как видно из таблицы 4, во всех случаях получен довольно близкий к экспериментальному результат (максимальная погрешность – 15,6%).

Практическое применение уточненной формулы (4)

Для практического применения полученной формулы (4) построим графики зависимости массы m ударника от толщины льда для разных значений температуры воздуха при параметрах, наиболее близко соответствующих параметрам реального РО для разрушения льда (рисунок 3). По данным графикам на практике можно под-

Таблица 2 – Высоты сбрасывания H в зависимости от толщины льда h при эффективном (за один удар) разрушении льда

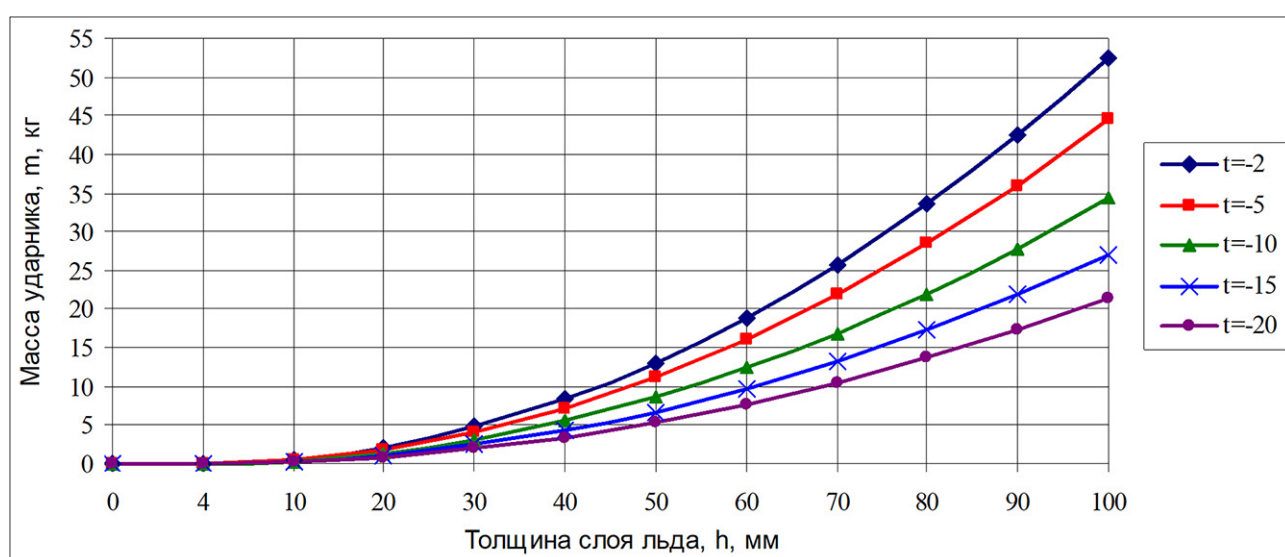
H, мм	h, мм				
	15	20	30	40	65
400	2	7	не определено	не определено	не определено
500	1	3	21	не определено	не определено
700	1	1	7	27	не определено
1000	1	1	1	6	не определено
1300	1	1	1	1	не определено
2100	1	1	1	1	1

Таблица 3 – Скорости удара и эквивалентные частоты вращения рабочего органа для случаев эффективного разрушения льда

Высота сбрасывания ударника, H, м (мм)	Скорость соударения, v, м/с	Эквивалентная частота вращения РО, n, об/мин
0,5 (500)	3,132091953	74,8111135
0,7 (700)	3,705941176	88,5177032
1 (1000)	4,429446918	105,798891
1,3 (1300)	5,050346523	120,629296
2,1 (2100)	6,418878407	153,317159

Таблица 4 – Масса ударника в зависимости от толщины льда h , и расчетной частоты вращения n рабочего органа

Толщина льда, h , мм	Частота вращения РО, n ($n_{\text{точн.}}$), об/мин	Теоретическая (расчетная по формуле (4)) масса ударника, m ($m_{\text{точн.}}$), кг	Масса ударника в эксперименте, m , кг	Погрешность, %
Ударник – цилиндр (радиус сферической рабочей поверхности $r = 9$ мм)				
15	74,81 (73,45)	5,12 (5,5)	5,5	– 6,9
20	88,51 (84,83)	4,64 (5,5)	5,5	– 15,6
30	105,79 (103,9)	5,12 (5,5)	5,5	– 6,9
40	120,62 (119,96)	5,38 (5,5)	5,5	– 2,2
65	153,31 (152,9)	5,45 (5,5)	5,5	– 0,9
Ударник – шар (радиус сферической рабочей поверхности $r = 25$ мм)				
4	115,89 (115)	0,487 (0,5)	0,5	– 2,6

Рисунок 3 – Зависимость массы ударника от толщины льда при радиусе сферической поверхности ударника $r = 25$ мм, частоте вращения $n = 300$ об/мин, радиусе расположения ударника $R = 250$ мм и при $t = -4^{\circ}\text{C}$, -10°C , -15°C , -20°C

бирать массу сферического ударника для любых значений толщины льда.

Аналогично можно построить графики зависимости и для других параметров РО. При этом для охвата большого количества различных значений параметров РО желательно иметь большое количество графиков.

Результаты расчета по формуле (4) и построенные на их основе графики рисунка 3 достаточно хорошо согласуются с результатами испытаний рабочего органа со сферическими ударниками массой 0,5 кг, установленного на тракторе [3]. Было установлено, что такой РО хорошо разрушает слой льда толщиной до 10 мм (лучше всего – 4...6 мм), но при большей толщине льда массы ударников РО уже недостаточно. В эксперименте по сбрасыванию ударника массой 16 кг был разрушен лед толщиной около 60 мм [4], что также хорошо согласуется с графиками рисунка 3. Все

это свидетельствует об адекватности и возможности практического применения эмпирико-теоретической формулы (4), но с учетом погрешности результата в 10...15% в сторону занижения необходимой массы.

Также на основании формулы (4) можно регулировать величину разрушающего воздействия и процесс разрушения льда изменением параметров РО – скорости удара, радиуса расположения ударников, частоты вращения РО.

Выводы

1) Эффективным способом удаления льда с дорог и тротуаров в зимний период является его механическое разрушение рабочим органом ударного действия со сферической поверхностью ударника.

2) Для эффективного разрушения льда рабочим органом ударного действия необходимо

определить параметры его работы, что требует наличия расчетных зависимостей, связывающих между собой параметры рабочего органа и учитывающих характеристики льда. При этом полученная теоретическая зависимость дает неверную количественную оценку процесса разрушения льда и нуждается в эмпирической корректировке.

3) Были проведены две серии экспериментов для различных значений массы и радиуса сферической рабочей поверхности ударника, в которых была экспериментально определена эквивалентная скорость удара, частота вращения РО при постоянных значениях других его параметров.

4) На основании результатов экспериментов и

компьютерной корректировки начальной теоретической формулы получена уточненная эмпирико-теоретическая зависимость между параметрами РО ударного действия с учетом характеристик льда, пригодная для практического применения, по которой проведены расчеты массы ударника для различных значений толщины слоя льда и частоты вращения РО. Во всех случаях расчетов получен довольно близкий к экспериментальному результат.

5) Приведены примеры практического использования полученной эмпирико-теоретической зависимости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Машины для содержания и ремонта городских и автомобильных дорог: Уч. пособие для вузов по дисциплине «Дорожные машины» / В.И. Баловнев, М.А. Беляев и др.; Под общ. ред. В.И. Баловнева. – 2-е изд., дополн. и перераб. – Москва-Омск: ОАО «Омский дом печати», 2005. – 768 с.
2. Богородский В.В., Гаврило В.П., Недошивин О.А. Разрушение льда: методы и средства. – Санкт-Петербург: Гидрометеоздат, 2003.
3. Дудкин М.В., Гурьянов Г.А., Ким А.И., Роговский В.В. Оборудование разрушения ударом льда на поверхности дорог и тротуаров: теория и эксперимент: Научное издание (монография). – Усть-Каменогорск: ВКГТУ, 2020. – 203 с.
4. Гурьянов Г.А., Дудкин М.В., Вавилов А.В., Ким А.И. Начальные экспериментальные исследования процесса разрушения ударом льда на твердом покрытии дорог // Вестник ВКГТУ им. Д. Серикбаева. 2018. № 2. С. 99-105.
5. Сладкова Л.А., Кузнецов А.В. Моделирование процессов разрушения льда // Гуманитарный вестник ВА РВШН. 2017. № 1. С. 168-174.
6. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости / Перевод с англ. М.И. Рейтмана; Под ред. Г.С. Шапиро. – Москва: Наука, 1975. – 576 с.
7. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. – Москва: Наука, 2004. – 310 с.
8. Петров И.Г. Выбор наиболее вероятных значений механических характеристик льда: Труды ААНИИ. – Санкт-Петербург: Гидрометеоздат, 1996. – 141 с.
9. Войтковский К.Ф. Механические свойства льда. Москва: Изд-во АН СССР, 1990. С. 5.
10. Лавров В.В. Деформация и прочность льда. – Санкт-Петербург: Гидрометеоздат, 1999. – 206 с.

Мұз сипаттамаларын ескеріп, автожолдарда мұзды бұзу үшін соққы жұмыс органының параметрлері арасындағы байланысты анықтау

¹*ГУРЬЯНОВ Георгий Александрович, т.ғ.к., профессор, gguryanov@mail.ru,

¹ВАВИЛОВ Андрей Владимирович, т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, avavilov@yandex.kz,

¹БАЙГЕРЕЕВ Самат Ракималиевич, PhD, аға оқытушы, samat.baigereyev@mail.ru,

¹ВАСИЛЬЕВА Ольга Юрьевна, аға оқытушы, ovasilyeva@ektu.kz,

¹ЛИКУНОВ Александр Викторович, оқытушы, alikunov@ektu.kz,

¹Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Қазақстан, 070004, Өскемен, А.К. Протозанов көшесі, 69,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Жұмыстың мақсаты – мұздың сипаттамаларын ескере отырып, мұзды бұзуға арналған жұмыс органының параметрлерін анықтау үшін математикалық байланысты алу. Жолдар мен тротуарлардағы мұзды бұзудың тиімді әдісі оның сфералық соққы беті бар жұмыс органының әсерінен механикалық бұзылуы болып табылады. Теориялық алғышарттар негізінде теориялық және эксперименттік нәтижелерді компьютерлік өңдеу арқылы сфералық жұмыс беті бар соққының мұзды бұзу процесін эксперименттік зерттеу нәтижелері, параметрлер арасындағы байланысты орнататын эмпирикалық-теориялық тәуелділік алынды. Бұл жұмыс жобалау кезінде жұмыс органының параметрлерін есептеуге және пайдалану кезінде реттеуге мүмкіндік беретін мұздың сипаттамаларын ескереді. Эмпирикалық-теориялық тәуелділік негізінде құрастырылған графиктер әртүрлі жұмыс жағдайлары үшін жұмыс органының параметрлерін таңдау үшін тәжірибеде қолданылуы мүмкін. Сондай-ақ жұмыс органының параметрлерін өзгерту арқылы мұздың бұзылу процесін реттеу бойынша практикалық ұсыныстар берілген.

Кілт сөздер: жол, тротуар, мұз, тазалау, жол және коммуналдық жабдықтар, жұмыс органы, соққы әрекеті, соққы, параметрлер, сипаттамалар, математикалық тәуелділік.

Determination of the Relationship between the Parameters of the Impact Working Body for the Destruction of Ice on Highways Taking Into Account the Characteristics of Ice

¹*GURYANOV Georgiy, Cand. of Tech. Sci., Professor, gguryanov@mail.ru,

¹VAVILOV Andrey, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, avavilov@yandex.kz,

¹BAIGEREYEV Samat, PhD, Senior Lecturer, samat.baigereyev@mail.ru,

¹VASILYEVA Olga, Senior Lecturer, ovasilyeva@ektu.kz,

¹LIKUNOV Alexander, Lecturer, alikunov@ektu.kz,

¹D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Kazakhstan, 070004, Oskemen, A.K. Protozanov Street, 69,

*corresponding author.

Abstract. The purpose of the work is to obtain a mathematical relationship for determining the parameters of the working body for breaking ice, taking into account the characteristics of the ice. An effective way to remove ice from roads and sidewalks is its mechanical destruction by the impact of a working body with a spherical impact surface. On the basis of theoretical premises, the results of experimental studies of the process of ice destruction by a striker with a spherical working surface by computer processing of theoretical and experimental results, an empirical-theoretical dependence have been obtained. It determines the relationship between the parameters of the working body and takes into account the characteristics of ice, which allows calculating the parameters of the working body during its design and adjust during operation. The graphs built on the basis of the empirical-theoretical dependence can be used in practice to select the parameters of the working body for various working conditions. Also practical recommendations for regulating the process of ice destruction by changing the parameters of the working body have been presented.

Keywords: road, sidewalk, ice, cleaning, road and utility equipment, working body, impact, hammer, parameters, characteristics, mathematical dependence.

REFERENCES

1. Mashiny dlja sodержaniya i remonta gorodskih i avtomobil'nyh dorog: Uch. posobie dlja vuzov po discipline «Dorozhnye mashiny» / V.I. Balovnev, M.A. Beljaev i dr.; Pod obshh. red. V.I. Balovneva. – 2-e izd., dopoln. i pererab. – Moscow-Omsk: OAO «Omskij dom pečati», 2005. – 768 p.
2. Bogorodskij V.V., Gavrilov V.P., Nedoshivin O.A. Razrushenie l'da: metody i sredstva. – Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 2003.
3. Dudkin M.V., Gur'janov G.A., Kim A.I., Rogovskij V.V. Oborudovanie razrusheniya udarom l'da na poverhnosti dorog i trotuarov: teorija i jeksperiment: Nauchnoe izdanie (monografija). – Ust'-Kamenogorsk: VKGTU, 2020. – 203 p.
4. Gur'janov G.A., Dudkin M.V., Vavilov A.V., Kim A.I. Nachal'nye jeksperimental'nye issledovaniya processa razrusheniya udarom l'da na tverdom pokrytii dorog // Vestnik Vostochno-Kazahstanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta im. D. Serikbaeva / Nauchnyj zhurnal. 2018, no. 2 (80), pp. 99-105.
5. Sladkova L.A., Kuznecov A.V. Modelirovanie processov razrusheniya l'da // Gumanitarnyj vestnik VA RVSU. 2017. No. 1. pp. 168-174.
6. Timoshenko S.P., Gud'er Dzh. Teorija uprugosti / Perevod s angl. M.I. Rejtmana; Pod red. G.S. Shapiro. – Moscow: Nauka, 1975. – 576 p.
7. Kachanov L.M. Osnovy mehaniki razrusheniya. – Moscow: Nauka, 2004. – 310 p.
8. Petrov I.G. Vybora naibolee verojatnyh znachenij mehaničeskix harakteristik l'da: Trudy AANII. – Saint Petersburg: Gidrometeoizd, 1996. – 141 p.
9. Vojtkovskij K.F. Mehaničeskie svojstva l'da. Moscow: Publ. AN SSSR, 1990. P. 5.
10. Lavrov V.V. Deformacija i prochnost' l'da. – Saint Petersburg: Gidrometeoizd, 1999. – 206 p.