

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА,  
СУДОВОЖДЕНИЕ И БЕЗОПАСНОСТЬ СУДОХОДСТВА**

**OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION AND  
SAFETY OF NAVIGATION**

УДК: 628.511.001.57:656.62.073.28

DOI: 10.37890/jwt.vi76.396

**Экспериментальный метод определения количественных  
характеристик потерь сыпучих грузов при перегрузке  
грейфером**

**Д.Н. Костюничев**

*ORCID: 0000-0002-9365-4825*

**Н.С. Отделкин**

*ORCID: 0000-0002-5448-8940*

**Д.О. Зименков**

*ORCID: 0009-0008-5901-7559*

*Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород,  
Россия, 603950, Нижний Новгород, Россия.*

**Аннотация:** Предлагаемый экспериментальный метод определения потерь сыпучих грузов, склонных к пылеобразованию, позволяет по результатам модельных исследований спрогнозировать размер потерь сыпучего груза, при работе грейфером в реальных условиях выполнения грузовых операций. В статье представлено разработанное авторами экспериментальное оборудование, позволяющее получить физические модели процессов зачерпывания груза и разгрузки грейфера, при которых происходит самое интенсивное пылеобразование и максимальный размер потерь перегружаемого груза. Кроме этого, приведены методики применения указанного экспериментального оборудования, которые предусматривают определение количественных характеристик потерь, при использовании в исследованиях натурального сыпучего груза, что допустимо при определенных параметрах моделей. Так же, методиками предусматривается возможность определения влияния скорости ветрового воздействия на величину потерь груза от пыления, поэтому исследования проводились в два этапа - как при отсутствии ветрового воздействия при работе грейфера, так и при его наличии. Интервал значений скоростей ветрового воздействия составлял от 0 до 10 м/с. В результате обработки результатов модельных исследований получены математические модели размеров потерь ряда сыпучих грузов при перегрузке грейфером с учетом ветровых воздействий на груз.

**Ключевые слова:** сыпучий груз, грейфер, работа грейфера, потери, исследования, экспериментальное оборудование, физическая модель, математическая модель, метод.

**Experimental method of determining bulk cargo losses  
quantitative characteristics during grappling overload**

**Denis N. Kostyunichev**

*ORCID: 0000-0002-9365-4825*

**Nicolay S. Otdelkin**

*ORCID: 0000-0002-5448-8940*

**Danila O. Zimenkov<sup>1</sup>**

*ORCID: 0009-0008-5901-7559*

*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract:** The proposed experimental method of determining the losses of bulk cargo prone to dust formation allows, based on model researches results, to predict the bulk cargo losses amount when working with a grab in real conditions of cargo operations. The article presents developed by the authors experimental equipment, which makes it possible to obtain physical models of cargo scooping and unloading the grab processes, during which the most intense dust formation and the maximum losses amount of the reloaded cargo occur. In addition, the methods of using the specified experimental equipment are given, which provide for the determination of losses quantitative characteristics when using full-scale bulk cargo in researches, which is permissible under certain model parameters. Also, the methods provide for the possibility of determining the wind action speed influence on the amount of cargo losses from dusting, therefore, the researches were carried out in two stages - both in the absence of wind action during the grab operation, and in its presence. The range of wind impact velocities ranged from 0 to 10 m/s. As a result of processing modeling researches results, mathematical models of losses amount of a number of bulk cargoes during grappling overload considering wind impact were obtained.

**Keywords:** bulk cargo, grapple, grapple operation, losses, researches, experimental equipment, physical model, mathematical model, method

### Введение

При перегрузке сыпучих грузов грейфером основным источником пыления является работа самого грейфера: посадка на груз; зачерпывание; подъем; перемещение и высыпание груза [1]. Причем вопросам определения потерь, вызванных пылением при работе грейфера с сыпучими грузами, относящимися к категориям пылящих и пылевидных, уделяется крайне мало внимания [2].

Наиболее интенсивное пыление происходит при высыпании груза из грейфера. Это обусловлено кинетической энергией падающего груза, которая при его ударе о преграду (пол вагона или трюм судна, слой груза) тратится главным образом на уменьшение пористости разжиженного воздухом груза и создание потоков воздуха, разносящих пыль [3, 4].

На рис. 1 представлена схема струи падающего сыпучего груза и образование пылевоздушных потоков при разгрузке грейфера.

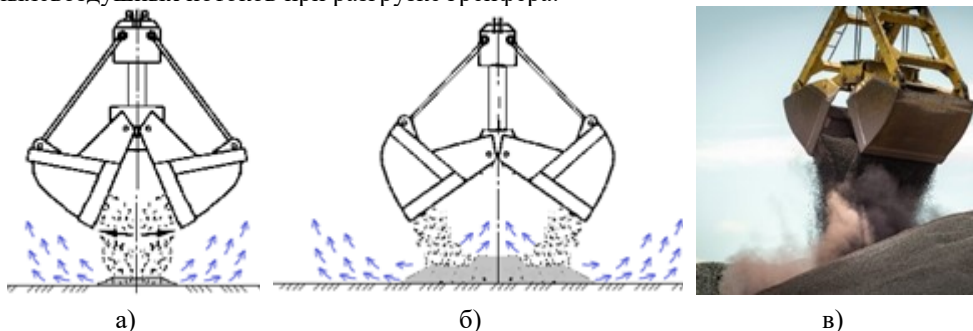


Рис. 1. Схема струи падающего сыпучего груза и образование пылевоздушной смеси при разгрузке грейфера:

а – начало разгрузки; б – окончание разгрузки; в – разгрузка реального грейфера с углем.

В связи с этим экспериментальный метод предназначен для определения потерь сыпучих грузов именно при выполнении операций разгрузки грейфера.

## Методы

Экспериментальный метод определения количественных характеристик потерь при перегрузке сыпучих грузов грейфером включает в себя два этапа исследований:

1 этап – исследование размера потерь груза при разгрузке грейфера без ветрового воздействия на груз. Задача этого этапа исследований заключается в определении массы частиц груза, переходящих во взвешенное состояние;

2 этап – исследование размера потерь груза при разгрузке грейфера с учетом ветрового воздействия на груз. Задача второго этапа – установить характеристики потерь с учетом скоростей ветра, то есть установить долю взвешенных частиц груза, которая уносится ветровыми потоками и безвозвратно теряется.

Исследование размера потерь груза при разгрузке грейфера без ветрового воздействия на груз проводились на установке, схема которой представлена на рис.2, а фото – на рис. 3.

Данная установка состоит из фундамента 3, нижняя часть которого служит для приема груза и выполнена в виде наклонных стенок и горизонтально расположенного днища. В верхней части фундамента с двух противоположных сторон имеются направляющие 4 для двух горизонтально перемещающихся створок 5. На верхнюю часть фундамента 3, имеющего прямоугольное сечение, опирается своим большим основанием пирамидальный корпус 1, что исключает возможность оседания частиц груза на стенках корпуса. Одна из четырех наклонных стенок выполнена прозрачной для удобства наблюдений. В верхней части пирамидального корпуса 1 устанавливается съемная крышка 2, которая снабжена отверстиями для прохождения грейферных канатов. Пирамидальный корпус 1 и крышка 2 служат для изоляции от внешнего пространства грейфера 6 с сыпучим грузом. Необходимо отметить, что размеры пирамидального корпуса 1 установлены таким образом, чтобы его вместимость не оказывала влияния на взвешивание частиц груза при разгрузке грейфера.

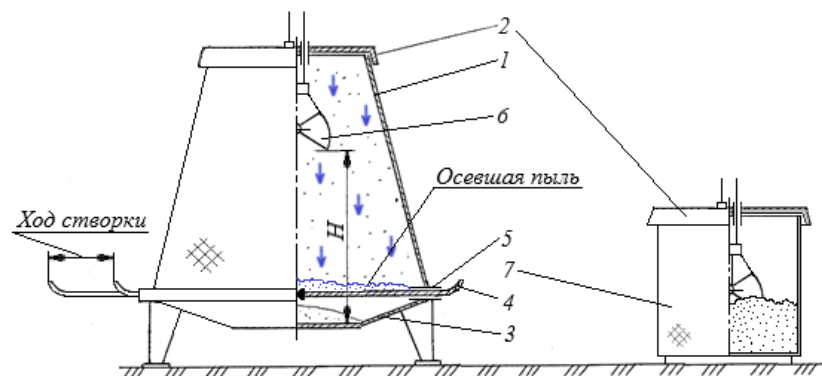


Рис. 2. Схема установки для исследования размера потерь груза при разгрузке грейфера:

- 1 – пирамидальный корпус; 2 – крышка; 3 – фундамент; 4 – направляющие; 5 – створки;  
6 – грейфер; 7 – ящик с грузом.

Кроме этого, в комплект установки входит ящик 7, в котором размещается исследуемый сыпучий груз. При этом размеры и сечение верхней части ящика 7 и верхней части пирамидального корпуса 1 имеют одинаковые значения. Это позволяет использовать съемную крышку 2 и для пирамидального корпуса 1, и для ящика 7. Одна стенка ящика 7 выполнена так же прозрачной для удобства наблюдений.



*Рис. 3. Установка для исследования размера потерь груза при разгрузке грейфера.*

Методически данные исследования опираются на возможность их проведения на моделях с использованием натурального сыпучего груза [5].

В качестве исследуемых грузов использовались уголь марки АШ, апатит, комовая сера и песок. Эксплуатационные характеристики данных сыпучих грузов приведены в табл. 1.

*Таблица 1*

**Эксплуатационные характеристики сыпучих грузов для модельных исследований**

Сыпучий груза	Насыпная плотность, т/м <sup>3</sup>	Средний размер частиц, мм	Влажность, %	Масса <i>m</i> груза в модельном грейфере, кг
УГОЛЬ	0,7	0,007	6,4	2,24
Апатит	1,6	0,061	0,9	5,12
Комовая сера	1,2	0,100	0,5	3,84
Песок	1,5	0,750	1,6	4,80

Сначала для модели грейфера устанавливается значение масштабного коэффициента, величина которого позволяет использовать в исследованиях натуральный сыпучий груз, то есть величина масштабного коэффициента должна быть равна и не превышать 10. В настоящих исследованиях использовалась модель грейфера, выполненная в масштабе 1:10. Вместимость реального грейфера к крану грузоподъемностью 10 т составляет 3,2 м<sup>3</sup>, а модельного грейфера - 0,0032 м<sup>3</sup>. С учетом этого для модельных исследований были определены значения технологических операций, оказывающих влияние на потери груза при работе грейфера (см. табл. 1 и табл. 2).

Алгоритм проведения исследований был принят следующий. В ящик 7 помещался один из трех исследуемых грузов с минимальной влажностью. Затем крышка 2 с пропущенными через ее отверстия грейферными канатами вместе с грейфером устанавливалась на ящик 2. Модель раскрытого грейфера опускалась на груз, после чего осуществлялось зачерпывание груза при продолжительности смыкания челюстей 9 секунд. Наблюдение за процессом зачерпывания груза осуществлялось через прозрачную стенку ящика 7. Затем на электронных весах производилось контрольное взвешивание груженого грейфера, чтобы убедиться в выполнении условия

$$G_{\Gamma} - G_{\Pi} = m ,$$

где  $G_T$  и  $G_n$  – масса, соответственно, груженого и порожнего модельного грейфера, кг;  
 $m$  – масса груза в модельном грейфере, кг.

Таблица 2

**Значения технологических параметров, оказывающих влияние на потери груза при работе грейфера, принятые для модельных исследований**

Наименование параметра	Значение параметра
Масса $m$ груза в модельном грейфере, кг	см. табл. 1
Время смыкания челюстей при зачерпывании груза грейфером, с	9,0
Время разгрузки грейфера, с	3,0
Высота $H$ раскрытия грейфера, м	0,1

После этого съёмная крышка 2 с груженым грейфером устанавливалась на пирамидальный корпус 1, при этом створки 5 должны находиться в открытом положении. Грейфер 6 с грузом устанавливался над горизонтально расположенным днищем фундамента 3 на высоте 0,1 м и в течение 3 секунд выполнялась разгрузка грейфера. Сразу после завершения процесса падения груза и удара струи груза о жесткое днище фундамента 3 створки мгновенно закрывались, отсекая взвешенную пыль и изолируя ее в пирамидальном корпусе 1. После трехчасовой выдержки (время выдержки устанавливалось с учетом скоростей оседания частиц груза), осевшая на створках 5 пыль собиралась и взвешивалась на аналитических весах ВЛА-200 М. Для каждого вида сыпучего груза с определенной влажностью проводилось по две серии исследований: одна серия – при разгрузке грейфера груз падал на жесткое основание; другая серия – груз падал на слой груза. Каждая серия исследований состояла из семи опытов.

**Результаты**

Результаты исследований размера потерь груза при разгрузке грейфера без ветрового воздействия на груз приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Результаты исследований размера потерь груза при разгрузке грейфера без ветрового воздействия на груз**

Сыпучий груз	Значения потерь при модельных исследованиях, г/цикл (%)		
	падение груза		средние значения
	на жесткое основание	на слой груза	
Уголь	11 (0,49)	13 (0,58)	12 (0,53)
Апатит	35 (0,68)	39 (0,76)	37 (0,72)
Комовая сера	23 (0,60)	27 (0,70)	25 (0,65)
Песок	13 (0,27)	13 (0,27)	13 (0,27)

Исследования размера потерь груза при разгрузке грейфера с учетом ветрового воздействия на груз проводились также на установке, представленной на рис. 2. Только в этом случае демонтировались прозрачная стенка и противоположная ей стенка

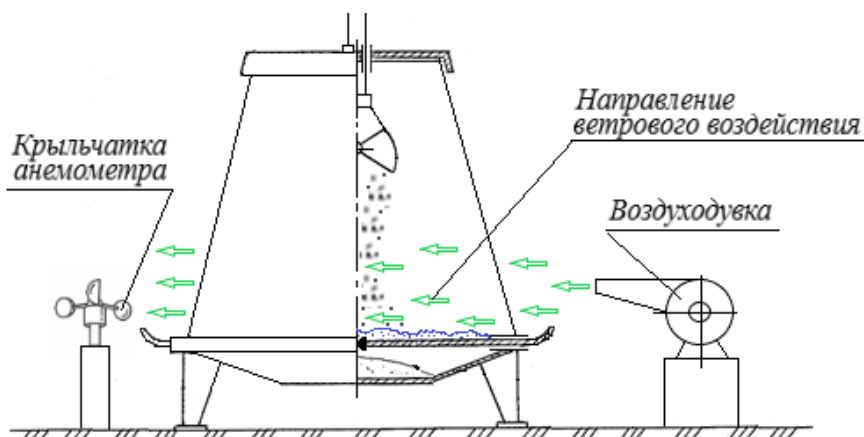
пирамидального корпуса 1. Для создания ветрового воздействия на груз использовалось оборудование, представленное на рис. 4.



*Рис. 4.* Оборудование для создания ветрового воздействия на груз при модельных исследованиях размера потерь груза:

- 1 – воздуходувка СКМ-АС2; 2 – блок управления воздуходувкой; 3 – анемометр АСЦ-3; 4 – крыльчатка анемометра.

Схема установки с двумя снятыми противоположными стенками и расположение оборудования для создания ветрового воздействия на груз приведено на рис. 5.



*Рис. 5.* Схема установки с двумя снятыми противоположными стенками и расположение оборудования для создания ветрового воздействия.

Исследования размера потерь груза при разгрузке грейфера с учетом ветрового воздействия на груз проводились по следующей методике. Процессы зачерпывания сыпучего груза и разгрузки модельного грейфера осуществлялись так же, как и в первом этапе исследований. В начальный момент раскрытия грейфера включалась в работу воздуходувка, создавая воздушный поток с определенной скоростью, которая контролировалась анемометром. После двухминутной работы воздуходувка отключалась. Оставшаяся на створках 5 пыль собиралась и взвешивалась на аналитических весах ВЛА-200М. Размер потерь груза определялся как разница между максимально возможными потерями, определенными на первом этапе исследований, и массой пыли, оставшейся на створках после воздействия ветрового потока с определенной скоростью. Для каждого вида сыпучего груза проводилось по четыре

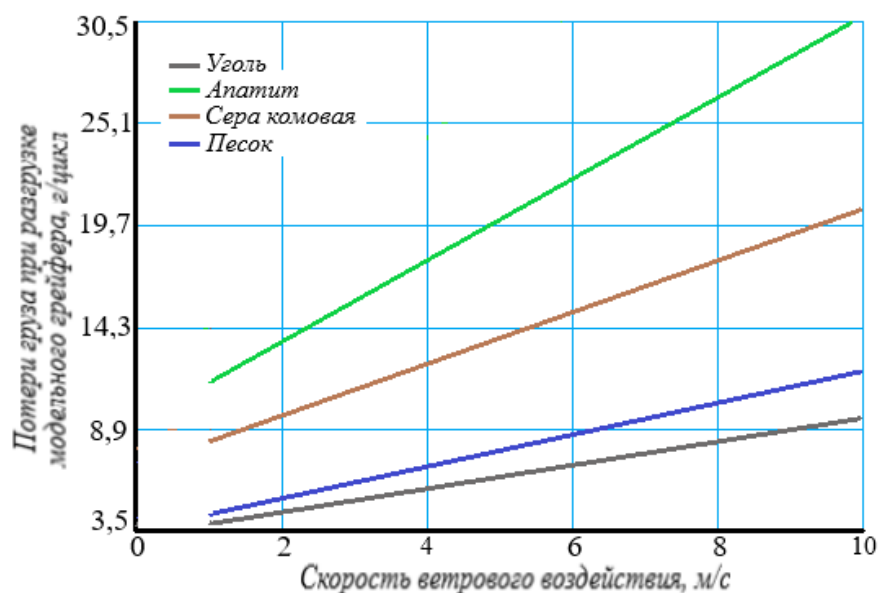
серии исследований при скорости ветрового воздействия 1, 4, 7 и 10 м/с. Каждая серия исследований состояла из семи опытов.

Результаты исследований размера потерь груза при разгрузке грейфера с учетом ветрового воздействия на груз представлены в табл. 4 и на рис. 6.

*Таблица 4*

**Результаты исследований размера потерь груза при разгрузке грейфера с учетом ветрового воздействия на груз**

Сыпучий груз	Средние значения размера потерь груза при разгрузке модельного грейфера с учетом ветрового воздействия $u$ на груз, г/цикл			
	1 м/с	4 м/с	7 м/с	10 м/с
Уголь	3,65	5,73	7,82	9,90
Апатит	11,26	17,74	24,16	30,62
Комовая сера	7,59	11,86	16,29	20,49
Песок	4,29	6,76	9,24	11,71



*Рис. 6. Зависимость размера потерь груза при разгрузке грейфера от скорости ветрового воздействия на груз.*

После обработки результатов исследования с помощью графического метода, изложенного в [6, 7], эти результаты можно представить в виде математических моделей, которые приведены в табл. 5. Так же в табл. 5 представлены прогнозируемые значения потерь при работе натурального грейфера, определенные с помощью формул перехода от модели к натуре для скоростей ветровых потоков 1 и 10 м/с [5, 8].

Таблица 5

**Математические модели размеров потерь сыпучих грузов при перегрузке грейфером с учетом ветровых воздействий на груз**

Сыпучий груз	Математическая модель размеров потерь П при модельных исследованиях, мг/цикл	Прогнозируемые значения потерь при работе натурного грейфера для значений ветрового воздействия $v$ , кг/цикл	
		1 м/с	10 м/с
Уголь	$P = 2,95 + 0,69 \cdot v$	3,64	9,90
Апатит	$P = 9,11 + 2,15 \cdot v$	11,26	30,61
Комовая сера	$P = 6,16 + 1,43 \cdot v$	7,59	20,46
Песок	$P = 3,47 + 0,82 \cdot v$	4,29	11,67

**Заключение**

Таким образом, предлагаемый экспериментальный метод определения количественных характеристик потерь сыпучих грузов при перегрузке грейфером позволяет:

- в лабораторных условиях при минимальных материальных затратах проводить исследования по определению размера потерь сыпучих грузов, склонных пылеобразованию;
- разрабатывать математические модели, учитывающие влияние на потери скорости ветровых воздействий на груз;
- прогнозировать величину потерь сыпучих грузов при работе грейфера и обосновывать нормы естественной убыли грузов для реальных условий перегрузки.

С использованием данного экспериментального метода получены математические модели и прогнозные оценки потерь для склонных к пылеобразованию угля, апатита, комовой серы и песка при их перегрузке грейфером.

**Список литературы**

1. Аксенов, И. Я. Транспорт и охрана окружающей среды / И. Я. Аксенов, В. И. Аксенов. – М.: Транспорт, 1986. – 175 с.
2. Баловнев, В. И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов строительно-дорожных машин / В. И. Баловнев. – М.: Высшая школа, 1981. – 335 с.
3. Семенов А.М. Фильтрация воздуха при ударе струи сыпучего материала о плоскость / А.М. Семенов, А.Ф. Константинов // Проблемы технологии, механизации и автоматизации перегрузочных работ на морском транспорте. – Л.: Ленморниипроект. 1984. – С. 12 - 15.
4. Бобровников, Н. А. Защита окружающей среды от пыли на транспорте / Н. А. Бобровников. – М.: Транспорт, 1984. – 72 с.
5. Отделкин, Н. С. Прогнозирование пылеобразования при перегрузке пылящих материалов грейферными кранами на основе подобия и моделирования / Н. С. Отделкин, М. С. Отделкин // Научные труды // Горьков. ин-т инж. водн. трансп. – 1999. – вып. 283. – часть 4. – С. 108 - 116.
6. Калоша, В.К. Математическая обработка результатов эксперимента. / В.К. Калоша, С.И. Лобко, Т.С. Чикова. – Минск: Высшая школа, 1982. – 103 с.
7. Круг, Г. К. Статистические методы в инженерных исследованиях / Г. К. Круг [и др.]. – М.: Высшая школа, 1983 – 216 с.
8. Отделкин, Н. С. К вопросу определения потерь пылящих грузов от распыления и пылеуноса / Н. С. Отделкин, Д. Н. Костюничев. – Материалы 1-ой Всероссийской научно-практической конференции «Морские и речные порты». – Москва, 2002, С. 12 - 14.



### References

1. Aksenov, I. YA. Transport i okhrana okruzhayushchei sredy [Transport and environmental protection] / I. YA. Aksenov, V. I. Aksenov. – M.: Transport Publ., 1986. – 175 p.
2. Balovnev, V. I. Modelirovanie protsessov vzaimodeistviya so sredoi rabochikh organov stroitel'no-dorozhnykh mashin [Modeling the processes of interaction with the environment of the working bodies of road-building machines] / V. I. Balovnev. – M.: Vysshaya shkola Publ., 1981. – 335 p.
3. Semenov A.M. Air filtration during impact of bulk material jet on the plane [Air filtration upon impact of a jet of bulk material on a plane] / A.M. Semenov, A.F. Konstantinov // Problems of technology, mechanization and automation of transshipment operations on sea transport. - L.: Lenmornii-proekt Publ. 1984. – pp. 12 - 15.
4. Bobrovnikov, N. A. Zashchita okruzhayushchei sredy ot pyli na transporte [Protecting the environment from dust in transport] / N. A. Bobrovnikov. – M.: Transport Publ., 1984. – 72 p.
5. Otdelkin, N. S. Prognozirovaniye pyleobrazovaniya pri peregruzke pylyashchikh materialov greifernymi kranami na osnove podobiya i modelirovaniya [Prediction of dust formation during handling of dusty materials by grab cranes based on similarity and modeling] / N. S. Otdelkin, M. S. Otdelkin // Nauchnye trudy [Scientific works]// Gor'kov. in-t inzh. vodn. transp. Publ. – 1999. – no. 283. – part 4. – pp. 108 -116.
6. Kalosha, V.K. Mathematical processing of experimental results [Mathematical processing of experimental results] / V.K. Kalosha, S.I. Lobko, T.S. Chikova. - Minsk: Higher School Publ., 1982. - 103 p.
7. Krug, G. K. Statisticheskie metody v inzhenernykh issledovaniyakh [Statistical Methods in Engineering Research] / G. K. Krug [i dr.]. – M.: Vysshaya shkola Publ., pp. 1983 - 216.
8. Otdelkin, N. S. K voprosu opredeleniya poter' pylyashchikh gruzov ot raspyleniya i pyleunosa [On the issue of determining the loss of dusty cargo from spraying and dust entrainment] / N. S. Otdelkin, D. N. Kostyunichev. - Materialy 1-oi Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Morskie i rechnye porty». – Moskva, 2002, pp. 12 – 14.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Костюничев Денис Николаевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры подъёмно-транспортных машин и машиноремонта, проректор по среднему профессиональному образованию – начальник НРУ им. И.П. Кулибина, Волжский государственный университет водного транспорта», 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: kostyunichev.dn@vsuwt.ru

**Отделкин Николай Станиславович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теории конструирования инженерных сооружений, Волжский государственный университет водного транспорта», 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: otdelkin.ns@vsuwt.ru

**Зименков Данила Олегович**, аспирант, Волжский государственный университет водного транспорта», 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: danila\_zimenkov@mail.ru

**Denis N. Kostyunichev**, candidate of technical sciences, associate professor of the Department of Hoisting and Transport Machinery and Machine Repair, Vice-Rector for Secondary Vocational Education, Head of N.R.S. named after I.P. Kulibin Volga State University of Water Transport 5, Nesterov street, Nizhny Novgorod, 603950

**Nikolay S. Otdelkin**, doctor of technical sciences, professor, the head of the chair of Theory of Construction of Engineering Structures, Volga State University of Water Transport 5, Nesterov street, Nizhny Novgorod, 603950

**Danila O. Zimenkov**, postgraduate student, Volga State University of Water Transport 5, Nesterov street, Nizhny Novgorod, 603950, e-mail: danila\_zimenkov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 06.06.2023; опубликована онлайн 20.09.2023.  
Received 06.06.2023; published online 20.09.2023