

## НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТРАНСПОРТА СИБИРИ И ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

*Научный журнал*

Учредитель журнала  
Сибирский Государственный  
Университет Водного Транспорта

Журнал выходит  
на русском языке с 2002 года

Периодичность – 4 выпуска в год

*Журнал широкой научной тематики:*

- Эксплуатация и экономика транспорта
- Путь. Путевое хозяйство
- Судовождение
- Теплоэнергетика
- Электроэнергетика
- Экология
- Транспортное образование

Редакционная коллегия:

**Бернацкий Анатолий Филлипович** – докт. техн. наук, профессор кафедры Строительного производства Новосибирского государственного университета архитектуры, дизайна и искусств

**Гладков Геннадий Леонидович** – докт. техн. наук, профессор кафедры Водных путей и водных изысканий Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова

**Бунеев Виктор Михайлович** – докт. экон. наук, профессор, заведующий кафедрой Управления работой флота Сибирского государственного университета водного транспорта

**Иванова Елена Васильевна** – докт. техн. наук, профессор кафедры Электроэнергетических систем и электротехники Сибирского государственного университета водного транспорта

**Манусов Вадим Зиновьевич** – докт. техн. наук, профессор кафедры Электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета

**Сальников Василий Герасимович** – докт. техн. наук, профессор кафедры Электроэнергетических систем и электротехники Сибирского государственного университета водного транспорта

**Сичкарев Виктор Иванович** – докт. техн. наук, профессор кафедры Судовождения Сибирского государственного университета водного транспорта

## NAUCHNYE PROBLEMY TRANSPORTA SIBIRI I DAL'NEGO VOSTOKA

*Science Magazine*

The founder of the journal  
Siberian State University  
of Water Transport

The magazine is published  
in Russian in 2002

Frequency – 4 issues per year

*Science magazine with the headings:*

- Transport operation and economics
- Infrastructure of transport routes
- Management and maintenance of means of transport
- Heat power industry
- Electric power industry
- Ecology
- Transport Education

Editorial team:

**Anatolii Bernatskii** – Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Construction Industry in Novosibirsk State University of Architecture, Design and Arts

**Gennady Gladkov** – Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Waterways and Water Surveys of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping

**Victor Buneev** – Doctor of Economic Sciences, Professor at the Department of Fleet Management in Siberian State University of Water Transport

**Elena Ivanova** – Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Electric Power Systems and Electric Engineering in Siberian State University of Water Transport

**Vadim Manusov** – Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Electric Power Systems in Novosibirsk State Technical University

**Vasilii Sal'nikov** – Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Electric Power Systems and Electric Engineering in Siberian State University of Water Transport

**Victor Sichkarev** – Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Navigation in Siberian State University of Water Transport

## ABOUT THE JOURNAL

### Редакция журнала

#### *Главный редактор*

**Палагушкин Борис Владимирович**,  
докт. техн. наук, профессор

#### *Заместители главного редактора:*

**Бик Юрий Игоревич**,  
докт. техн. наук, профессор

#### **Барановский Александр Михайлович**

докт. техн. наук, профессор

#### **Горелов Сергей Валерьевич**,

докт. техн. наук, профессор

#### Межрегиональный редакционный совет:

**Малов Владимир Юрьевич** – докт. экон. наук,  
профессор Института экономики и организации  
промышленного производства СО РАН  
(г. Новосибирск)

**Черемисин Василий Титович** – д-р техн. наук,  
профессор Омского государственного  
университета путей сообщения (г. Омск)

**Худоногов Анатолий Михайлович** – докт. техн.  
наук, профессор Иркутского государственного  
университета путей сообщения (г. Иркутск)

**Кича Геннадий Петрович** – докт. техн. наук,  
профессор Морского государственного  
университета имени адмирала  
Г.И. Невельского» (г. Владивосток)

### The editorial staff

#### *Editor in Chief*

**Boris Palagushkin**  
Doctor of Technical Sciences, Prof.

#### *Deputy chief editor:*

**Yurii Bik**  
Doctor of Technical Sciences, Prof.

#### **Aleksandr Baranovskii**

Doctor of Technical Sciences, Prof.

#### **Sergei Gorelov**

Doctor of Technical Sciences, Prof.

#### Interregional editorial board:

**Vladimir Malov** – Doctor of Economic Sciences,  
Prof. of Institute of Economics and Industrial  
Engineering of  
SB RAS (Novosibirsk)

**Vasilii Cheremisin** – Doctor of Technical  
Sciences, Prof. of  
Omsk State Transport University (Omsk)

**Anatolii Hudonogov** – Doctor of Technical  
Sciences, Prof. of  
Irkutsk State Transport University (Irkutsk)

**Gennadii Kicha** – Doctor of Technical Sciences,  
Prof. of Maritime State University named  
after admiral G.I.Nevelskoi (Vladivostok)



## ОЦЕНКА ТРАНСПОРТНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ВНУТРЕННИХ ВОДНЫХ ПУТЕЙ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

М.Г. Сеницын, Г.Я. Сеницын, С.Н. Масленников

### ASSESSMENT OF TRANSPORT CAPABILITIES OF INLAND WATERWAYS

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia

Mikhail G. Sinitsyn (Senior Lecturer of SSUWT)

Gennadii Ya. Sinitsyn (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)

Sergei N. Maslennikov (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)

**ABSTRACT:** The article is devoted to the assessment of the transport capabilities of inland waterways on the example of the Siberian region. As the main indicator of the above assessment, the authors propose the product of the coefficient of the river channel depth class for the period of its operation. The introduction contains the normative documents on the basis of which the proposed methodology is based. It is proposed to calculate the resource of rivers according to two options: in the first one, the guaranteed depth of the channel is used, in the second, the change in the class of the depth of the channel of the river during the entire navigation is taken into account. On the basis of the proposed methodology, the calculations of the resources of the four main Siberian rivers were made. Thanks to this indicator, it became possible to calculate and compare the resources of rivers with different periods of operation and different depths of the ship's passage. The Lena River has the least resource in the region, since its upper reaches are sharply limited by the depth of the ship's passage, and the lower reaches by the period of operation. Favorable conditions for navigation are only in the middle section of this waterway. In addition, the authors offer recommendations on the use of various types of fleet in relation to the resource of the river and the possible period of operation.

**Keywords:** inland water transport, river transport, small rivers, resource, transport capability, small-tonnage fleet, large-capacity fleet, period of operation, inland waterways, Siberian rivers, Far North

Статья посвящена оценке транспортных возможностей внутренних водных путей на примере Сибирского региона. В качестве основного показателя названной оценки авторы предлагают произведение коэффициента класса глубины судового хода реки на период ее эксплуатации. Во введении приведены нормативные документы, на основе которых базируется предложенная методика. Предлагается производить расчет ресурса рек по двум вариантам: в первом – используется гарантированная глубина судового хода, во втором – учитывается изменение класса глубины судового хода реки в течение всей навигации. На основе предложенной методики, произведены расчеты ресурсов четырех основных Сибирских рек. Благодаря данному показателю появилась возможность рассчитать и сравнить ресурсы рек с разными периодами эксплуатации и разной глубиной судового хода. Наименьшим ресурсом в регионе обладает река Лена, так как ее верховья резко ограничены глубиной судового хода, а низовья – периодом эксплуатации. Благоприятными условиями для судоходства только на среднем участке данного водного пути. Кроме того, авторами предложены рекомендации по использованию различных типов флота в увязке с ресурсом реки и возможным периодом эксплуатации.

В структуру внутренних водных путей (далее – ВВП) входят естественные и искусственные водные пути. К естественным относятся реки и озера, судоходство по которым осуществляется в их естественном состоянии. К искусственным относятся водохранилища, каналы и реки, на которых необходимые габариты для судоходства поддерживаются по средствам гидротехнических сооружений [1]. Транспортные возможности ВВП зависят от различных факторов, ключевыми из них являются глубина судового хода и период эксплуатации. Данные параметры рек влияют на выбор форм организации работы флота, схем завоза грузов, а также стратегию и тактику использования подвижного состава [2]. По глубине судового хода реки делятся на семь классов, которые приведены в межгосударственном стандарте ГОСТ 26775-97. В нем предлагается относить реку к одному из них в зависимости от гарантированной или средненавигационной глубины судового хода. Классификация водных путей приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Классификация внутренних водных путей по глубине судового хода

Класс участка внутренних водных путей		Глубина судового хода на перспективу, м		Коэффициент класса глубины судового хода ( $K_r$ )
		гарантированная	средненавигационная	
Сверхмагистральные	I	от 3,2	от 3,4	7
	II	2,5-3,2	2,9-3,4	6
Магистральные	III	1,9-2,5	2,3-2,9	5
	IV	1,5-1,9	1,7-2,3	4
Местного значения	V	1,1-1,5	1,3-1,7	3
	VI	0,7-1,1	0,9-1,3	2
	VII	до 0,7	0,6-0,9	1

Единая транспортная система, сформировавшаяся на территории Российской Федерации, имеет ряд особенностей, которые прежде всего зависят от природно-климатических, геополитических, социальных, экономических и других факторов [3]. В связи с этим следует выделить азиатскую часть России, а также ее северные и заполярные территории. На территории данной категории имеются следующие особенности:

– значительные расстояния, которые необходимо преодолеть при перевозке грузов от грузообразующих пунктов и обратно;

– неравномерность размещения основных элементов транспортной инфраструктуры. Железнодорожные магистрали и автомобили обслуживают в основном юг Сибири, а водные пути обеспечивают перевозку генеральных грузов с юга на север. Активно в данном процессе участвуют крупные сибирские реки: Обь, Иртыш, Енисей и Лена. По этим транспортным артериям перевозятся грузы в труднодоступные регионы, которые находятся на территориях, относимых к Крайнему северу; на малые реки, где ограничен период завоза грузов и преобладают экстремальные условия судоходства (высокие скорости течения, резкие перепады глубин и других габаритов судового хода). В связи с открытием новых месторождений и развития уже существующих прогнозируется рост объема грузовых потоков. Реализацией перспектив развития экономики Сибирского региона, служит драйвером формирования опорной транспортной сети.

Ресурс – это количественное измерение возможности выполнения какой-либо деятельности. На речном транспорте одним из основных показателей транспортной работы является грузооборот [4]. Чтобы повысить эффективность работы судоходной компании необходимо подобрать транспортный флот так, чтобы он соответствовал сфере применения и его количество было бы достаточным для освоения заданных грузовых потоков [5]. Объем работы, который может быть освоен транспортным флотом во многом зависит от таких параметров ВВП, как глубина судового хода и период эксплуатации. Поэтому период стояния глубины определенного класса (таблица 1) очень сильно влияет на такие показатели как валовая производительность работы флота, пропускная способность водного пути, провозная способность транспортных судов. Ресурс реки представляет собой произведение класса глубины судового хода на период его использования, который можно рассчитывать двумя способами:

– в первом случае весь период эксплуатации реки или участка реки умножается на ее класс, который принимается по средненавигационной или гарантированной глубине судового хода;

$$R_i^{y.p.} = t_i^{\partial} \cdot k_{ij}^{\partial}; \quad (1)$$

– во втором случае время стояния определенного класса глубин умножается на соответствующий класс. Сомножители по отдельным классам глубин суммируются:

Сомножители по отдельным классам глубин суммируются:

$$R_i^{y.p.} = \sum_{ij} t_{ij}^{cm.kn} \cdot k_{ij}^{\partial}; \quad (2)$$

ограничения:

$$\sum_{ij} t_{ij}^{cm.kn} = t_i^{\partial}, \quad (3)$$

где  $R_i^{y.p.}$  – ресурс  $i$ -го участка реки;

$t_i^{\partial}$  – эксплуатационный период работы на  $i$ -ом участке реки, сут;

$k_{ij}^{\partial}$  – коэффициент  $j$ -го класса глубины судового хода на  $i$ -ом участке реки;

$i$  – признак участка реки;

$j$  – признак класса реки;

$t_{ij}^{cm.kn}$  – время стояния  $j$ -го класса глубины на  $i$ -ом участке, сут;

$l_i^{y.p.}$  – длина  $i$ -го участка реки, км;

$l_p$  – длина реки, км;

$\tau_i^{\partial}$  – коэффициент, показывающий долю расстояния  $i$ -го участка от всей длины рассматриваемой реки.

$$R_i^p = \sum_i R_i^{y.p.} \cdot \tau_i^{\partial}, \quad (4)$$

$$\tau_i^{\partial} = \frac{l_i^{y.p.}}{l_p} \quad (5)$$

Первый способ нахождения ресурса реки менее точный чем второй, так как класс реки принимается по средненавигационной или гарантированной глубине, что существенно занижает данный показатель. Для полной картины эксплуатационных условий рекомендуется рассчитывать ресурс реки по второму варианту. Для этого необходимо выделить диапазоны классов глубин, которые имеются на конкретном участке и определить время их стояния.

Эксплуатационные показатели работы флота зависят от различных факторов [6]. К ним необходимо в первую очередь отнести: технико-эксплуатационные характеристики транспортных средств; дальность перевозок и характеристики грузов; условия плавания и гидрологические характеристики водных путей; принятую систему организации перевозок и работы транспортного флота; пропускную способность грузовых причалов и другие [7].

В большинстве случаев зависимость между выше названными показателями не простая, а порой очень сложная. Отдельные факторы оказывают влияние одновременно на несколько показателей, причем не всегда однозначно [8]. Так, глубина судового хода в весенней полноводный период, обеспечивает более полную загрузку крупнотоннажных судов, улучшая показатели нагрузки по отправлению. Однако, при этом увеличивается сопротивление воды движению судна и как результат показатели скорости снижаются, увеличивая время движения с грузом [9].

При наличии на балансе предприятия достаточного количества флота, рекомендуется осуществлять перевозки в первый (полноводный) период навигации, так как создаются благоприятные условия для полной загрузки судов, увеличения провозной способности флота [10]. В меженный период существенно падает степень использования тоннажа и тяги, которая определяется показателем нагрузки. Зависимость нагрузки тоннажа от продолжительности полноводного весеннего периода представлена в формуле 6

$$P' = \frac{(T_s - T_m)\tau_s + (T_m - T_0)}{T_p - T_0}, \quad (6)$$

где  $T_s, T_m$  – осадка в весенний и меженный периоды навигации, м;

$T_p, T_0$  – осадка судна при полной загрузке и порожнем, м;

$\tau_s$  – удельная продолжительность весеннего периода навигации, ед.

$$\tau_s = \frac{t_s}{t_s + t_m}. \quad (7)$$

где  $t_s, t_m$  – продолжительность весеннего и меженного периодов навигации, сут.

Предложенная методика поиска ресурса подразумевает анализ изменения периода эксплуатации и глубин судового хода. Гарантированная глубина судового хода и период эксплуатации приведены в таблице 2.

В исследовании рассмотрены четыре основные транспортные магистрали Сибири, по которым перевозятся основные грузопотоки. Каждая река имеет свои особенности, которые влияют на формы организации работы флота. Река Обь судоходна от истока до устья, условно ее можно разделить на три участка: верхний, средний и нижний. Как видно из таблицы 2 каждый из них относится к разным классам водного пути. Река Лена по аналогии с рекой Обь, так же делится на три участка с разными классами глубин. Реки Иртыш и Енисей на всем протяжении имеет стабильные гарантированные глубины, без перепадов.

*Таблица 2 – Габариты судового хода основных судоходных рек Сибири*

Река	Участок реки	$h_{гар}, м$	$K_r$	$t_s, сут.$	$l, км$	$\tau_i^0$
Обь	Новосибирск – у.р. Томь	2,2	5	168	283	0,14
	У.р. Томь – у.р. Иртыш	2,5	5	162	1514	0,71
	У.р. Иртыш – остановочный пункт Перегрёбное	3,0	6	151	328	0,15
Иртыш	У.р. Тобол – у.р. Иртыш	2,2	5	168	651	1
Енисей	Красноярск – у.р. Ангара	2,9	6	159	339	0,19
	У.р. Ангара – Подтёсово	3,0	6	151	100	0,06
	Подтесово – Ярцево	3,0	6	146	252	0,14
	Ярцево – устье р. П.Тунгуска	2,9	6	146	198	0,11
	Устье р. П. Тунгуска – Туруханск	3,2	6	121	565	0,32
Лена	Туруханск – о-в Б.Медвежий	3,2	6	107	290	0,17
	Усть-Кут – у.р. Витим	1,7	4	157	758	0,21
	У.р. Витим – Якутск	2,2	5	146	1229	0,34

**TRANSPORT OPERATION AND ECONOMICS**

Река	Участок реки	$h_{зап}$ , м	$K_r$	$t_s$ , сут.	$l$ , км	$\tau_i^0$
	Якутск – Быков мыс	2,5	5	137	1638	0,45

Расчет ресурсов основных рек Сибири произведен, используя формулы 1, 2 и данные таблицы 2, результаты представлены в таблице 3.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод. Например, что на р. Обь (участок Новосибирск – п. Перегребное) могут работать суда с полной загрузкой 5-го класса и ниже (с регистражной осадкой 1,95 м и меньше) 151 сутки. В частности, на участке у.р. Томь – у.р. Иртыш, который составляет 71% длины всего рассматриваемого участка реки Обь (2125 км) ресурс реки позволяет использовать суда 6-го класса ( $T_p = 2,35$  м и меньше) 162 суток.

*Таблица 3 – Расчет ресурсов магистральных рек Сибири*

Река	Участок реки	$\tau_i^0$	1 способ	2 способ	$\Delta R_i^p$ , %
			$R_i^p$	$R_i^p$	
Обь	Новосибирск – у.р. Томь	0,14	840	840	0
	У.р. Томь – у.р. Иртыш	0,71	810	866,7	7
	У.р.Иртыш – остановочный пункт Перегребное	0,15	906	958,85	6
В целом по реке:		1	837,6	886,31	5
Иртыш	У.р. Тобол – у.р. Иртыш	1	837,60	886,31	7
Енисей	Красноярск – у.р. Ангара	0,19	954	1009,65	6
	У.р. Ангара – Подтёсово	0,06	906	958,85	6
	Подтёсово – Ярцево	0,14	876	927,1	6
	Ярцево – устье р. П.Тунгуска	0,11	876	927,1	6
	Устье р. П.Тунгуска – Туруханск	0,32	726	768,35	6
	Туруханск – о-в Б.Медвежий	0,17	642	679,45	6
В целом по реке:		1	796,08	842,52	6
Лена	Усть-Кут – У.р. Витим	0,21	628	682,95	8
	У.р. Витим – Якутск	0,34	730	781,1	7
	Якутск – Быков мыс	0,45	685	732,95	7
В целом по реке:		1	688,33	738,82	7

Значение ресурса реки определяется универсальностью применения данного показателя – от подбора судов для работы в полноводный и меженный период навигации до сравнительной характеристики ресурсов с разными глубинами и периодами эксплуатации участков различных категорий рек.

Особенно важны правильные рекомендации по подбору и использованию крупнотоннажного флота [11]. Так как в современных условиях, когда произошло резкое и значительное снижение объемов перевозок грузов, наблюдается нестабильность грузопотоков и как результат переход на рейсовую форму организации работы флота [12]. Актуальность этого вопроса также связана с отсутствием или наличием в ограниченном количестве малотоннажного флота для такой категории водных путей как, малые реки. В таблице 4 приведены рекомендации по использованию флота для 3-х диапазонов ресурса магистральных рек Сибири.

*Таблица 4 – Рекомендации по использованию тоннажа при разных значениях ресурса реки*

$R_i^p$	Период эксплуатации, сут	Рекомендуемый тип флота	Рекомендованный флот
от 850	до 140	крупнотоннажный флот	P-56; P-29
	140-170	крупнотоннажный флот	16800; 16801; 459-A;
	от 170	крупнотоннажный флот	16800; 16801; 459-A;
от 700 до 850	до 140	крупнотоннажный флот	16800; 16801; 459-A;
	от 140	малотоннажный флот	942-Б; 562-Д; 342-Б; P-92
до 700	до 140	крупнотоннажный флот	16800; 16801; 459-A;
	от 140	малотоннажный флот	942-Б; 562-Д; 342-Б; P-92

Сфера использования крупнотоннажного флота значительно сузилась. Это произошло из-за изменений глубин судового хода – это произошло из-за недостаточного объема дноуглубительных работ и строительства ГЭС на притоках магистральных рек. При выборе оптимальных типов судов и составов необходимо учитывать как экономические, так и техниче-

ские качества судов [13]. В качестве технического критерия оценки служит производительность, а экономического рентабельность [14].

По результатам обоснования рациональных сфер использования типов флота, а также определения оптимального типа состава формируется перечень типовых составов, эксплуатируемых судоходными компаниями в различных бассейнах, с учетом в первую очередь категории и ресурса участка водного пути и других факторов.

При отборе флота для организации перевозок грузов особое место отводится определению транспортных возможностей конкретных участков водных путей [15]. Основными характеристиками при расчете которых являются габариты судового хода. И прежде всего - гарантированная глубина судового хода для магистральных рек. Для боковых рек этого показателя недостаточно. В практической деятельности транспортных предприятий используют "глубину судового хода для определения периода работы судов в полноводный период навигации". Характер изменения глубин, продолжительность их стояния с учетом определенных классов определяется на основе графиков за характерные по водности годы: мало-водный, средний по водности, многоводный. Для решения данной задачи дополнительно могут быть использованы типовые графики колебания уровней воды с распределением их на классы.

**Выводы.** Для многих предприятий пользующихся услугами внутреннего водного транспорта, а также расположенных на притоках магистральных рек, надежность транспортного обслуживания имеет первостепенное значение. Сложные путевые условия, быстрый спад уровней воды позволяют сделать вывод о том, что надежность транспортной системы в значительной степени зависит от гарантированных сроков доставки грузов по магистральным и боковым рекам. В связи с этим очень важно детальное изучение динамики изменения глубин, фаз режима рек, которые непосредственно влияют на величину периода работы флота. Предложенный авторами показатель оценки транспортных возможностей внутренних водных путей – ресурс участков водного пути позволит определить режим работы судов, подобрать флот в соответствии с грузопотоками, габаритами судового хода, и как следствие этого установить продолжительность и период работы различных типов судов, определить общий период доставки грузов, используя разработанную в СГУВТе (НГАВТе) классификацию судов по их осадкам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1 Pokrovskaya, O. D., Panychev, A. Y., Khrantsova, E. R. Digitalizatsiyn of the transport industry in Russia: trends, drivers, potential. 18th International Scientific Conference "Problems of Enterprise Development: Theory and Practice". EpSBS - Volume 82 - PEDTR 2019. doi: 10.15405/epsbs.2020.04.44.

2 Zhukov, P.V., Silvanskiy, A.A., Mukhin, K.Y., Domnina, O.L. Agile supply chain management in multinational corporations: Opportunities and barriers. (2019). International Journal of Supply Chain Management. 8(3), с. 416-425, DOI:10.1108/APJML-02-2016-0031.

3 Arkhipov, A., Grigoriev, E., Sinitsyn, M. The Northern sea route: A retrospective, strategic solutions and prospects of development// 2020. E3S Web of Conferences Volume 164, 5 May 2020, Номер статьи 11020 DOI: 10.1051/e3sconf/202016411020.

4 McKinnon, A. Freight transport deceleration: Its possible contribution to the decarbonisation of logistics. Transp. Rev. 2016, 36, 419–436. doi:10.1080/01441647.2015.1137992.

5 Pomponi, F., Fratocchi, L., & Rossi Tafuri, S. (2015). Trust development and horizontal collaboration in logistics: A theory based evolutionary framework. Supply Chain Management: An International Journal, 20, 83–97. doi:10.1108/SCM-02.

6 Crainic, T. G., & Laporte, G. (1997). Planning models for freight transportation. European Journal of Operational Research, 97, 409–438. doi: 10.1016/S0377-2217(96)00298-6.

7 P. Phani Kumar, Manoranjan Parida, Mansha Swami, 2013. «Performance Evaluation of Multimodal Transportation Systems». Procedia - Social and Behavioral Sciences, Volume 104, 2 December 2013, Pages 795-804., DOI:10.1016/j.sbspro.2013.11.174.

8 Oualid Kherbash, Marian Liviu Mocan, 2015, «A Review of Logistics and Transport Sector as a Factor of Globalization». Procedia Economics and Finance, Volume 27, 2015, Pages 42-47., DOI:10.1016/S2212-5671(15)00969-7.

9 Kiriazidis, T., Inland waterways, October 2018, In book: European Transport: Problems and Policies (pp.90-96),

1 Pokrovskaya, O. D., Panychev, A. Y., Khrantsova, E. R. Digitalizatsiyn of the transport industry in Russia: trends, drivers, potential. 18th International Scientific Conference "Problems of Enterprise Development: Theory and Practice". EpSBS - Volume 82 - PEDTR 2019. doi: 10.15405/epsbs.2020.04.44.

2 Zhukov, P.V., Silvanskiy, A.A., Mukhin, K.Y., Domnina, O.L. Agile supply chain management in multinational corporations: Opportunities and barriers. (2019). International Journal of Supply Chain Management. 8(3), с. 416-425, DOI:10.1108/APJML-02-2016-0031.

3 Arkhipov, A., Grigoriev, E., Sinitsyn, M. The Northern sea route: A retrospective, strategic solutions and prospects of development// 2020. E3S Web of Conferences Volume 164, 5 May 2020, Номер статьи 11020 DOI: 10.1051/e3sconf/202016411020.

4 McKinnon, A. Freight transport deceleration: Its possible contribution to the decarbonisation of logistics. Transp. Rev. 2016, 36, 419–436. doi:10.1080/01441647.2015.1137992.

5 Pomponi, F., Fratocchi, L., & Rossi Tafuri, S. (2015). Trust development and horizontal collaboration in logistics: A theory based evolutionary framework. Supply Chain Management: An International Journal, 20, 83–97. doi:10.1108/SCM-02.

6 Crainic, T. G., & Laporte, G. (1997). Planning models for freight transportation. European Journal of Operational Research, 97, 409–438. doi: 10.1016/S0377-2217(96)00298-6.

7 P. Phani Kumar, Manoranjan Parida, Mansha Swami, 2013. «Performance Evaluation of Multimodal Transportation Systems». Procedia - Social and Behavioral Sciences, Volume 104, 2 December 2013, Pages 795-804., DOI:10.1016/j.sbspro.2013.11.174.

8 Oualid Kherbash, Marian Liviu Mocan, 2015, «A Review of Logistics and Transport Sector as a Factor of Globalization». Procedia Economics and Finance, Volume 27, 2015, Pages 42-47., DOI:10.1016/S2212-5671(15)00969-7.

9 Kiriazidis, T., Inland waterways, October 2018, In book: European Transport: Problems and Policies (pp.90-96),

DOI:10.4324/9780429447693-6.

10 Wiegmans, B., J.h.r. (Ron) Van Duin, Inland waterway operations, June 2017, In book: Intermodal Freight Transport and Logistics (pp.75-94), DOI:10.1201/9781315177762-4.

11 Anatoliy Nyrkov, Anatoliy Shnurenko, Sergei Sokolov, Sergei Chernyi, Vitaliy Korotkov, 2017. «Some Methods of Increasing the Efficiency of River Transport System». Procedia Engineering, 2017, Volume 178, Pages 543-550., DOI:10.1016/j.proeng.2017.01.106.

12 Janjevic, M. Inland waterways transport for city logistics: a review of experiences and the role of local public authorities / M. Janjevic, A. B. Ndiaye. – Boston: WIT Press, Urban Transport XX, 2014. – pp. 279-290., DOI:10.2495/UT140241.

13 Sung-Woo Lee, Ju-Mi Song, 2014, «Economic Possibilities of Shipping though Northern Sea Route». The Asian Journal of Shipping and Logistics, Volume 30, Issue 3, December 2014, Pages 415-430., DOI:10.1016/j.ajsl.2014.12.009.

14 Dimitrios Theocharis, Vasco Sanchez Rodrigues, Stephen Pettit, Jane Haider, 2019, «Feasibility of the Northern Sea Route: The role of distance, fuel prices, ice breaking fees and ship size for the product tanker market». Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Volume 129, September 2019, Pages 111-135., DOI:10.1016/j.tre.2019.07.003.

15 Yiru Zhang, Qiang Meng, Szu Hui Ng, 2016, «Shipping efficiency comparison between Northern Sea Route and the conventional Asia-Europe shipping route via Suez Canal». Journal of Transport Geography, Volume 57, December 2016, Pages 241-249., DOI:10.1016/j.jtrangeo.2016.09.008.

DOI:10.4324/9780429447693-6.

10 Wiegmans, B., J.h.r. (Ron) Van Duin, Inland waterway operations, June 2017, In book: Intermodal Freight Transport and Logistics (pp.75-94), DOI:10.1201/9781315177762-4.

11 Anatoliy Nyrkov, Anatoliy Shnurenko, Sergei Sokolov, Sergei Chernyi, Vitaliy Korotkov, 2017. «Some Methods of Increasing the Efficiency of River Transport System». Procedia Engineering, 2017, Volume 178, Pages 543-550., DOI:10.1016/j.proeng.2017.01.106.

12 Janjevic, M. Inland waterways transport for city logistics: a review of experiences and the role of local public authorities / M. Janjevic, A. B. Ndiaye. – Boston: WIT Press, Urban Transport XX, 2014. – pp. 279-290., DOI:10.2495/UT140241.

13 Sung-Woo Lee, Ju-Mi Song, 2014, «Economic Possibilities of Shipping though Northern Sea Route». The Asian Journal of Shipping and Logistics, Volume 30, Issue 3, December 2014, Pages 415-430., DOI:10.1016/j.ajsl.2014.12.009.

14 Dimitrios Theocharis, Vasco Sanchez Rodrigues, Stephen Pettit, Jane Haider, 2019, «Feasibility of the Northern Sea Route: The role of distance, fuel prices, ice breaking fees and ship size for the product tanker market». Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Volume 129, September 2019, Pages 111-135., DOI:10.1016/j.tre.2019.07.003.

15 Yiru Zhang, Qiang Meng, Szu Hui Ng, 2016, «Shipping efficiency comparison between Northern Sea Route and the conventional Asia-Europe shipping route via Suez Canal». Journal of Transport Geography, Volume 57, December 2016, Pages 241-249., DOI:10.1016/j.jtrangeo.2016.09.008.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:**

*внутренний водный транспорт, речной транспорт, малые реки, ресурс, транспортная возможность, малотоннажный флот, крупнотоннажный флот, период эксплуатации, внутренние водные пути, реки Сибири, Крайний север*

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

*Синицын Михаил Геннадьевич, старший преподаватель ФГБОУ ВО «СГУВТ»  
Синицын Геннадий Яковлевич, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»  
Масленников Сергей Николаевич, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»*

**ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:**

*630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»*

## **ОБЗОР И АНАЛИЗ ТРАНСПОРТНЫХ ПРОИСШЕСТВИЙ, СОВЕРШЕННЫХ В ЛЕНСКОМ БАССЕЙНЕ ЗА ПЕРИОД НАВИГАЦИЙ 2017–2021 ГГ.**

**Якутский институт водного транспорта (филиал) ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»**

**А.Ю. Ефимович**

**REVIEW AND ANALYSIS OF TRAFFIC ACCIDENTS COMMITTED IN LENA BASIN FOR THE NAVIGATION PERIOD 2017-2021**

Yakutian Institute of Water Transport (branch) Siberian State University of Water

Transport (YIWT) 1, Vodnikov St., Yakutsk, 677000, Russia

Artem Yu. Efimovich (Graduate student of YIWT)

**ABSTRACT:** Transport accidents committed in the Lena basin in the period 2017-2021 are considered. The causes, factors and circumstances preceding traffic accidents are determined.

**Keywords:** *transport accident, accident, incident, boatmaster's error, violation of labor discipline*

Рассмотрены транспортные происшествия, совершенные в Ленском бассейне в период 2017–2021 гг. Определены причины, факторы и обстоятельства, предшествующие транспортным происшествиям.

Развитие внутреннего водного транспорта оказывает влияние на развитие множества регионов. Наиболее уязвимыми выступают регионы со слабо развитой наземной транспортной доступностью. К таким регионам относится регион Ленского бассейна, большая часть грузопотока которого приходится на внутренний водный транспорт.

Судоходная протяженность реки Лена около 3620 км. Обширные границы Ленского бассейна позволяют доставлять жизнеобеспечивающие грузы в отдаленные места, где полностью отсутствует железнодорожное сообщение, а автомобильный транспорт позволяет осуществлять доставку лишь сезонно и в небольших объемах.

Непростые климатические условия Якутии резко сокращают навигационный период, в рамках которого перед регионом стоит непростая задача обеспечения отдаленных районов стратегическими грузами (топливо, строительные материалы, техника, продовольственные товары и пр.), перевозки большого количества пассажиров.

В таких условиях проблема обеспечения безопасности судоходства на внутренних водных путях имеет ключевое значение. По своему содержанию данная проблема является сложной и многоплановой, связанной со значительными экономическими потерями, вызванными транспортными происшествиями.

Транспортное происшествие – это событие с судном, плавсредством, гидротехническим сооружением, результатом которого является нарушение транспортного процесса или нанесение ущерба людям, грузу, судну, сооружению [1].

Рассмотрев предложенное в Приказе Министерства транспорта Российской Федерации от 29 декабря 2003 г. №221 [2], определение транспортного происшествия, а также ряд иных источников, можно прийти к выводу, что транспортным происшествием стоит считать столкновения судов, удар, затопление судна, посадка на мель, повреждение гидротехнического сооружения.

В соответствии с данным Приказом №221 от 29 декабря 2003 г. транспортные происшествия на внутренних водных путях Российской Федерации классифицируются на аварии и инциденты, рис. 1.



*Рисунок 1 – Классификация транспортных происшествий на внутренних водных путях*

К авариям относятся:

- транспортные происшествия, в результате которых погибли или получили тяжкие телесные повреждения люди;
- разрушение судна, которое невозможно и нецелесообразно устранять путем замены или ремонта (конструктивно погибшее судно);
- затопление самоходных судов мощностью более 225 кВт и несамоходных судов порожним водоизмещением более 300 тонн;
- посадку на мель или повреждение судном гидротехнического сооружения, затопление судна или груза, повлекшее за собой прекращение движения на данном участке пути или шлюзе на 72 часа и более;
- разлив нефти, нефтепродуктов в количестве более 10 т [2].

К инцидентам относятся все другие транспортные происшествия, не относящиеся к авариям, за исключением происшествий, случившихся во время производства экспериментальных рейсов и аварийно-спасательных работ; а также посадки судов на мель с простоем свыше 24 часов [2].

За пятилетний период (2017–2021 гг.) Северо-Восточное управление государственного морского и речного надзора Федеральной службы по надзору в сфере транспорта Ространснадзора приняло на учет и расследовало 119 транспортных происшествий, табл. 1. Все 119 транспортных происшествий квалифицированы как инцидент [3].

*Таблица 1 – Годовое соотношение и классификация транспортных происшествий*

Год	2017 год		2018 год		2019 год		2020 год		2021 год	
Вид транспортного происшествия	А	И	А	И	А	И	А	И	А	И
Количество	0	21	0	21	0	34	0	23	0	20

Здесь и далее обозначено: А – авария; И – инцидент.

В Ленском бассейне осуществляют судоходство суда 33 организаций различных видов собственности. Годовое количество транспортных происшествий в организациях представлено в табл. 2.

**TRANSPORT OPERATION AND ECONOMICS**

*Таблица 2 – Годовое количество транспортных происшествий в организациях*

№ п/п	Транспортные предприятия	2017 год		2018 год		2019 год		2020 год		2021 год	
		А	И	А	И	А	И	А	И	А	И
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1.	ПАО «Ленское объединённое речное пароходство»	0	15	0	12	0	16	0	13	0	6
2.	ООО «Речное Такси»	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
3.	ООО «Ленатурфлот»	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
4.	ООО «Верхнеленское Речное Пароходство»	0	2	0	1	0	1	0	1	0	1
5.	ОАО «Киренская РЭБ флота»	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
6.	ОАО «Алексеевская РЭБ флота»	0	0	0	1	0	0	0	3	0	0
7.	ОАО «Осетровский речной порт»	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
8.	ОАО «Киренский речной порт»	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
9.	ФБУ «Администрация Ленского бассейна»	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2
10.	ООО СК «Якутск»	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1
11.	ООО СК «Витим-Лес»	0	0	0	1	0	1	0	1	0	2
12.	ИП Чайка Андрей Владимирович	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
13.	ОАО «АПРОСА Лена»	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
14.	ИП Козлов Иван Евгеньевич	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
15.	ФГБОУ ВО «СГУВТ»	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
16.	ИП Носков Сергей Валерьевич	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
17.	ООО «Направление Север»	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
18.	АО «Энергоснаб»	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
19.	ООО «Ассоциация строителей АЯМ»	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
20.	ОАО «Колымская судоходная компания»	0	2	0	0	0	3	0	1	0	0
21.	ООО «Терминал Верхнеленское речное пароходство»	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
22.	ИП Умрихин Петр Степанович	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
23.	ИП Высоцкий Борис Михайлович	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
24.	ИП Парнищев Сергей Геннадьевич	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
25.	ООО «ИСТ ТРЕЙД ФИНАНС»	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
26.	ИП Лебяк Богдан Владимирович	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0

## ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

Продолжение таблицы 2

27.	ООО «Вторая паромная переправа»	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
28.	ООО «Горнист»	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
29.	ИП Лепехин Сергей Викторович	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
30.	ООО «ТРАНСИБРЕГИОН»	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
31.	ООО «Первая паромная переправа»	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
32.	ООО ТК «ТЕХ АВАНГАРД»	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
33.	ИП Гладких Артем Александрович	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0

Основными видами транспортных происшествий с судами на протяжении пяти навигаций являются: посадки судов на мель и соприкосновения судна с другим объектом (причалом, с судном на якорю, берегом, навигационным препятствием, подводным предметом, отдельным каменистым образованием, грунтом и др., (то есть удар). Состав транспортных происшествий по видам представлен в табл.3.

Таблица 3 – Годовое соотношение и основные виды транспортных происшествий с судами

№ п/п	Виды транспортных происшествий	2017 количество / %	2018 количество / %	2019 количество / %	2020 количество / %	2021 количество / %
1.	Столкновение	2/9,52	1/4,76	2/5,88	1/4,34	2/10
2.	Затопление судов	1/4,76	1/4,76	2/5,88	0	1/5
3.	Удары	5/23,81	6/28,57	13/38,23	6/26,08	6/30
4.	Посадка на мель	13/61,9	13/61,90	17/50	16/69,56	11/55
5.	Прочие	0	0	0	0	0
ВСЕГО:		21	21	34	23	20

Анализ транспортных происшествий позволяет установить их причины, табл. 4.

Таблица 4 – Годовое количество и причины транспортных происшествий

№ п/п	Причины транспортных происшествий	2017 к-во / %	2018 к-во / %	2019 к-во / %	2020 к-во / %	2021 к-во / %
1.	Невыполнение командным составом требований, установленных в нормативных документах (судоводительская ошибка)	19/85,70	18/71,42	33/97,05	22/95,64	18/90
2.	Неудовлетворительное содержание пути, навигационного оборудования судового хода	1/4,76	2/9,52	1/2,94	0	0

**TRANSPORT OPERATION AND ECONOMICS**

*Продолжение таблицы 4*

№ п/п	Причины транспортных происшествий	2017 к-во / %	2018 к-во / %	2019 к-во / %	2020 к-во / %	2021 к-во / %
3.	Технические неисправности судна	1/4, 6	1/4,76	0	0	0
4.	Невыполнение береговыми работниками нормативных документов	0	0	0	1/4,34	0
5.	Непреодолимые, непредвиденные обстоятельства	0	0	0	0	0
6.	Нарушение командным составом трудовой дисциплины	0	0	0	0	2/10
ВСЕГО:		21	21	34	23	20

Также при проведении обзора и анализа транспортных происшествий в Ленском бассейне стоит обратить внимание на такие моменты как:

1. Распределение по должности и стажу участников транспортных происшествий (табл. 5);
2. Годовое количество и распределение транспортных происшествий по месту и метеоусловиям (табл. 6);
3. Годовое количество и распределение транспортных происшествий по типу флота (табл. 7).

Проведенный анализ причин транспортных происшествий позволяет сделать вывод о том, что судовладельцами и ответственными лицами за безопасность судоходства не доводятся до командного состава обстоятельства транспортных происшествий, не проводится разъяснительная работа по систематическим нарушениям обязательных требований законодательства Российской Федерации в области внутреннего водного транспорта, не ведется качественная работа по повышению квалификации персонала и не принимается во внимание опыт предыдущих лет работы. Данные обстоятельства, в совокупности, влияют на систематические нарушения требований законодательства и халатное отношение к должностным обязанностям, приводящие к совершению транспортных происшествий.

*Таблица 5 – Распределение по должности и стажу участников транспортных происшествий*

Стаж работы в занимаемой должности	Вид	Нарушение ПП по ВВП				Нарушение Устава службы			Нарушение Технического регламента о безопасности объектов ВВТ		Прочие		Всего
		Должность											
		Капитан	Ст. пом. кап.	2 пом. кап.	3 пом. кап.	Капитан	Ст. пом. кап.	2 пом. кап.	Капитан	Ст. пом. кап.	капитан	тех. дир.	
До 3-х лет	Столкновение	3	0	0									3
	Затопление	0	0	0					1				1
	Посадка на мель	10	5	3							2	1	21
	Удары	5	4	0						1	1		11
	Всего	18	9	3					1	1	3	1	36

## ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

Продолжение таблицы 5

Стаж работы в занимаемой должности	Вид	Нарушение ПП по ВВП				Нарушение Устава службы			Нарушение Технического регламента о безопасности объектов ВВТ		Прочие		Всего
		Должность											
		Капитан	Ст.пом.кап.	2 пом.кап.	3 пом.кап.	Капитан	Ст.пом.кап.	2 пом.кап.	Капитан	Ст.пом.кап.	капитан	тех. дир.	
От 3-х до 5-и лет	Столкновение	2	0	0									2
	Затопление	0	1	0									1
	Посадка на мель	4	6	0					1				10
	Удары	2	2	0									3
	Всего	8	9	0					1				18
От 5-и до 10 лет	Столкновение	1	1	0									2
	Затопление	2	0	0									2
	Посадка на мель	5	1	1									7
	Удары	5	0	2									7
	Всего	13	2	3									18
Свыше 10 лет	Столкновение	2	0	0									2
	Затопление	1	0	0									1
	Посадка на мель	25	5	0							1		31
	Удары	11	1	0				1					13
	Всего	39	6	0				1			1		47
<b>ИТОГО:</b>		<b>78</b>	<b>26</b>	<b>6</b>					<b>2</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>119</b>

Таблица 6 – Годовое количество и распределение транспортных происшествий по месту и метеоусловиям

№ п/п		2017 к-во / %	2018 к-во / %	2019 к-во / %	2020 к-во / %	2021 к-во / %
<b>1. По месту происшествия</b>						
1.1.	На не затруднительных участках для судоходства	11/52,38	7/33,33	15/44,11	6/26,08	10/50
1.2.	На затруднительных участках для судоходства	10/47,62	14/66,66	19/55,88	17/73,91	10/50
<b>2. По времени суток</b>						
2.1.	В светлое время суток	13/61,90	17/80,95	25/73,52	20/86,95	18/90
2.2.	В темное время суток	8/38,10	4/19,04	9/26,47	3/13,04	2/10
<b>3. По метеоусловиям</b>						
3.1.	Благоприятные метеоусловия	10/47,62	14/66,66	25/73,52	15/65,21	13/65
3.2.	Сложные метеоусловия	11/52,38	7/33,33	9/26,47	8/34,78	7/35
	<b>Итого:</b>	<b>21</b>	<b>21</b>	<b>34</b>	<b>23</b>	<b>20</b>

*Таблица 7 – Годовое количество и распределение транспортных происшествий по типу флота*

Тип флота	2017 к-во / %	2018 к-во / %	2019 к-во / %	2020 к-во / %	2021 к-во / %
Сухогрузный самоходный	4/19,05	5/23,81	11/32,35	6/26,08	7/35
Наливной самоходный	6/28,57	3/14,28	10/29,41	8/34,78	4/20
Буксирный	11/52,38	11/52,38	10/29,41	9/39,13	5/25
Пассажирский скоростной	0	2/9,52	1/2,94	0	1/5
Пассажирский	0	0	2/5,88	0	1/5
Технический	0	0	0	0	2/10
<b>ИТОГО:</b>	<b>21</b>	<b>21</b>	<b>34</b>	<b>23</b>	<b>20</b>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1 Ольшамовский С.Б. Организация безопасности плавания судов / С.Б.Ольшамовский, Д.К.Земляновский, И.А.Щепетов. – М.: Транспорт, 1972. – 185 с.

2 Приказ Минтранса РФ от 29.12.2003 № 221 (ред. от 27.12.2010) «Об утверждении Положения по расследованию, классификации и учету транспортных происшествий на внутренних водных путях Российской Федерации».

3 Официальный сайт Федеральной службы по надзору в сфере транспорта: <https://rostransnadzor.gov.ru/>.

1 Olshamovsky S.B. Organization of ship navigation safety / S.B. Olshamovsky, D.K. Zemlyanovsky, I.A. Shchepetov. Moscow, Transport Publ. 1972. 185 p.

2 Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation of December 29, 2003 No. 221 (as amended on December 27, 2010) "On Approval of the Regulations for the Investigation, Classification and Recording of Transport Accidents on Inland Waterways of the Russian Federation".

3 Official website of the Federal Service for Supervision in the Sphere of Transport: <https://rostransnadzor.gov.ru/>.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** транспортное происшествие, авария, инцидент, судоводительская ошибка, нарушение трудовой дисциплины

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:** Ефимович Артём Юрьевич, аспирант ЯИВТ (филиал) ФГБОУ ВО «СГУВТ»  
**ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:** 677000, г. Якутск, ул. Водников, 1, ЯИВТ (филиал) ФГБОУ ВО «СГУВТ»

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ГИДРОУДАРНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ДНОУГЛУБИТЕЛЬНЫХ РАБОТ НА ВОДНЫХ ПУТЯХ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»  
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН

Л.В. Городилов

### ASSESSMENT OF TRANSPORT CAPABILITIES OF INLAND WATERWAYS

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia  
Chinakal Institute of Mining SB RAS (CIM SB RAS) 54, Krasny prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia  
Leonid V. Gorodilov (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Head of Laboratory of CIM SB RAS)

**ABSTRACT:** Impact loosening of rocks is a promising method for dredging in rocks. The use of hydraulic impact devices in this case allows you to work efficiently, safely and with minimal environmental damage to the environment. The article proposes a method for calculating the parameters of a single-sided reverse action device (with an elastic connection between the striker and the body of the impact unit), which can be used at the stage of its preliminary design. The technique is based on the assumption of constant pressure in the system and the linear nature of the connection between the striker and the body of the impact unit. This makes it possible to obtain formulas for calculating the dynamics and characteristics of the system using the equations of the oscillation theory. Sub-routines for calculating the characteristics of the striker and a recursive subroutine for calculating the limiting cycles of a hydropercussion device have been developed and are being presented. Test calculations of the characteristics of several impact devices have been carried out. The results are compared with similar ones obtained using a program for calculating the parameters of hydraulic impact devices based on a model of a system with a constant flow source, their satisfactory convergence is noted.

**Keywords:** dredging, hydraulic percussion device, parameters, methodology, calculation program

Ударное рыхление горных пород является перспективным методом ведения дноуглубительных работ в скальных породах. Применение при этом гидроударных устройств позволяет вести работы эффективно, безопасно и с минимальным экологическим ущербом для окружающей среды. В статье предложена методика расчета параметров устройства одностороннего обратного действия (с упругой связью между бойком и корпусом ударного узла), которая может быть использована на этапе его эскизного проектирования. Методика основана на предположении о постоянстве давления в системе и линейном характере связи между бойком и корпусом ударного узла. Это позволяет получить формулы для расчета динамики и характеристик системы с применением уравнений теории колебаний. Разработаны и приводятся подпрограммы расчета характеристик бойка и рекурсивная подпрограмма расчета предельных циклов гидроударного устройства. Проведены тестовые расчеты характеристик нескольких ударных устройств. Результаты сравниваются с аналогичными, полученными с применением программы вычисления параметров гидроударных устройств, основанной на модели системы с источником постоянного расхода, отмечается их удовлетворительная сходимость.

**Введение.** Необходимость в разработке горных пород под водой связано с гидротехническим строительством, расширением и строительством акваторий портов, углублением фарватеров рек, строительством траншей для трубопроводов, добычей полезных ископаемых, другими технологическими задачами. По оценкам специалистов, общий глобальный годовой оборот дноуглубительных работ оценивается около 11 млрд. евро. Названные работы, во всяком случае в скальных породах, невозможны без предварительного рыхления, которое может быть реализовано при помощи ударных машин, позволяющих производить их экологически чисто, безопасно и эффективно. Поэтому развитие теории гидроударных машин, методов их расчета и разработка новых конструкций в настоящее время представляется актуальной научно-технической задачей.

Наиболее активно развитие теории, методов расчета и проектирования гидроударных систем для исполнительных органов горных и строительных машин велось в 60–80-х годах прошлого века. Разработанные в этот период математические модели и связанные с ними методы расчета можно найти, например, в [1]. В них для исследования общих свойств гидроударных систем использовали расчетные схемы «рационального рабочего процесса» (Алимов О.Д., Басов С.А., 1990) или «эталонного ударного механизма» (Горбунов В.Ф., Лазуткин А.Г., Ушаков Л.С., 1986), которые рассматривали явление как движение ограниченной с одной стороны материальной точки под действием «кусочно-постоянной», зависящей от координаты и направления движения, силы.

В настоящее время работы в этом направлении продолжают. Так, в [2][3] для расчета параметров гидроударной системы использовали расчетную схему, основанную на гипотезе движения ударной массы как равномерно ускоренной. О современном состоянии вопроса можно судить по отечественным и зарубежным публикациям [4][5][6][7][8][9][10][11], которые,

в основном, посвящены отдельным конструктивным схемам гидроударных устройств, разработке их математических и физических моделей и соответственно численному и экспериментальному исследованию.

В данной работе представлена процедура выбора параметров гидроударной системы одностороннего действия, в которой боек движется под действием кусочно-постоянной силы давления со стороны жидкости и постоянно действующей силы упругости, линейно зависящей от его положения. Она существенно проще, чем аналогичная при расчетной схеме с источником постоянного расхода [12], в которой сила со стороны жидкости является величиной, которую можно определить лишь вследствие совместного решения системы дифференциальных уравнений.

*Расчетная схема системы.* Принципиальная схема гидроударной системы одностороннего обратного действия (рис.1) включает источник постоянного давления – насос (Н), предохранительный клапан (КП), распределитель (Р) и ударный узел – боек (Б) и корпус (К), с гидравлической камерой и упругой связью между ними. В исходном состоянии боек находится на ограничителе О, распределитель – в позиции I. Гидравлическая камера А в зависимости от положения распределителя Р поочередно соединяются с напорной и сливной линиями, боек Б совершает возвратно-поступательное движение с ударами об ограничитель О.

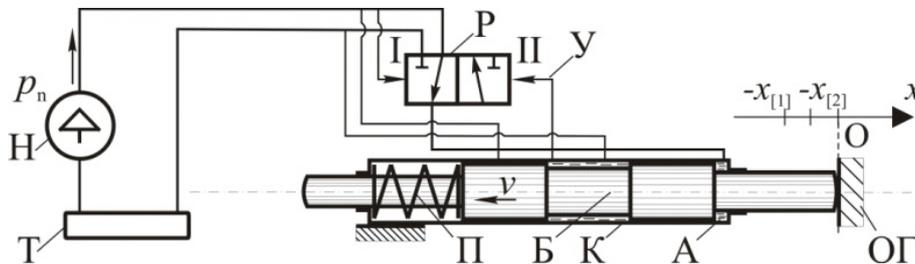


Рисунок 1 – Принципиальная схема гидроударной системы одностороннего обратного действия: Н – насос, Р – распределитель, П – пружина, У – управляющая линия распределителя Р; К и Б – корпус и боек ударного узла (УУ), ОГ – ограничитель (инструмент), А – соответственно камеры обратного хода УУ

Система работает следующим образом. В начальный момент боек находится на ограничителе, распределитель – в позиции I, управляющая линия распределителя У соединена со сливной линией, камера А – с напорной линией. Начинается 1-я фаза, в течении которой боек под действием давления жидкости в камере А и пружины П движется влево, доходит до координаты  $-x_{[1]}$ , управляющая линия У через проточку в бойке соединяется с напорной линией и распределитель переходит в позицию II. Начинается 2-я фаза, в которой камера А соединяется со сливной линией, боек под действием пружины П тормозится и совершает прямой ход до координаты  $-x_{[2]}$ . После прохождения координаты  $-x_{[2]}$  управляющая линия У через проточку в бойке соединяется со сливной линией и распределитель переходит в позицию I. Камера А соединяется с напорной линией. Боек движется под действием давления жидкости в камере А и пружины П до взаимодействия с ограничителем, после чего цикл повторяется.

Параметры элементов системы считаем сосредоточенными, жидкость – несжимаемой, механические и гидравлические потери отсутствуют, распределитель переключается мгновенно и без потерь.

Движение бойка гидроударной системы описывается дифференциальным уравнением второго порядка

$$m \frac{d^2 v}{dt^2} = -c_m (x - x_3) - S_{(J)} p_n, \quad (1)$$

начальными условиями

$$t = 0: x = x_0, v = v_0 \quad (2)$$

и условиями сопряжений решения дифференциальных уравнений в точках припасовки

$$x = -x_{[1]}, v < 0 - I \rightarrow II; \quad x = x_{[2]}, v > 0 - II \rightarrow I; \quad x = 0, v_+ = -Rv_-, \quad (3)$$

где  $x$  и  $v$  – координата и скорость бойка;

$t$  – время;

$m$  – масса бойка;

$S_{(j)} = S_A$  при  $J = I$  и  $S_{(j)} = 0$  при  $J = II$  ( $J$  – положение распределителя);

$p_n$  – давление в системе;

$c_m$  и  $x_3$  – жесткость и предварительный натяг пружины;

→ указывает направление изменения позиции распределителя;

$v_+$  и  $v_-$  – скорости бойка до и после удара;

$R$  – коэффициент восстановления скорости.

Уравнения (1), (2) представляют собой уравнения свободных колебаний материальной точки [13]. Их решение в нашем случае можно записать следующим образом:

$$x = v_0 / k \sin kt + (-\lambda_{(j)} + x_0 + x_3) \cos kt + \lambda_{(j)} - x_3, \quad v = v_0 \cos kt - (-\lambda_{(j)} + x_0 + x_3) k \sin kt,$$

где  $k = \sqrt{c/m}$  – круговая частота колебаний;  $\lambda_{(j)} = p_n S_{(j)} / c$  – положение статического равновесия бойка. Введем в последние уравнения номер фазы системы и представим их в виде

$$x_{(j)} = C_{(j)} \sin(kt_{(j)} + \alpha_{(j)}) + \lambda_{(j)} - x_3, \quad v_{(j)} = C_{(j)} k \cos k(t_{(j)} + \gamma_{(j)}),$$

где  $C_{(j)} = \sqrt{(v_{(j)-} / k)^2 + (x_{(j)-} + x_3 - \lambda_{(j)})^2}$ ,  $\gamma_{(j)} = \arctg[(x_{(j)-} + x_3 - \lambda_{(j)}) / (v_{(j)-} / k)]$ , подстрочный индекс « $j$ » в скобках – номер фазы систем, знак «-» за скобками – величина относится к началу фазы, знак «+» – к окончанию фазы.

Тогда периоды 1-й, 2-й и 3-й фаз цикла и скорости бойка в их конце соответственно при  $x_{(1)+} = -x_{[1]}$ ,  $x_{(2)+} = -x_{[2]}$ ,  $x_{(3)+} = 0$  (3) определяются формулами

$$t_{(j)+} = \arcsin[(x_{(j)+} + x_3 - \lambda_{(j)}) / C_{(j)}] - \gamma_{(j)}, \quad v_{(j)+} = C_{(j)} k \sin k(t_{(j)+} + \gamma_{(j)}). \quad (4)$$

*Процедура решения.* С использованием формул (4) возможно вычисление времени цикла  $T_c^*$  и предупредительной скорости  $v_i^*$ , соответственно

$$T_c^* = \sum_{j=1}^3 t_{(j)+}, \quad v_i^* = v_{(3)+}.$$

(надстрочный индекс «\*» означает, что данная характеристика относится к предельному циклу).

В случае, если коэффициент восстановления  $R$  не равен нулю, процедура вычисления характеристик предельного цикла носит итерационный характер и может быть реализована с применением рекурсии. На рис. 2 представлены подпрограммы MathCAD, которые реализует указанную процедуру.

Подпрограммы  $tphs(x, lmd, x_0, v_0, x_3)$  и  $v(t, lmd, x_0, v_0, x_3)$  служат соответственно для вычисления значений времени очередной фазы цикла и скорости бойка в ее конце. Их параметрами являются положение статического равновесия бойка  $lmd$  в текущей фазе цикла, координата  $x_0$  и скорость  $v_0$  бойка в начале текущей фазы цикла, величина предварительного натяга пружины  $x_3$ , координата точки припасовки  $x$  и момент времени  $t$ , в который производится вычисление скорости.

$$tphx(x, lmd, x0, v0, x3) := \frac{1}{k} \cdot \left[ \text{Asin} \left[ \frac{lmd + x + x3}{\sqrt{(v0 \cdot k^{-1})^2 + (lmd + x0 + x3)^2}}, x - x0 \right] - \text{Atan}(v0 \cdot k^{-1}, lmd + x0 + x3) \right]$$

$$v(t, lmd, x0, v0, x3) := k \cdot \sqrt{(v0 \cdot k^{-1})^2 + (lmd + x0 + x3)^2} \cos(k \cdot t + \text{Atan}(v0 \cdot k^{-1}, lmd + x0 + x3))$$

(a)

```

ClcltPrmtrs(i, vI, vIpr, tpls, xpn, lph, x3, R) :=
  if |vI - vIpr| < 0.000001
  | outData0 ← i
  | outData1 ← tpls1 + tpls2 + tpls3
  | outData2 ← vI
  | outData
  otherwise
  | vIpr ← vI
  | vpls ← -R · vI
  | for j ∈ 1..3
  |   | tpls_j ← tphx(xpn_j, lph_{j-1}, xpn_{j-1}, vpls_{j-1}, x3)
  |   | vpls_j ← v(tpls_j, lph_{j-1}, xpn_{j-1}, vpls_{j-1}, x3)
  | vI ← vpls_j
  | i ← i + 1
  | ClcltPrmtrs(i, vI, vIpr, tpls, xpn, lph, x3, R)
    
```

(б)

$$ClcltPrmtrs(0, 1, 0, tpls, xpn, lph, x3, R) = \begin{pmatrix} 6 \\ 0.02435 \\ 7.82624 \end{pmatrix}$$

(в)

*Рисунок 2 – Подпрограммы вычисления периодов и скоростей в конце фаз цикла (а), рекурсивная функция (б) и ее вызов (в) в программе MathCAD*

Здесь  $i$  – номер итерационного приближения к предельному циклу,  $j$  – номер фазы цикла,  $vI$  и  $vIpr$  – предударная скорость в текущем и предыдущем циклах,  $tpls$  и  $vPls$  – вектор времен фаз и скоростей в конце фаз цикла,  $xpn$  и  $lph$  – векторы точек припасовки  $x_{(j)+} - x_{[1]}$ ,  $-x_{[2]}$  и  $0$  и величин статического равновесия  $\lambda_{(j)} - \rho_n S_{(j)} / c$ ,  $0$  и  $\rho_n S_{(j)} / c$  соответственно в 1-й, 2-й и 3-й фазах цикла,  $x_3$  – величина предварительного натяга пружины.

Подпрограммы  $tphs(x, lmd, x0, v0, x3)$  и  $v(t, lmd, x0, v0, x3)$  используются далее в рекурсивной подпрограмме-функции  $ClcltPrmtrs(i, vI, vIpr, tpls, xpn, lph, x3, R)$ , в которую в качестве аргументов передаются номер итерации  $i$ , величины предударных скоростей  $vI$  в последней  $i$ -й и  $vIpr$  предшествующей ей  $i-1$ -й фазам цикла,  $xpn$  и  $lph$  – соответственно векторы значений координат точек припасовки и положений статического равновесия бойка в фазах цикла,  $x_3$  – величина предварительного натяга пружины,  $R$  – коэффициент восстановления. В 1-й итерации значениям  $vI$  и  $vIpr$  присваиваются соответственно значения 1 и 0, чтобы их разница по абсолютной величине гарантированно превышала точность вычислений (в нашей программе равную 0.000001), контролируемую по условию  $|vI - vIpr| < 0.000001$ .

В подпрограмме  $ClcltPrmtrs$  в цикле  $j \in 1..3$  вычисляются величины периодов фаз цикла  $tpls_j$  и скоростей в конце этих периодов  $vPls_j$ , после расчетов очередного цикла функция вызывается рекурсивно и в случае, если условие (б) выполняется, расчет заканчивается, величины номера итерации  $i$ , времени  $T_c^*$  и предударной скорости  $v_i^*$  предельного цикла присваиваются элементам массива  $outData$  и возвращаются в основную программу.

**Результаты и их обсуждение.** В таблице представлены примеры расчета (параметры и характеристики) рассматриваемых систем при массах бойка соответственно 6 (строки 1,2), 9 (строки 3,4) и 18 кг (строки 5,6) и их сравнение с результатами, получаемыми при расчетах по схеме с источником постоянного расхода. В расчетах по последней схеме использовали

программу выбора параметров гидроударного устройства [12], расход  $q_0$ , объем газа в аккумуляторе  $V_n$  при давлении  $p_n$  и коэффициент восстановления скорости бойка  $R$  принимали равными

$$q_0 = \frac{S_A \cdot (x_{[1]} - x_{[2]})}{T_c \eta_0}, \quad V_n \approx 3.5 \cdot S_A \cdot (x_{[1]} - x_{[2]}), \quad R = 0.$$

где  $\eta_0$  – объемный КПД источника постоянного расхода (насоса).

*Таблица – Результаты расчетов параметров и характеристик гидроударного устройства обратного действия*

№ №	$x_{[1]}$ , мм	$x_{[2]}$ , мм	$S_{A,2}$ , см <sup>2</sup>	$x_3$ , мм	$c_m$ , Н/м	$v_l$ , м/с	$f$ , Гц	$x_{\max}$ , мм	$p_{\min}$ , МПа	$p_{\max}$ , МПа	$V_{n,3}$ , см	$q_0$ , л/мин
<i>m = 6 кг</i>												
1	45	5	2.5	20	$3 \cdot 10^4$	7.3	21.7	91	16.0	16.0	–	13.6
2	45	5	2.5	20	$3 \cdot 10^4$	7.5	21.9	93	13.6	19.8	35.0	15.0
<i>m = 9 кг</i>												
3	45	5	3.0	20	$4.5 \cdot 10^4$	6.5	21.4	80	16.0	16.0	–	16.4
4	45	5	3.0	20	$4.5 \cdot 10^4$	7.1	21.9	85	14.8	20.4	48	18.0
<i>m = 18 кг</i>												
5	50	5	4.50	20	$8.0 \cdot 10^4$	6.0	20.5	72	16.0	16.0	–	27.6
6	50	5	4.50	20	$8.0 \cdot 10^4$	6.8	21.4	84	17.3	24.3	81.0	30.4

Анализ получаемых при расчетах по модели системы с источником постоянного давления результатах показывает, что не во всех случаях они удовлетворительно согласуются с результатами, полученными на физически достоверной модели системы с источником постоянного расхода. Возможно, это связано с нелинейностью модели газожидкостного аккумулятора энергии, использовавшегося при разработке программы [12]. Этот вопрос требует дополнительного исследования и необходимости, в случае более детальной проработки методики, выставления ограничений на входящие в расчетные формулы параметры. Очевидно, что данная методика носит оценочный характер и пригодна для предварительного анализа параметров на этапе эскизного проектирования устройства. Некоторые уточнения в нее можно ввести, учитывая влияние сухого трения в паре «корпус-боек» в площадях камер прямого и обратного хода, а также расход, необходимый для работы распределительного устройства.

**Заключение.** Предложены методика и программа в MathCAD расчета параметров гидроударных систем обратного действия с применением модели системы с источником постоянного расхода. Расчеты нескольких тестовых примеров и сравнение их с результатами, полученными на модели среды с источником постоянного расхода, показали удовлетворительную сходимость. Выявленные различия в результатах требуют дальнейшего анализа разработанной методики, определения области ее применения.

Разработанная методика позволяет производить выбор параметров на начальном эскизном этапе их проектирования. После детальной проработки конструкции гидроударного устройства необходимо имитационное моделирование системы, например, в программе SimulationX [14], с учетом механических и гидравлических потерь, взаимодействия с внешней средой. Однако при хорошей конструктивной проработке гидроударного устройства и минимизации указанных потерь результат расчетов по приведенным формулам может с приемлемой для практики точностью предсказывать его характеристики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1 Gorodilov L V 2005 Mathematical models of hydraulic percussion systems *J Min Sci* vol 41 no 5 pp 475–489.  
 2 Giuffrida A and Laforgia D 2005 Modelling and simulation of a hydraulic breaker *Int J Fluid Power* vol 6 no 2 pp 47–56.  
 3 Ficarella A Giuffrida A and Laforgia D 2006 Numerical investigations on the working cycle of a hydraulic breaker: off-design performance and influence of design parameters *Int J Fluid Power* vol 7 no 3 pp 41–55.  
 4 Yang G Chen L and Huang H 2005 The research of a full hydraulic pressure hydraulic impactor with strike energy and frequency adjusted independently *Proceedings of the 6th International Conference on Fluid Power Transmission and Control*

1 Gorodilov L V 2005 Mathematical models of hydraulic percussion systems *J Min Sci* vol 41 no 5 pp 475–489.  
 2 Giuffrida A and Laforgia D 2005 Modelling and simulation of a hydraulic breaker *Int J Fluid Power* vol 6 no 2 pp 47–56.  
 3 Ficarella A Giuffrida A and Laforgia D 2006 Numerical investigations on the working cycle of a hydraulic breaker: off-design performance and influence of design parameters *Int J Fluid Power* vol 7 no 3 pp 41–55.  
 4 Yang G Chen L and Huang H 2005 The research of a full hydraulic pressure hydraulic impactor with strike energy and frequency adjusted independently *Proceedings of the 6th International Conference on Fluid Power Transmission and Control*

(ICFP-2005) pp 262–265.

5 Yang S Ou Y Guo Y and Wu X 2017 Analysis and Optimization of the Working Parameters of the Impact Mechanism of Hydraulic Rock Drill Based on a Numerical Simulation *Int J Precis Eng Manuf* vol 18 no 7 pp 971–977.

6 Xu Z and Yang G 2016 Modeling and Simulation of Hydraulic Hammer for Sleeve Valve *Engineering* vol 08 no 09 pp 657–668.

7 Lazutkin S L and Lazutkina N A 2015 Perspective construction of hydraulic impact device *International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2015) Procedia Engineering* 129 pp 403 – 407.

8 Dae-Kyung N Young-Ky K Jae-Sang C and Joo-Sup J 2016 Case study on impact performance optimization of hydraulic breakers *Springerplus* vol 5:1102.

9 Ma W Geng X Jia C Gao L Liu Y and Tian X 2019 Percussion characteristic analysis for hydraulic rock drill with no constant-pressurized chamber through numerical simulation and experiment *Adv Mech Eng* vol 11 no 4 pp 1–11.

10 Жуков И. А., Корчуганов В. А., Жукова Е. В. 2019 Постановка задач рационализации геометрических параметров ударного узла гидравлического молота *Транспортное, горное и строительное машиностроение наука и производство* no 4 pp 7–11.

11 Xing H Z Zhang Q B Ruan D Dehhoda S Lu G X and Zhao J 2018 Full-field measurement and fracture characterisations of rocks under dynamic loads using high-speed three-dimensional digital image correlation *Int J Impact Eng* vol 113.

12 Gorodilov L V Vagin D V and Rasputina T B 2017 Development of the Procedure, Algorithm and Program to Select Basic Parameters of Hydraulic Percussion Systems *J Min Sci* vol 53 no 5 pp 855–860.

13 Landau L D and Lifshitz E M 1976, *Mechanics vol 1 Course of Theoretical Physics Ser.*

14 Modeling and Simulation of Technical Systems|ESI ITI 2019 [Online] Available: <https://www.simulationx.com/>.

(ICFP-2005) pp 262–265.

5 Yang S Ou Y Guo Y and Wu X 2017 Analysis and Optimization of the Working Parameters of the Impact Mechanism of Hydraulic Rock Drill Based on a Numerical Simulation *Int J Precis Eng Manuf* vol 18 no 7 pp 971–977.

6 Xu Z and Yang G 2016 Modeling and Simulation of Hydraulic Hammer for Sleeve Valve *Engineering* vol 08 no 09 pp 657–668.

7 Lazutkin S L and Lazutkina N A 2015 Perspective construction of hydraulic impact device *International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2015) Procedia Engineering* 129 pp 403 – 407.

8 Dae-Kyung N Young-Ky K Jae-Sang C and Joo-Sup J 2016 Case study on impact performance optimization of hydraulic breakers *Springerplus* vol 5:1102.

9 Ma W Geng X Jia C Gao L Liu Y and Tian X 2019 Percussion characteristic analysis for hydraulic rock drill with no constant-pressurized chamber through numerical simulation and experiment *Adv Mech Eng* vol 11 no 4 pp 1–11.

10 I.A. Zhukov, V.A. Korchuganov, E.V. Zhukova. 2019. Statement of problems of rationalizing the geometric parameters of the impact unit of a hydraulic hammer. *Transport, mining and construction engineering science and production*. No. 4, pp. 7–11.

11 Xing H Z Zhang Q B Ruan D Dehhoda S Lu G X and Zhao J 2018 Full-field measurement and fracture characterisations of rocks under dynamic loads using high-speed three-dimensional digital image correlation *Int J Impact Eng* vol 113.

12 Gorodilov L V Vagin D V and Rasputina T B 2017 Development of the Procedure, Algorithm and Program to Select Basic Parameters of Hydraulic Percussion Systems *J Min Sci* vol 53 no 5 pp 855–860.

13 Landau L D and Lifshitz E M 1976, *Mechanics vol 1 Course of Theoretical Physics Ser.*

14 Modeling and Simulation of Technical Systems|ESI ITI 2019 [Online] Available: <https://www.simulationx.com/>.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:**

*дноуглубление, гидроударное устройство, параметры, методика, программа расчета*

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:**

*Городилов Леонид Владимирович, докт. техн. наук, заведующий лабораторией ИГД им. Н.А. Чинакала СО РАН*

**ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:**

*630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»  
630091, г. Новосибирск, ул. Красный проспект, 54, ИГД им. Н.А. Чинакала СО РАН*

## ПОСТАНОВКА ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ ПЛАВАНИЯ НА ВОЛНЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАЧКИ СУДНА

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

В.И. Сичкарёв, В.П. Умрихин

### STATEMENT OF THE OPTIMIZATION PROBLEM OF SAILING ON WAVES USING THE AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTIC OF THE SHIP'S ROLL

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia

Viktor I. Sichkarev (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of SSUWT)

Viktor P. Umrikhin (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)

**ABSTRACT:** Calculation of the side roll of the vessel according to the given amplitude-frequency characteristic of the vessel and the wave spectrum. A specific algorithm is formulated for taking into account the Doppler shift of wave frequencies during vessel movement. The pitching spectrum is constructed and the amplitudes of the spectral maxima are determined for various parameters of the vessel's motion. An approach to the formulation of the swimming optimization problem is given taking into account an additional limitation on the pitch amplitude.

**Keywords:** on-board pitch spectrum, algorithm for taking into account apparent frequencies, amplitude of the spectral maximums of the pitch, optimization with restrictions on pitch amplitude

Расчет бортовой качки судна по заданной амплитудно-частотной характеристике судна и спектру волнения. Сформулирован конкретный алгоритм учёта доплеровского смещения частот волн при движении судна. Построен спектр качки и определены амплитуды спектральных максимумов для различных параметров движения судна. Дан подход к постановке задачи оптимизации плавания с учетом дополнительного ограничения на амплитуду основного тона.

Плавание на волнении представляет собой сложную задачу, содержащую как объективные факторы сложности, так и субъективные. К объективным факторам относятся состав волнения с включением ветрового и нескольких систем зыби от разных направлений; нелинейный характер взаимодействия различных систем волн между собой; нерегулярный характер волнения с включением интерференционных составляющих от различных волновых систем; нелинейный характер качки и взаимовлияние различных видов качки. Всё это проявляется в сложном характере качки всех видов, в том числе бортовой, рис. 1, что при достаточной интенсивности волнения создаёт объективные предпосылки сложности принятия хороших управленческих решений капитаном судна.

К этому следует добавить доминирующую рекомендацию судоводителям по ориентировке в выборе решений при оценке резонансных условий на волны, соответствующие максимуму спектра уклонов волновой поверхности (диаграмма Ремеза), располагая при этом информацией по остойчивости и значением собственного периода качки судна.

В связи с этим возникает вопрос: насколько точным и однозначным будет решение по указанной схеме по сравнению с возможными решениями при использовании наиболее полной информации о реакциях судна в виде амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) качки.

К сожалению, в настоящее время только очень незначительная часть судов оснащены Автоматической системой контроля мореходности (АСКМ), которые соответствуют руководствам и рекомендациям, разработанных ИМО [1] и основными классификационными обществами [2],[3],[4]. Проблема заключается в том, что необходимо учесть очень много факторов в мгновенно изменяющейся обстановке. Вот только некоторые из них:

- параметры волнения. Система мониторинга параметров волнения может осуществляться с помощью судовой РЛС [5] и передаваться в АСКМ. Наиболее известные системы мониторинга параметров морского волнения фирмы Miros Норвегия и «WaMoS II» фирмы OceanWaveS Германия;

- измерители параметров движения судового корпуса. Параметры угловых перемещений судна обычно измеряются гироскопическими устройствами и акселерометрами. В настоящее время это, как правило, совмещенные датчики. Наиболее известный серийно производимый морской прибор «MRU-5» (Motion reference unit) фирмы SIMRAD SEATEX, «LR-86» фирмы Litton, «S-108» фирмы SMC. Авторами использовалась оригинальная модель платы Arduino Rev3, произведённая в Италии. Она сделана на базе микроконтроллера ATmega328p с тактовой частотой 16 МГц, обладает памятью 32 КБ и имеет 20 контролируе-

мых контактов ввода и вывода для взаимодействия с внешним миром и IMU-сенсор на 10 степеней свободы v2, включающий в себя: трёхосевой акселерометр LIS331DLH показывает ускорение относительно собственных осей X, Y и Z. Это помогает определить направление к центру Земли; трёхосевой гироскоп I3G4250D показывает скорость вращения относительно собственных осей X, Y и Z; трёхосевой магнитометр/компас LIS3MDL определяет напряженность магнитного поля относительно собственных осей. Это помогает определить направление на Север; барометр LPS25HB измеряет атмосферное давление и помогает вычислить высоту над уровнем моря [6],[7],[8]. Программное обеспечение было создано авторами самостоятельно на языке C++ [9];

– датчики напряжения корпуса судна, палубы, гребного вала [10];



Рисунок 1 – Гармонический анализ 10-минутной записи бортовой качки судна-контейнеровоза на смешанном ветровом волнении и трёх системах зыби от разных удалённых штормовых зон. Частоты первых 100 гармоник  $m$ : 0.00524 – 0.52360

Для сравнительных оценок выберем конкретный пример с судном типа «Новгород». Основные ТТХ судна в грузу: размерения  $L \times B \times T = 138 \times 20.6 \times 12.0$  м; водоизмещение  $D = 18585$  т; осадка в грузу  $d = 9.28$  м; начальная метацентрическая высота  $h_0 = 0.84$  м; собственный период бортовой качки  $T_c = 18$  с; коэффициент полноты площади ватерлинии  $\alpha = 0.78$ ; скорость полного переднего хода  $v = 18$  узлов.

Амплитудно-частотную характеристику бортовой качки судна зададим в аналитическом виде по упрощённому уравнению, [11]:

$$\Phi_{\omega} = \frac{k_4 \cdot \omega_c^2}{\left[ (\omega_c^2 - \omega)^2 + (2 \cdot \nu_4 \cdot \omega)^2 \right]^{0.5}}, \quad (1)$$

где  $\omega$  – вынужденная частота качки;

$k_4$  – редуцированный коэффициент;

$\omega_c$  – собственная частота бортовой качки судна; при  $T_c = 18$  с;  $\omega_c = 0.349 \text{ с}^{-1}$ ;

$\nu_4$  – коэффициент демпфирования; ориентировочно для указанных условий загрузки  $\nu_4 = 0.035$ .

Вводя обозначения относительных величин частоты и демпфирования

$$\sigma_0 = \frac{\omega}{\omega_c}; \quad \nu_{40} = \frac{\nu_4}{\omega_c}, \quad (2)$$

АЧХ (1) по упрощённому уравнению качки в относительных переменных преобразуется к довольно простому виду:

$$\Phi_{\omega} = \frac{k_4}{\left[ (1 - \sigma_0^2)^2 + (2 \cdot \nu_{40} \cdot \sigma_0)^2 \right]^{0.5}}, \quad (3)$$

Форма АЧХ (3) представлена на рис. 2.

Расчётное выражение АЧХ по (1) с принятыми значениями переменных:

$$\Phi_{\alpha\theta} = \frac{0.2792}{\left[ (0.1218 - \omega^2)^2 + 0.0049 \cdot \omega^2 \right]^{0.5}} \quad (4)$$

В графическом виде АЧХ (4) представлена на рис. 3.

Примем для поставленной задачи, согласно [12], АЧХ  $\Phi_{\xi\theta}$  по уточнённому уравнению качки в виде:

$$\Phi_{\xi\theta} = \frac{\omega^2}{gK_0 \cdot \left[ \left( 1 - \frac{\omega^2}{\omega_c^2} \right)^2 + \frac{4\nu_{44}^2 \omega^2}{\omega_c^4} \right]^{0.5}}, \quad (5)$$

где ввиду неполноты располагаемой авторами проектной документацией по судну приняты весьма приближённые значения коэффициентов демпфирования и редуционного коэффициента:

$$\nu_{44} = 0.737\omega; \quad K_0 = e^{-1.48\omega^2}.$$

Гистограмма АЧХ по уточнённому уравнению качки представлена на рис. 4.

Сравнение полученных АЧХ показывает, что как частотный диапазон, так и максимумы АЧХ существенно зависят от демпфирования качки и введения редуционного коэффициента, поэтому для получения достоверной информации о качке судна необходимо достаточно точное определение этих величин.

Зададимся развитым ветровым волнением, для которого примем частоту максимума спектра по [12] в виде:

$$\omega_m = 1.5 \cdot h_{3\%}^{-0.5} \quad (6)$$

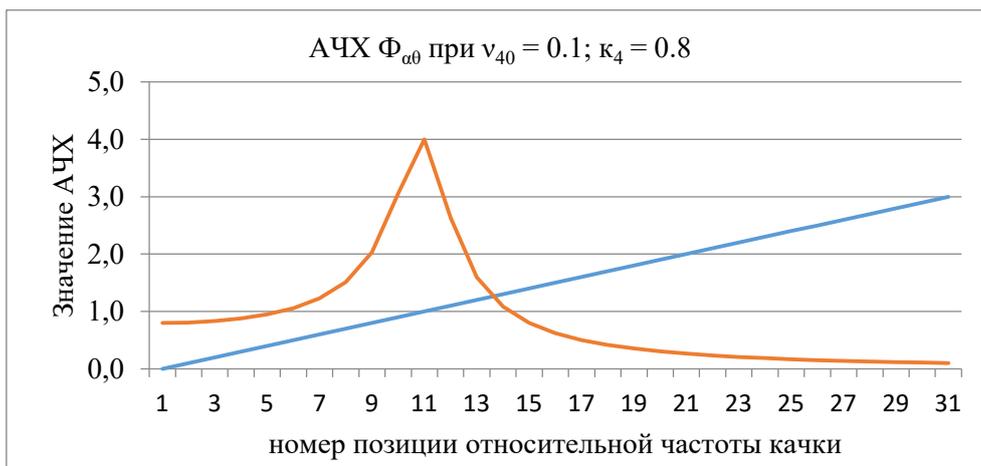


Рисунок 2 – Форма АЧХ  $\Phi_{\alpha\theta}$  бортовой качки в относительных переменных при принятых значениях переменных (—  $\sigma_0$ ; —  $\Phi_{\alpha\theta}$ )

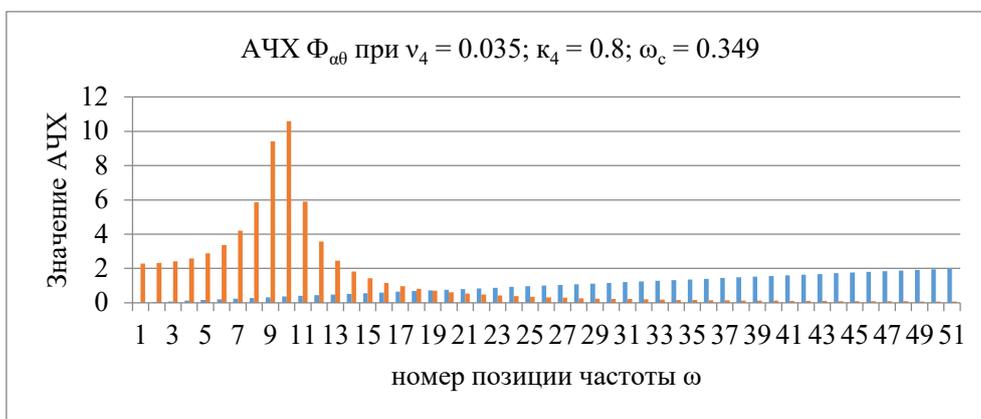


Рисунок 3 – Форма АЧХ бортовой качки в истинных переменных при принятых значениях переменных (—  $\omega$ ; —  $\Phi_{\alpha\theta}$ )

связь средней частоты  $\bar{\omega}$  с частотой максимума спектра  $\omega_m$ , [3],

$$\omega_m = 0.777 \cdot \bar{\omega}, \quad (7)$$

а дисперсию волновых ординат:

$$D_{\xi} = m_0 = 0.0358h_{3\%}^2. \quad (8)$$

Полагая высоту волн  $h_{3\%} = 6$  м (средняя высота волн  $\bar{h} = 2.8$  м), введённые параметры примут следующие значения:

$$\omega_m = 0.61237; \quad \bar{\omega} = 0.78812; \quad m_0 = 1.2888. \quad (9)$$

Частотный спектр примем в форме Ю.А. Нецветаева:

$$S_{\xi}(\omega) = 9.43 \frac{m_0}{\bar{\omega}} \cdot \left(\frac{\omega_m}{\omega}\right)^6 \cdot e^{-1.5\left(\frac{\omega_m}{\omega}\right)^4}. \quad (10)$$

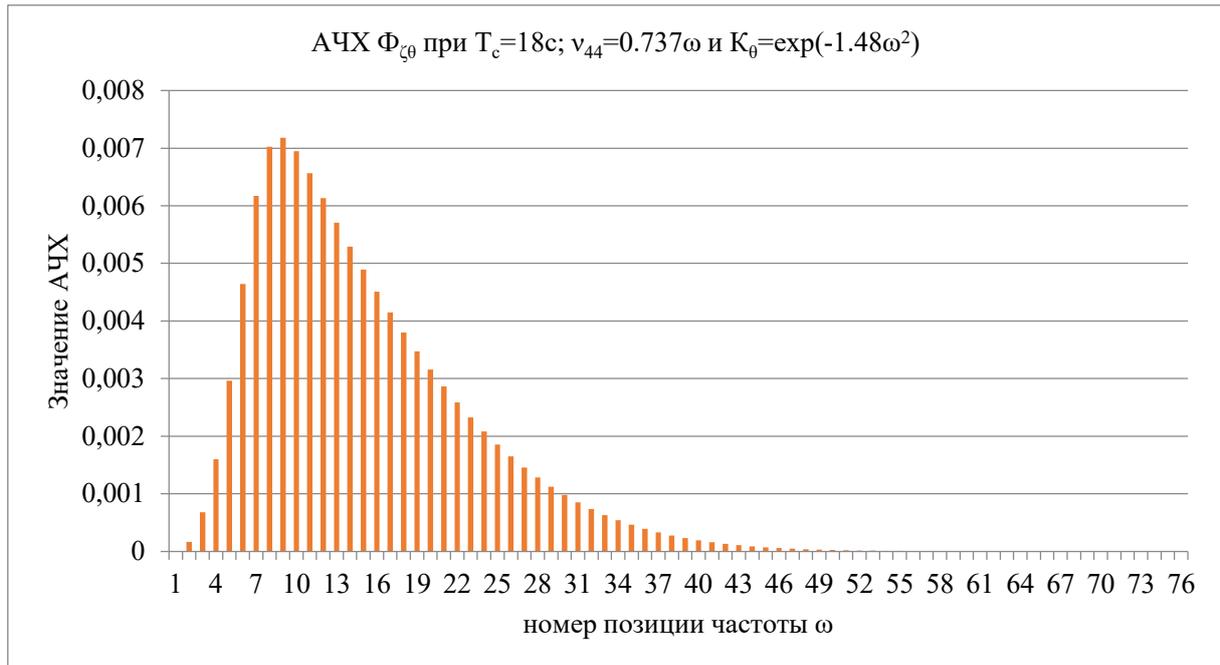


Рисунок 4 – Форма АЧХ бортовой качки  $\Phi_{\xi\theta}$  в истинных переменных при принятых уточнённых значениях переменных  $v_{44} = 0.737\omega$ ;  $K_{\theta} = e^{-1.48\omega^2}$ ;  $k_{\theta} = \frac{2\pi}{T_c} = 0.349\text{с}^{-1}$

$$S_{\xi}(\omega) = 0.81318\omega^6 \cdot e^{-0.91855\omega^4}. \quad (11)$$

В графическом виде частотный спектр представлен на рис. 5.

Если бы судно не имело хода относительно воды и развернулось лагом к волнам, то испытывало бы бортовую качку, параметры которой можно определить по представленным данным.

Согласно теореме Хинчина, спектр бортовой качки  $S_{\theta}(\omega)$  определяется произведением квадрата АЧХ на спектр волнения:

$$S_{\theta}(\omega) = \Phi_{\xi\theta}^2 \cdot S_{\xi}(\omega). \quad (12)$$

Переход от передаточной функции по углам волнового склона к передаточной функции по ординатам волнения осуществляется по формуле:

$$\Phi_{\xi\theta} = \frac{\omega^2}{g} \cdot \Phi_{\omega\theta}. \quad (13)$$

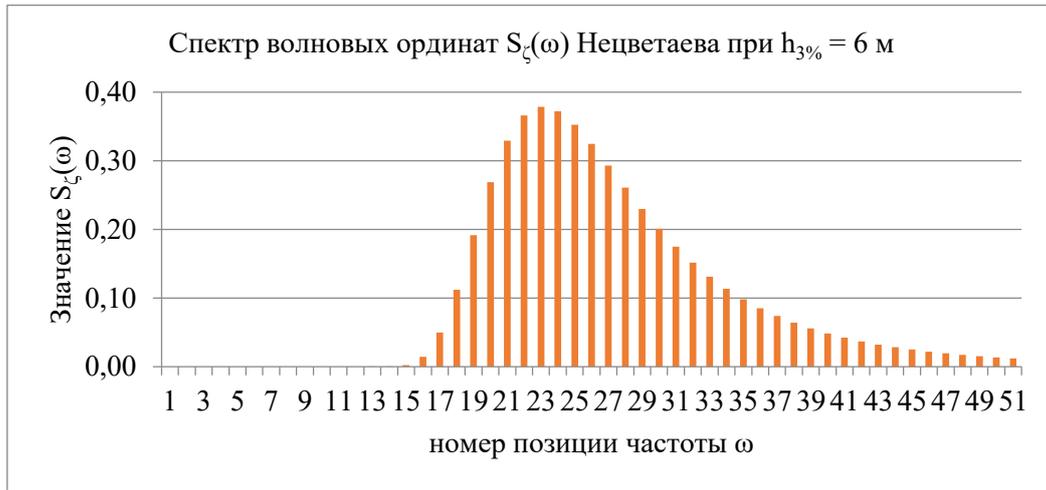


Рисунок 5 – Частотный спектр ветрового волнения по Нецветаеву при  $h_{3\%} = 6$  м с учётом (13, 11, 4) расчётное выражение спектра качки:

$$S_{\theta}(\omega) = \Phi_{\xi\theta}^2 \cdot S_{\xi}(\omega) = \frac{0.000659 \cdot e^{-0.911855 \cdot \omega^4}}{\omega^2 \cdot \left[ (0.1218 - \omega^2)^2 + 0.0049 \cdot \omega^2 \right]} \quad (14)$$

Расчётные значения спектра качки по (14) представлены на рис. 6. Амплитуды углов качки в градусной мере рассчитываются по формуле:

$$\theta^0 = 57.3 \cdot [2 \cdot S_{\theta}(\omega)]^{0.5} \quad (15)$$

и представлены на рис. 7.

Применяя к (12) АЧХ по уточнённому уравнению в виде (5) и спектр волновых ординат (11), получаем спектр качки на рис. 8.



Рисунок 6 – Спектр качки судна без хода по (14) на волнении  $h_{3\%} = 6$  м



Рисунок 7 – Амплитуды углов крена судна без хода по спектру (14) с учётом (15) на волнении  $h_{3\%} = 6$  м

При движении судна возникает доплеровское смещение частот качки, в судовождении рассматриваемое как изменение кажущегося периода качки по сравнению с истинным периодом волнения.

Доплеровское смещение частот описывается уравнениями:

$$\omega_k = \frac{\omega}{1 - \frac{v \cdot \omega}{g \cdot \cos(q)}}; \omega_k = \frac{\omega}{1 + \frac{v \cdot \omega}{g \cdot \cos(q)}}, \quad (16)$$

где  $\omega_k$  – кажущаяся частота;

$v$  – скорость судна;

$q$  – курсовой угол волнения ( $q = 0$  при встречном волнении;  $q = 180^\circ$  при попутном волнении).

При этом кажущиеся частоты волнения становятся истинными частотами качки судна.

Следовательно, для расчёта энергетического спектра волнения необходимо использовать истинные частоты  $\omega$ , а значение АЧХ выбирать по кажущейся частоте  $\omega_k$  этой волны.

Это есть специфический алгоритм расчёта спектра качки, когда рассчитанное значение  $S_\zeta(\omega)$  необходимо умножать на  $\Phi_{\xi\theta}^2(\omega_k)$ .



Рисунок 8 – Амплитуды углов крена судна без хода по уточнённому уравнению (5)

$$S_\theta(\omega, \omega_k) = \Phi_{\xi\theta}^2(\omega_k) \cdot S_\xi(\omega). \quad (17)$$

Рассмотрим влияние параметров движения судна на характер его качки. Будем использовать АЧХ с уточнённым уравнением качки (5) и пересчётом её на ординаты волнения по (13), энергетический спектр волнения (11) и спектр качки (12) с учётом специфического алгоритма пересчёта частот в АЧХ по (16) и представлением амплитуд качки по (15) в градусном исчислении. Примем скорость судна  $v = 8,25$  м/с (16 узлов), а курсовые углы  $q$  – в диапазоне ( $0 - 180^\circ$ ), рис. 9 – 15.



Рисунок 9 – Спектр бортовой качки при  $q = 0^\circ$



Рисунок 10 – Спектр бортовой качки при  $q = 30^\circ$



Рисунок 11 – Спектр бортовой качки при  $q = 60^\circ$

Несмотря на то, что амплитуды бортовой качки по указанным выше причинам, очевидно, занижены, соотношение максимумов спектров качки по амплитуде и частоте в этом исследовании выявлено. Так, сравнивая бортовую качку судна без хода (рис.8), расположенного лагом к волне, и движущегося судна со скоростью 16 узлов (рис. 12) и курсовым углом  $q = 90^\circ$ , видно, что амплитуда максимума спектра выросла с  $0.17^\circ$  до  $2.5^\circ$ . С увеличением курсового угла амплитуда максимума спектра увеличивается, что хорошо видно по теневым наложениям спектральных плотностей качки с разными курсовыми углами на рис. 10 – 15. Так, на  $q = 0^\circ \theta_{\max} = 0.36^\circ$ , а на  $q = 180^\circ \theta_{\max} = 3.6^\circ$ , т.е. амплитудный максимум увеличился в 10 раз.

Таким образом, возникает возможность постановки оптимизационной задачи плавания на волнении при наличии каких-либо ограничений по качке судна, что не учитывается в судоводительской практике, обеспеченной только методологией учёта ограничений по резонансной качке, по остойчивости на попутном волнении и по достижимой скорости плавания на волнении.



Рисунок 12 – Спектр бортовой качки при  $q = 90^\circ$

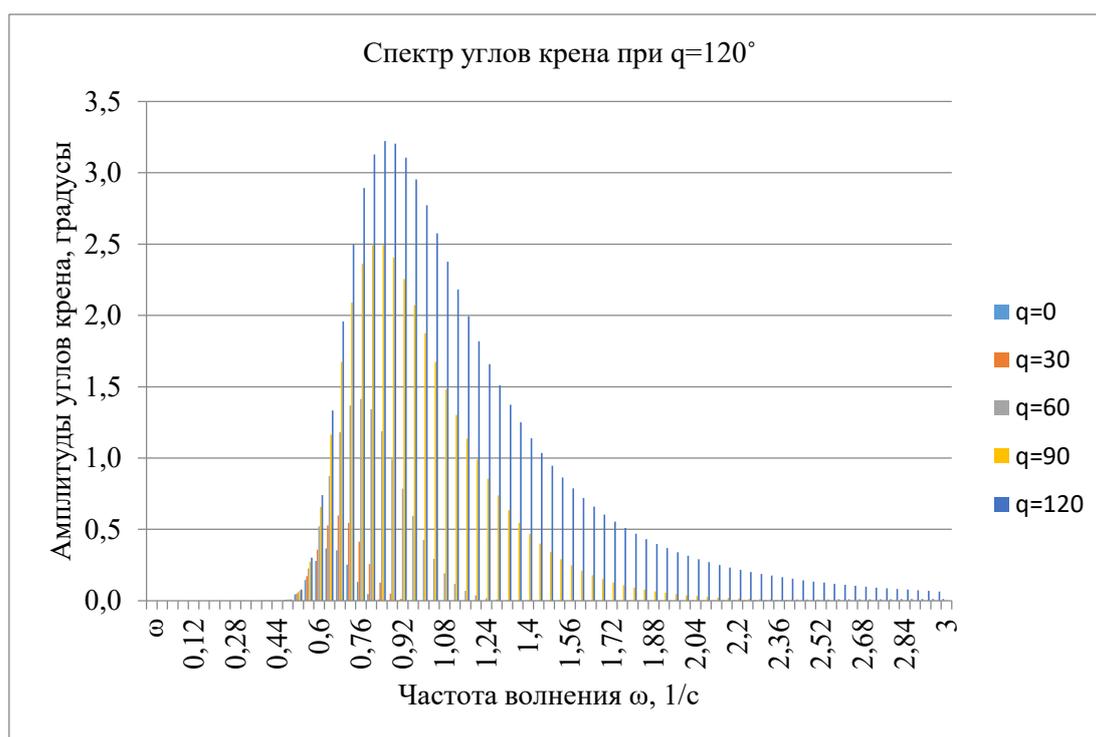


Рисунок 13 – Спектр бортовой качки при  $q = 120^\circ$

1. Пусть имеется ограничение амплитуды предельного угла качки  $\theta_{пр}$ . Это ограничение может возникнуть по разным причинам: смещение сыпучих грузов в трюмах, предельный угол заливания, наличие палубного груза, комфорт пассажиров и т.п.

2. Пусть на каждый срок прогноза имеется заданное по направлению  $K_w$  волнение со спектром  $S_\zeta(\omega)$  и заданное предварительной прокладкой движение судна со скоростью  $V_{зад}$  и курсовым углом  $q_{зад}$  к волнению  $K_w$ .

3. Пусть для судна известна АЧХ в виде (13).

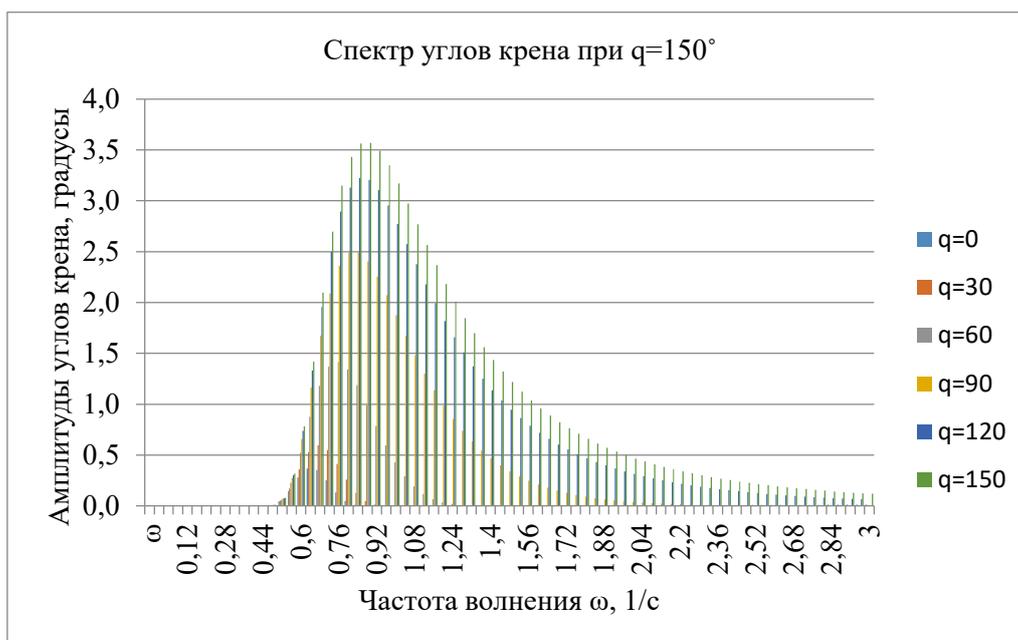


Рисунок 14 – Спектр бортовой качки при  $q = 150^\circ$

4. Тогда, используя (16, 17) и меняя параметры движения  $v$ ,  $q$ , можно получить спектр качки движущегося судна и определить амплитуду  $\theta_{\max}$  максимума спектра качки по (15) для каждого сочетания  $v$ ,  $q$ . При любых параметрах движения  $v$ ,  $q$  должно быть  $\theta_{\max} \leq \theta_{\text{пр}}$ .

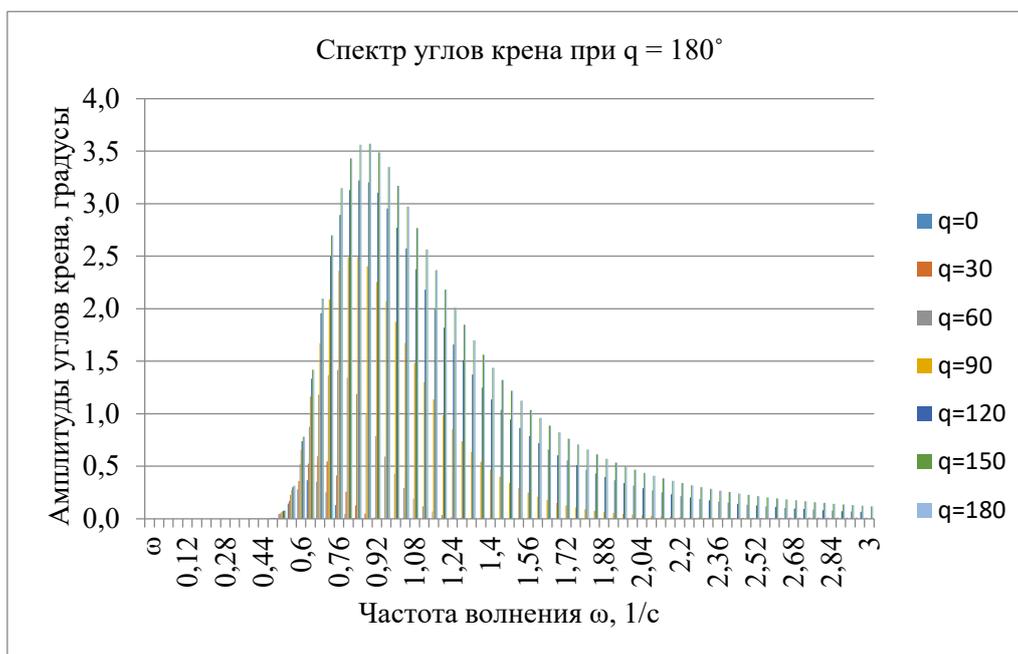


Рисунок 15 – Спектр бортовой качки при  $q = 180^\circ$

5. Если при каких-то параметрах  $v$ ,  $q$   $\theta_{\max} > \theta_{\text{пр}}$ , то движение с этими параметрами  $v$ ,  $q$  невозможно и эти параметры исключаются из массива допустимых.

6. Среди всех допустимых параметров движения  $v$ ,  $q$  выбираются такие, при которых удовлетворяется целевая функция оптимизации рейса, например, минимум времени рейса  $\text{min}T_r$ , что соответствует максимальной проекции вектора скорости на линию пути предварительной прокладки или заданный курсовой угол волнения  $q_{\text{зад}}$ .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1 MSC/Circ. 646 (IMO) 1994 *Recommendations for the fitting of Hull Stress Monitoring Systems*.  
 2 American Bureau of Shipping 2003 *Guide for hull condition monitoring systems*. – 19 pp.

1 MSC/Circ. 646 (IMO) 1994 *Recommendations for the fitting of Hull Stress Monitoring Systems*.  
 2 American Bureau of Shipping 2003 *Guide for hull condition monitoring systems*. – 19 pp.

3 Lloyd's Register of Shipping *Provisional Rules for the Classification of Hull Surveillance Systems SEA and SEA(R) notations*.

4 Maritime and Coastguard Agency (UK). Marine Guidance Note 108(M) 1999 Hull Stress Monitoring Systems.

5 Ziemer F and Günther H 1994 *A system to monitor ocean wave fields* (Proc. 2 nd Int. Conf. On Air-Sea Interaction and Meteorology and Oceanography of the Coastal Zone. Lisboa) pp 22–27.

6 Claudia A 2021 *Arduino Reference: Syntax, Concepts, and Examples - 2nd Edition* (mEm Inc.).

7 Blum J 2013 *Exploring Arduino. Tools and Techniques for Engineering Wizardry* (John Wiley & Sons, Inc., Indianapolis, Indiana).

8 Ozer J, Blemings H 2009 *Practical Arduino: Cool Projects for Open Source Hardware* (Publisher: Apress ISBN: 1430224770, DOI:10.1007/978-1-4302-2478-5).

9 Richard L 2019 *Fundamentals of C++ Programming* (Halterman School of Computing Southern Adventist University).

10 Melle S, Liu K, Measures R 1993 *Practical fiber-optic Bragg grating strain gauge system* (Applied Optics).

11 Ремез Ю В 1983 *Качка корабля* (Ленинград: Судостроение).

12 Маков Ю Л 2007 *Качка корабля* (Калининград: Калининградский государственный технический университет)

13 Бородай И К, Невцветаев Ю А 1982 *Мореходность судов* (Ленинград: Судостроение).

3 Lloyd's Register of Shipping *Provisional Rules for the Classification of Hull Surveillance Systems SEA and SEA(R) notations*.

4 Maritime and Coastguard Agency (UK). Marine Guidance Note 108(M) 1999 Hull Stress Monitoring Systems.

5 Ziemer F and Günther H 1994 *A system to monitor ocean wave fields* (Proc. 2 nd Int. Conf. On Air-Sea Interaction and Meteorology and Oceanography of the Coastal Zone. Lisboa) pp 22–27.

6 Claudia A 2021 *Arduino Reference: Syntax, Concepts, and Examples - 2nd Edition* (mEm Inc.).

7 Blum J 2013 *Exploring Arduino. Tools and Techniques for Engineering Wizardry* (John Wiley & Sons, Inc., Indianapolis, Indiana).

8 Ozer J, Blemings H 2009 *Practical Arduino: Cool Projects for Open Source Hardware* (Publisher: Apress ISBN: 1430224770, DOI:10.1007/978-1-4302-2478-5).

9 Richard L 2019 *Fundamentals of C++ Programming* (Halterman School of Computing Southern Adventist University).

10 Melle S, Liu K, Measures R 1993 *Practical fiber-optic Bragg grating strain gauge system* (Applied Optics).

11 Remez Yu.V. *Rocking of the ship*. Leningrad, Sudostroyeniye Publ. 1983.

12 Makov Yu.L. *Rocking the ship*. Kaliningrad, Kaliningrad State Technical University. 2007.

13 Borodai I.K., Netsvetaev Yu.A. *Seaworthiness of ships*. Leningrad, Sudostroyeniye Publ. 1982.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:**

*бортовой спектр основного тона, алгоритм учета кажущихся частот, амплитуда спектральных максимумов основного тона, оптимизация с ограничениями по амплитуде основного тона*

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

*Сичкарёв Виктор Иванович, докт. техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «СГУВТ»*

*Умрихин Виктор Павлович, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»*

**ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:**

*630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»*

## **ПОЛИНОМИАЛЬНАЯ МАТРИЧНАЯ ДЕКОМПОЗИЦИЯ ДЛЯ СИНТЕЗА УПРАВЛЕНИЯ КОРАБЛЁМ**

**ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»**

**ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»**

**Ю.П. Филюшов, А.А. Воевода, В.Ю. Филюшов**

### **POLYNOMIAL MATRIX DECOMPOSITION FOR A SHIP CONTROL SYSTEM SYNTHESIS**

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia

Novosibirsk State Technical University (NSTU) 20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630092, Russia

**Yuriy P. Filyushov** (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of SSUWT)

**Aleksandr A. Voevoda** (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of NSTU)

**Vladislav Yu. Filyushov** (Graduate student of NSTU)

**ABSTRACT:** The desire to provide higher quality control systems forces the use of advanced synthesis methods. To form control actions, the modern digital control complex can be divided into several interconnected structures. This approach reduces the complex task of managing a digital complex to several simple tasks, each of which is considered separately. On the other hand, while providing a high quality of management, this approach loses the need to consider the problem in a comprehensive manner. The complex calculation of such systems determines the use of new tools. One of these tools is the mathematical apparatus of the polynomial matrix description, which can be used to represent a closed control system. Thanks to this, it is possible to extract the characteristic matrix of a closed system through polynomial matrix equations, the determinant of which contains the poles of a closed system. The paper presents a technique for synthesizing a digital control system, which is reduced to solving a Diophantine equation describing the characteristic matrix of a closed system. The solution is reduced to the analysis of the Diophantine equation in the form of a product of numerical matrices of the coefficients of the controller and the plant. As an illustrative example, an unstable non-square object with a direct connection between the input and the output is chosen, which makes it possible to visually show the synthesis technique and its advantages, in contrast to models of control objects, due to the complexity of which it is difficult to discern the technique. Zero and first order controllers are synthesized. A distinctive feature is the multichannel nature of the controller - the solution is obtained in a matrix form, and not in the form of a set of scalar transfer functions. The zero-order controller provides the specified requirements for the dynamics of processes, and the first-order controller also has astatism. The results obtained can be used for complex adjustment of automation systems and actuators in water transport control systems.

**Keywords:** *polynomial matrix description, multichannel, non-square, synthesis, unstable object, not strictly correct, sylvester matrix, digital systems*

Желание обеспечить более высокое качество систем управления вынуждает использовать продвинутое методы синтеза. Для формирования управляющих воздействий, современный комплекс цифрового управления можно разделить на несколько взаимосвязанных структур. Такой подход сводит сложную задачу управления цифровым комплексом к нескольким простым задачам, каждая из ко-

торых рассматривается отдельно. С другой стороны, обеспечивая высокое качество управления, такой подход требует рассматривать задачу комплексно. Комплексный расчет таких систем определяет использования новых инструментов. Одним из таких инструментов является математический аппарат полиномиального матричного описания, который может использоваться для представления замкнутой системы управления. Благодаря чему удается выделить характеристическую матрицу замкнутой системы через полиномиальные матричные уравнения, определитель которой содержит полюса замкнутой системы.

В работе приведена методика синтеза цифровой системы управления, которая сводится к решению диофантового уравнения, описывающего характеристическую матрицу замкнутой системы. Решение сводится к анализу диофантового уравнения в виде произведения числовых матриц коэффициентов регулятора и объекта. В качестве иллюстративного примера выбран неустойчивый неквадратный объект с прямой связью входа с выходом, который позволяет наглядно показать методику синтеза и ее преимущества, в отличие от моделей объектов управления за сложностью которых трудно разглядеть методику. Синтезированы регуляторы нулевого и первого порядка. Отличительной особенностью является многоканальность регулятора – решение получено в матричном виде, а не в виде совокупности скалярных передаточных функций. Нулевой порядок регулятора обеспечивает заданные требования к динамике процессов, а регулятор первого порядка также обладает и астатизмом. Полученные результаты могут быть использованы для комплексной наладки систем автоматики и исполнительных механизмов в системах управления водным транспортом.

*Введение.* В рамках государственной программы цифровой экономики для водного транспорта важной целью является создание цифровых технологий, способствующих развитию отрасли и, прежде всего, флота. Создание и развитие цифровых систем является приоритетным направлением государственной политики, о чем свидетельствует распоряжение правительства от 28 июля 2017 г. № 1632-р программы «Цифровая экономика Российской Федерации». Реализация этой программы ярко проявляется на современных судах с высоким уровнем автоматизации, когда судоводитель должен принимать решения направленные на удовлетворение множества требований, выдвигаемых эксплуатационной ситуацией (безопасность судоходства, экономия энергоресурсов, экологическая безопасность и т. д.). Современные суда транспортного флота оснащаются бортовыми микропроцессорными системами (МПС) для автоматической прокладки курса на основе данных лага и гирокомпаса; определения местонахождения судна по сигналам искусственных спутников Земли или радионавигационных станций; решения задач удержания судна на заданном курсе; предупреждения столкновения судов в условиях интенсивного движения и (или) плохой видимости. Внедрение на судах новых технических средств все в большей степени характеризуется переходом от автоматизации систем регулирования отдельных механизмов, основанных на применении механических регуляторов к микропроцессорным системам управления, позволяющим формировать управляющие воздействия, обеспечивающие качественную работу судового оборудования. Такие задачи основываются на решении дифференциальных уравнений, представляющих математическую модель системы управления [1-3]. Решение таких задач дает возможность контролировать работу отдельных механизмов и оптимизировать режимы потребления электроэнергии, подачи топлива, воздуха, воды и смазочных материалов. Эти системы постоянно следят за состоянием процессов во всех основных устройствах энергетического комплекса, анализируют тенденции в изменении значений интересующих величин и дают рекомендации о предупредительных действиях, если какие-либо показатели рабочих процессов вышли за пределы допустимых значений.

Такие комплексные объекты управления относятся к классу многоканальных. Полиномиальный матричный синтез многоканальных систем основывается на описании объекта управления и регулятора через полиномиальные матрицы [4]. Это описание позволяет представлять многоканальные объекты в удобном для синтеза виде, поэтому методика расчета системы управления, не отличается сложностью и имеет ряд преимуществ. Синтез систем в полиномиальном матричном представлении для квадратных объектов хорошо описан в работах [5–7]. Множество объектов управления имеют неквадратную структуру. Для случая большего количества входов, чем выходов, в работе [8] рассчитан регулятор для правого полиномиального разложения. В работах [9, 10] рассчитан регулятор для объекта с одним входом и двумя выходами. Эти методики подходят для широкого круга представленных проблем, в том числе и для стабилизации режимов работы электроприводов [11-14] и других исполнительных механизмов водного транспорта.

Линейная модель бокового движения высокоманевренного судна на больших углах ата-

ки [15], где угол скольжения, угловая скорость крена, угловая скорость рыскания и угол крена являются выходными величинами, а угол отклонения элеронов и угол отклонения руля направления – входными. Разработку алгоритмов синтеза для такого рода объектов можно найти в работах [16–18]. В рамках настоящей работы рассмотрим некоторые основные понятия, необходимые для полиномиального синтеза неквадратных объектов.

*Постановка задачи.* Задачей исследования ставится синтез системы управления [19], имеющей неквадратную структуру, то есть количество входных воздействий не равно количеству выходных величин. Система управления описана многоканальным объектом  $W_o(s) \in R(s)^{p \times m}$  и регулятором в прямой связи  $W_r(s) \in R(s)^{m \times p}$  (рис. 1).

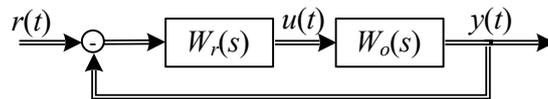


Рисунок 1 – Структурная схема системы управления

Применим полиномиальный матричный метод синтеза, который позволяет представить неквадратную структуру системы управления в удобном виде. Для этой цели получим правое полиномиальное матричное разложение (ПМР) объекта размерностью  $p \times m$  и левое ПМР подчиненного регулятора размерностью  $m \times p$ :

$$W_r(s) = X(s)Y^{-1}(s), \quad W_o(s) = \tilde{D}^{-1}(s)\tilde{N}(s), \quad (1)$$

где  $X(s) \in R[s]^{m \times p}$ ,  $Y(s) \in R[s]^{p \times p}$ ,  $\tilde{N}(s) \in R[s]^{p \times m}$ ,  $\tilde{D}(s) \in R[s]^{p \times p}$ . Задачей синтеза ставится соответствие полюсов замкнутой системы (рис. 1) заданным полюсам, которые задаются решением следующего уравнения

$$\tilde{D}(s)Y(s) + \tilde{N}(s)X(s) = \tilde{C}(s), \quad (2)$$

где  $\tilde{C}(s)$  - характеристическая матрица замкнутой системы, определитель которой содержит все ее полюса. Уравнение такого вида относится к классу диофантовых уравнений [20], где необходимо найти такие две неизвестные матрицы  $X(s)$  и  $Y(s)$ , чтобы их произведение на известные матрицы  $\tilde{D}(s)$  и  $\tilde{N}(s)$  равнялось требуемой  $\tilde{C}(s)$ , форма и порядок которой задается исходя из требований к качеству переходных процессов. Существует множество вариантов решения уравнения (2), в том числе параметризация всех решений этого уравнения, мы же выбрали представление полиномиальных матричных уравнений в виде числовых матриц вида

$$D(s) = D_n s^n + D_{n-1} s^{n-1} + \dots + D_0, \quad (3)$$

где  $n = \deg(D(s))$ . Тогда произведение известных полиномиальных матриц объекта и неизвестных регулятора представляется в виде произведения матрицы Сильвестра и матрицы неизвестных коэффициентов  $\mathfrak{R} = \mathfrak{N}$ , состоящих из

$$\mathfrak{R} = \begin{pmatrix} Y_k \\ Y_{k-1} \\ \dots \\ Y_0 \\ X_k \\ X_{k-1} \\ \dots \\ X_0 \end{pmatrix}, \quad \mathfrak{N} = \begin{pmatrix} D_n & D_{n-1} & \dots & D_0 & 0_1 & \dots & 0_k \\ 0_1 & D_n & \dots & D_1 & D_0 & \dots & 0_k \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0_1 & 0_2 & \dots & D_n & D_{n-1} & \dots & D_0 \\ \hline N_n & N_{n-1} & \dots & N_0 & 0_1 & \dots & 0_k \\ 0_1 & N_n & \dots & N_1 & N_0 & \dots & 0_k \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0_1 & 0_2 & \dots & N_n & N_{n-1} & \dots & N_0 \end{pmatrix}, \quad \mathfrak{N} = \begin{pmatrix} C_{n+k} \\ C_{n+k-1} \\ C_{n+k-2} \\ \dots \\ \dots \\ C_2 \\ C_1 \\ C_0 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где  $k = \deg(Y(s))$ ,  $0_i, i = 1 \dots k$  - нулевые матрицы соответствующих размеров,  $C_i, i = 0 \dots k$  - матрица желаемых коэффициентов характеристической матрицы. Решением этого уравнения является  $\mathfrak{R} = \mathfrak{Z}^{-1}\mathfrak{N}$ , где  $\mathfrak{Z}$  должна быть обратима, т. е. иметь полный ранг и быть квадратной матрицей. В неквадратных системах количество строк и столбцов у матрицы Сильвестра, обычно, не равно, что вынуждает приводить ее к квадратному виду, убирая линейно зависящие строки и столбцы. Вариантов составления наборов из линейно зависимых строк и столбцов может быть несколько, поэтому необходимо убирать такие, чтобы регулятор был правильным и имел наиболее подходящую структуру. В данном варианте разложения объ-

екта и регулятора столбцы матрицы Сильвестра соответствуют строкам матрицы коэффициентов регулятора  $\mathfrak{R}$ , вычеркивание столбца под номером  $i$  из  $\mathfrak{Z}$  соответствует вычеркиванию  $i$  строки из  $\mathfrak{X}$ . Вычеркивание  $i$  строки из  $\mathfrak{Z}$  соответствует вычеркиванию  $i$  строки из  $\mathfrak{N}$ . Матрицы после вычеркивания строк и столбцов обозначим  $\mathfrak{Z}_1, \mathfrak{R}_1, \mathfrak{N}_1$ , тогда решение уравнения (2) будет следующим

$$\mathfrak{R}_1 = \mathfrak{Z}_1^{-1} \mathfrak{N}_1. \quad (5)$$

Передаточная матрица вход системы выход объекта  $W_c(s)$ , выраженная через характеристическую матрицу:

$$W_c(s) = I - Y(s) \tilde{C}^{-1}(s) \tilde{D}(s). \quad (6)$$

Для демонстрации предложенного подхода синтезируем систему управления неустойчивого, неквадратного объекта с  $m = 3, p = 2$ , имеющего прямую связь между входом и выходом (не строго правильный объект). Выбор порядка передаточных функций, входящих в объект, обусловлен тем, что ставится задача показать подход к решению задачи синтеза таких систем, а не решение конкретной проблемы. Объект управления представлен следующей передаточной матрицей

$$W(s) = \begin{pmatrix} \frac{1}{s-1} & 1 & \frac{1}{s-2} \\ 1 & \frac{1}{s-3} & 1 \end{pmatrix}.$$

Получим левое ПМР вынесением общего знаменателя по строкам

$$W(s) = \tilde{D}^{-1}(s) \tilde{N}(s) = \begin{pmatrix} (s-1)(s-2) & 0 \\ 0 & s-3 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} s-2 & (s-1)(s-2) & s-1 \\ s-3 & 1 & s-3 \end{pmatrix},$$

оно взаимно простое, т. к.  $rank(\tilde{D}(s), \tilde{N}(s)) = 2$  при  $s = 1, 2, 3$  (корни  $\tilde{D}(s)$ ) и строчно правильное, т. к. матрица коэффициентов при старших степенях  $\tilde{D}(s)$  имеет полный ранг.

**Результаты.** Синтез для левого полиномиального матричного разложения объекта. Составим матрицы коэффициентов (3) числителя и знаменателя

$$D_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, D_1 = \begin{pmatrix} -3 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, D_0 = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & -3 \end{pmatrix}, N_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, N_1 = \begin{pmatrix} 1 & -3 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}, N_0 = \begin{pmatrix} -2 & 2 & -1 \\ -3 & 1 & -3 \end{pmatrix}.$$

Для регулятора нулевого порядка  $k = 0$  составим матрицу Сильвестра (4)

$$\mathfrak{Z} = \begin{array}{c} \begin{array}{cc|cc} Y_0 & & X_0 & \\ \hline 1 & 0 & 0 & 1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline -3 & 0 & 1 & -3 \\ \hline 0 & 1 & 1 & 0 \\ \hline 2 & 0 & -2 & 2 \\ \hline 0 & -3 & -3 & 1 \end{array} \begin{array}{l} C_2 \\ C_1 \\ C_0 \end{array} \end{array},$$

которая имеет следующую размерность  $cols(\mathfrak{Z}) = 5, rows(\mathfrak{Z}) = 6, rank(\mathfrak{Z}) = 5$ . Видно, что она содержит нулевую строку – вычеркнем ее, что равносильно вычеркиванию второй строки из  $C_2$  матрицы желаемых коэффициентов  $\mathfrak{N}$ . Матрица Сильвестра  $\mathfrak{Z}_1$  имеет полный ранг,  $\mathfrak{R}_1 = \mathfrak{R}$  так как столбцы не вычеркивались. Для удобства задания полюсов характеристическую матрицу замкнутой системы (2) зададим диагонального вида  $\tilde{C}(s) = diag(s^2 + 2s + 1, s + 1)$ , или в виде числовых матриц  $C_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix}, C_1 = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, C_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$  из которых состоит  $\mathfrak{N}_1$ . Подставив полученные матрицы в (5), найдем регуляторы

$$Y(s) = \begin{pmatrix} 1 & -4 \\ -5 & 1 \end{pmatrix}, X(s) = \begin{pmatrix} -4 & 0 \\ 0 & 4 \\ 9 & 0 \end{pmatrix}, W_r(s) = X(s)Y^{-1}(s) = \frac{1}{19} \begin{pmatrix} 4 & 16 \\ -20 & -4 \\ -9 & -36 \end{pmatrix}.$$

Подставив найденные матрицы регулятора в (6), получим следующую передаточную матрицу системы

$$W_{cl}(s) = \begin{pmatrix} \frac{5s-1}{(s+1)^2} & \frac{4s-12}{s+1} \\ \frac{5s^2-15s+10}{(s+1)^2} & \frac{4}{s+1} \end{pmatrix}.$$

Нулевой порядок регулятора (П-регулятор) обеспечивает необходимые полюса замкнутой системы, при этом получены следующие установившиеся значения:  $W_{cl}(0) = (-1 - 12; 10 \ 4)$ . Для достижения заданных значений в установившемся режиме необходимо повысить порядок регулятора и поставить интегратор после регулятора.

Для регулятора первого порядка  $k = 1$  составим матрицу Сильвестра (4)

$$\mathfrak{Z} = \begin{pmatrix} Y_1 & Y_0 & X_1 & X_0 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0 & -0 & -0 & -0 & -0 & -0 & -0 & -0 & -0 \\ \hline -3 & 0 & 1 & 0 & -3 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 2 & 0 & -3 & 0 & -2 & 2 & -1 & 1 & -3 & 1 \\ 0 & -3 & 0 & 1 & -3 & 1 & -3 & 1 & 0 & 1 \\ \hline 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -3 & 0 & 0 & 0 & -3 & 1 & -3 \end{pmatrix} \begin{matrix} C_3 \\ C_2 \\ C_1 \\ C_0 \end{matrix}$$

которая имеет следующую размерность  $cols(\mathfrak{Z}) = 10$ ,  $rows(\mathfrak{Z}) = 8$ , при этом вторая строка нулевая, тогда для того, чтобы  $\mathfrak{Z}_1$  была квадратной необходимо вычеркнуть три столбца. Столбцы выберем соответствующие  $Y_0$  регулятора и, одной строчки старшего коэффициента числителя, например первой. Новая матрица  $\mathfrak{Z}_1 = (Y_1^T \ X_1^T \ X_0^T)^T$ , где первая строка  $X_1$  нулевая. Выберем  $\tilde{C}(s) = diag(s^3 + 3s^2 + 3s + 1, s^2 + 2s + 1)$ , или в виде числовых матриц  $C_3 = (1 \ 0)$ ,  $C_2 = \begin{pmatrix} 3 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ ,  $C_1 = \begin{pmatrix} 3 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}$ ,  $C_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$  из которых состоит  $\mathfrak{Z}_1$ . Подставив полученные матрицы в (5), найдем регуляторы

$$Y = -\frac{s}{5} \begin{pmatrix} 2 & 27 \\ 51 & -4 \end{pmatrix}, \quad X = \frac{1}{5} \begin{pmatrix} -40 & 0 \\ 7s-21 & 27s-1 \\ 51s+33 & s-2 \end{pmatrix}, \quad W_r = \begin{pmatrix} \frac{32}{277s} & \frac{216}{277s} \\ \frac{27-281s}{277s} & \frac{113-27s}{277s} \\ \frac{-5s-6}{277s} & \frac{-(275s+179)}{277s} \end{pmatrix}.$$

Матричная передаточная функция замкнутой системы с регулятором первого порядка:

$$W_{cl}(s) = \frac{1}{5} \begin{pmatrix} \frac{7s^3 + 9s^2 + 19s + 5}{(s+1)^3} & \frac{27s(s-3)}{(s+1)^2} \\ \frac{51s(s^2 - 3s + 2)}{(s+1)^3} & \frac{s^2 + 22s + 5}{(s+1)^2} \end{pmatrix}.$$

Первый порядок регулятора (ПИ-регулятор) обеспечивает заданные полюса замкнутой системы, а также удовлетворительную статику  $W_{cl}(0) = diag(1, 1)$ . Передаточная матрица замкнутой системы правильная, но не строго правильная. Для ее строгой правильности необходимо рассчитать строго правильный регулятор, который получится при увеличении порядка.

**Выводы.** Рассмотрен способ расчета регулятора для многоканального объекта, имеющего неравное количество входных воздействий и выходных величин. Полиномиальный матричный метод синтеза позволяет не только задавать динамику процессов, но и статику, путем формирования структуры регулятора. В случае  $k = 1$  задана такая форма регулятора, чтобы он содержал интегратор для обеспечения астатизма по входному воздействию. Регулятор нулевого порядка обеспечивает заданную динамику процессов. Решение уравнения (5), а также учет свойств замкнутой системы (6) позволяет добиться параметризации всех решений, т. е. всех регуляторов соответствующих заданной характеристической матрице  $S(s)$ . Такое общее решение не всегда удобно для синтеза, но позволяет при должном ана-

лизе свойств замкнутой системы добиться положительных результатов. Также такой подход можно применить и к системам, имеющим меньшее количество входов по сравнению с выходами, например, к электроприводу установок водного транспорта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

- 1 Chen C.T. Linear system theory and design. – 2nd ed. – New York: Oxford University Press, 1999. – 334 p.
- 2 Vidyasagar M. Control system synthesis: a factorization approach. Pt. 1. – San Rafael, CA: Morgan and Claypool, 2011. – 184 p.
- 3 Vidyasagar M. Control system synthesis: a factorization approach. Pt. 2. – San Rafael, CA: Morgan and Claypool, 2011. – 227 p.
- 4 Antsaklis P.J., Michel A.N. Linear systems. – New York: McGraw-Hill, 1997. – 670 p.
- 5 Воевода А.А. Чехонадских А.В., Шоба Е.В. Модальный метод синтеза с использованием полиномиального разложения: разделение движений при стабилизации трехмассовой системы // Научный вестник НГТУ. – 2011. – № 2 (43). – С. 39–46.
- 6 Воевода А.А. Стабилизация двухмассовой системы: полиномиальный метод синтеза двухканальной системы // Сборник научных трудов НГТУ. – 2009. – № 4 (58). – С. 121–124.
- 7 Бобобеков К.М. Полиномиальный метод синтеза многоканальных систем посредством перехода к матричному полиномиальному представлению // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2019. – № 1. – С. 7–25.
- 8 Воевода А.А., Бобобеков К.М., Филушов В.Ю. Полиномиальный метод синтеза для объекта с двумя входами и одним выходом // Сборник научных трудов НГТУ. – 2019. – № 3–4 (96). – С. 17–32.
- 9 Шипагин В.И., Воевода А.А. Пример полиномиального синтеза регулятора для объекта с одним входом и двумя выходами // Наука. Технологии. Инновации: сборник научных трудов. – Новосибирск, 2020. – Ч. 1. – С. 84–88.
- 10 Филушов В.Ю. Управление неквадратным объектом полиномиальным методом // Наука. Промышленность. Оборона: труды XXI Всероссийской научно-технической конференции. – Новосибирск, 2020. – Т. 3. – С. 36–40.
- 11 G. M. Simakov, Y. P. Filushov and V. Y. Filushov, "Regulation of energy properties work of asynchronous AC drive," 2016 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE), Novosibirsk, Russia, 2016, pp. 1-1, doi: 10.1109/APEIE.2016.7806968.
- 12 G. M. Simakov, Y. P. Filushov and V. Y. Filushov, "Combined control of an asynchronous machine with squirrel - cage rotor," 2016 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE), Novosibirsk, Russia, 2016, pp. 175-179, doi: 10.1109/APEIE.2016.7807048.
- 13 G. M. Simakov, V. Y. Filushov and Y. P. Filushov. "Asynchronous electric drive control without pre-magnetization," 2017 18th International Conference on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, 2017, pp. 525-528, doi: 10.1109/EDM.2017.7981810.
- 14 Yury P. Filushov, Gennady M. Simakov, Marina A. Pavlova Effective. Work of a Synchron Machine with Different Magnetic Conductivity on Permanent Magnets Excitation. International Ural conference on Grin Unergy / IEEE Catalog Number 261685 – 2020.
- 15 Simakov, G. M. Combined Control of an Asynchronous Machine with Squirrel - Cage Rotor // Yu. R. Filushov, G. M. Simakov, V. Yu. Filushov/13th International Scientific – Technical Conference APEIE – 39281 / IEEE Catalog Number: CFP16471 – PRT, 2016, Vol.403, pp. 175 – 179.
- 16 Буков В.Н., Рябченко В. Вложение систем. Синтез регуляторов // Автоматика и телемеханика. – 2000. – № 7. – С. 3–14.
- 17 Буков В.Н. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2006. – № 3. – С. 41–48.
- 18 Буков В.Н., Косьянчук В.В., Рябченко В.Н. Вложение систем. Полиномиальные уравнения // Автоматика и телемеханика. – 2002. – № 7. – С. 12–23.
- 19 Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т. 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные си-

- 1 Chen C.T. Linear system theory and design. - 2nd ed. - New York: Oxford University Press, 1999. - 334 p.
- 2 Vidyasagar M. Control system synthesis: a factorization approach. Pt. 1. - San Rafael, CA: Morgan and Claypool, 2011. - 184 p.
- 3 Vidyasagar M. Control system synthesis: a factorization approach. Pt. 2. - San Rafael, CA: Morgan and Claypool, 2011. - 227 p.
- 4 Antsaklis P.J., Michel A.N. Linear systems. - New York: McGraw-Hill, 1997. - 670 p.
- 5 Voevoda A.A. Chekhonadskikh A.V., Shoba E.V. Modal synthesis method using polynomial expansion: separation of motions during stabilization of a three-mass system // Scientific Bulletin of NSTU. - 2011. - No. 2 (43). – Pp. 39–46.
- 6 Voevoda A.A. Stabilization of a two-mass system: a polynomial method for the synthesis of a two-channel system // Collection of scientific works of NSTU. - 2009. - No. 4 (58). – Pp. 121–124.
- 7 Bobobekov K.M. Polynomial method for the synthesis of multichannel systems through the transition to a matrix polynomial representation // Bulletin of ASTU. Series: Management, Computer Engineering and Informatics. - 2019. - No. 1. - Pp. 7–25.
- 8 Voevoda A.A., Bobobekov K.M., Filyushov V.Yu. Polynomial synthesis method for an object with two inputs and one output // Collection of scientific works of NSTU. - 2019. - No. 3–4 (96). – Pp. 17–32.
- 9 Shipagin V.I., Voevoda A.A. An example of polynomial synthesis of a controller for an object with one input and two outputs // Nauka. Technology. Innovations: collection of scientific papers. - Novosibirsk, 2020. - Part 1. - Pp. 84–88.
- 10 Filyushov V.Yu. Control of a non-square object by a polynomial method // Nauka. Industry. Defense: Proceedings of the XXI All-Russian Scientific and Technical Conference. - Novosibirsk, 2020. - Vol. 3. - Pp. 36–40.
- 11 G. M. Simakov, Y. P. Filushov and V. Y. Filushov, "Regulation of energy properties work of asynchronous AC drive," 2016 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE), Novosibirsk, Russia, 2016, pp. 1-1, doi: 10.1109/APEIE.2016.7806968.
- 12 G. M. Simakov, Y. P. Filushov and V. Y. Filushov, "Combined control of an asynchronous machine with squirrel - cage rotor," 2016 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE), Novosibirsk, Russia, 2016, pp. 175-179, doi: 10.1109/APEIE.2016.7807048.
- 13 G. M. Simakov, V. Y. Filushov and Y. P. Filushov. "Asynchronous electric drive control without pre-magnetization," 2017 18th International Conference on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, 2017, pp. 525-528, doi: 10.1109/EDM.2017.7981810.
- 14 Yury P. Filushov, Gennady M. Simakov, Marina A. Pavlova Effective. Work of a Synchron Machine with Different Magnetic Conductivity on Permanent Magnets Excitation. International Ural conference on Grin Unergy / IEEE Catalog Number 261685 – 2020.
- 15 Simakov, G. M. Combined Control of an Asynchronous Machine with Squirrel - Cage Rotor // Yu. R. Filushov, G. M. Simakov, V. Yu. Filushov/13th International Scientific – Technical Conference APEIE – 39281 / IEEE Catalog Number: CFP16471 – PRT, 2016, Vol. 403, pp. 175-179.
- 16 Bukov V.N., Ryabchenko V. Embedding of systems. Synthesis of regulators // Automation and telemechanics. 2000. No. 7, pp. 3-14.
- 17 Bukov V.N. Analytical approach to the analysis and synthesis of matrix systems // Izvestiya SFU. Technical science. 2006. No. 3, pp. 41-48.
- 18 Bukov V.N., Kosyanchuk V.V., Ryabchenko V.N. Systems investment. Polynomial Equations // Automation and Telemechanics. 2002. No. 7, pp. 12-23.
- 19 Kim D.P. Theory of automatic control. V. 2. Multidimensional, nonlinear, optimal and adaptive systems. – Moscow, Fizmatlit Publ., 2004. 464 p.

стемы. – М.: Физматлит, 2004. – 464 с.

20 Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. – М.: Физматлит, 2010. – 560 с.

20 Gantmakher F.R. Matrix theory. – Moscow, Fizmatlit Publ., 2010. 560 p.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** полиномиальное матричное описание, многоканальный, неквадратный, синтез, неустойчивый объект, не строго правильный, матрица Сильвестра, цифровые системы  
**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:** Филлюшов Юрий Петрович, докт. техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «СГУВТ»  
 Воевода Александр Александрович, докт. техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «НГТУ»  
 Филлюшов Владислав Юрьевич, аспирант ФГБОУ ВО «НГТУ»  
**ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:** 630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»  
 630092, г. Новосибирск, пр. К.Маркса, 20, ФГБОУ ВО «НГТУ»

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАТЕНТА РФ НА ИЗОБРЕТЕНИЕ №2626342 ДЛЯ ОЦИФРОВКИ ГРАФИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ И ПОСТРОЕНИЕ АППРОКСИМАЦИОННЫХ ВЫРАЖЕНИЙ ВЫБОРА ДИАМЕТРА ПРОВОЛОЧНОГО ТУРБУЛИЗАТОРА

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»  
 Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН

П.А. Бимбереков, И.А. Беспалов, А.Е. Грачев, А.В. Ярцев

USING THE RF PATENT FOR INVENTION №2626342 FOR DIGITIZING GRAPHIC DEPENDENCES AND CONSTRUCTING APPROXIMATION EXPRESSIONS FOR CHOOSING THE WIRE TURBULIZER DIAMETER

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia  
 Chinakal Institute of Mining SB RAS (CIM SB RAS) 54, Krasny prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia

Pavel A. Bimberekov (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of SSUWT)

Ivan A. Bespalov (Lab Instructor, Master's Degree of SSUWT)

Alexey E. Grachev (Engineer of CIM SB RAS, Master's Degree of SSUWT)

Andrey V. Yartsev (Lab Instructor, Master's Degree of SSUWT)

**ABSTRACT:** Numerical values of the graphic dependences of the diameter of the wire turbulator on the length of the model have been restored. An approximate analytical expression has been formed, which can be recommended for drawing up programs for planning an experiment in an experimental pool.

**Keywords:** wire turbulator, digitization of graphic dependences, approximation of graphic dependences

Произведено восстановление числовых значений графических зависимостей диаметра проволочного турбулизатора от длины модели. Сформировано аппроксимационное аналитическое выражение, которое может быть рекомендовано для составления программ планирования эксперимента в опытовом бассейне.

Важной частью эксперимента в опытовом бассейне является моделирование потока вокруг модели, обеспечение турбулентного обтекания корпуса, соответствующего натурному судну. Для этого используют специальные турбулизаторы, устанавливаемые в носовой оконечности модели в пролете от первого до второго теоретических шпангоутов. Широко применяются в ходе исследования проволочные турбулизаторы. Выбор диаметра,  $d$ , такого турбулизатора производится по специальным графическим зависимостям, которые могут быть найдены, например, в [1] (рис. 1).

Для упрощения процедуры выбора диаметра проволочного турбулизатора, возможности введения выбора турбулизатора в программу планирования модельного эксперимента желательно иметь аналитические зависимости.

Целью настоящей работы является получение точных цифровых значений зависимости диаметра проволочного турбулизатора от длины модели и числа Фруда в эксперименте путем использования патента РФ на изобретение №2626342 «Способ восстановления данных по графическим зависимостям» [2]. Кроме того, построение аппроксимационных аналитических выражений известных графических зависимостей выбора диаметра проволочного турбулизатора.

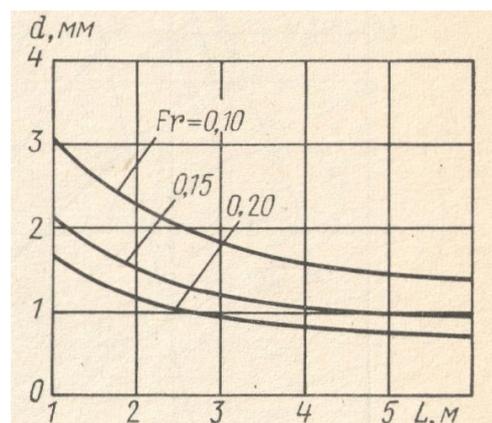


Рисунок 1 – График зависимости диаметра проволочного турбулизатора,  $d$ , от длины модели,  $L$

Суть указанного способа заключается в следующем. Формируется графическое и при этом оцифрованное поле, соответствующее оцифруемым исходным графическим зависимостям. Далее наложением описанного поля поверх оцифруемого изображения, фиксации совпадения точек поля и исходного изображения, приводящего к получению цифровых координат зафиксированных точек.

Для реализации оговоренного способа используем программу Excel. Сохраняем в поле программы исходное изображение (рис. 1), представляющее собой плоскую координатную сетку с осями: ось абсцисс – длина модели; ось ординат – диаметр проволочного турбулизатора; графических зависимостей в указанных осях от разных чисел Фруда. Формируем поле графика Excel с аналогичной сеткой, накладываем график на исходное изображение, совмещаем их сетки и выставляем маркеры программы Excel на графические зависимости исходного графика. При этом автоматически получается цифровые координаты маркеров в цифровых таблицах Excel. Пример использования оговоренных выше процедур приведен на рисунке 2. Для лучшей визуализации наложения поля графика Excel на исходное изображение в сетке поля введена дополнительная разбивка с шагом 0,5 мм. Хорошо видно удовлетворительное совпадение сеток исходного изображения и графика Excel. Следующим шагом были выставлены маркеры на графических зависимостях, с синхронно фиксируемыми Excel цифровыми координатами, приведенными в таблице 1.

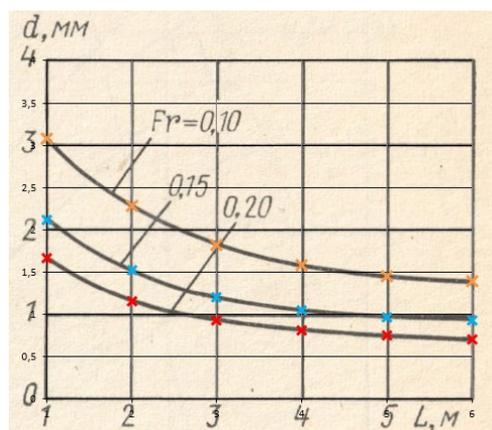


Рисунок 2 – Графическая реализация способа [2]

Таблица 1 – Числовые значения наложенных точек

Длина модели <i>L</i> , м	<i>d</i> , мм		
	<i>Fr</i> = 0,10	<i>Fr</i> = 0,15	<i>Fr</i> = 0,20
1	3,08	2,12	1,67
2	2,288	1,52	1,16
3	1,825	1,2	0,93
4	1,583	1,05	0,817
5	1,45	0,97	0,748
6	1,39	0,935	0,71

По полученным цифровым данным таблицы 1 получаем предварительные полиномиальные аппроксимационные выражения четвертой степени, табулируем значения полиномиальных коэффициентов, аппроксимируем их полиномами второй степени. Затем корректируем значение коэффициентов полиномов с целью получения достаточно близких к искомым зависимостей и значений числовых коэффициентов с сокращенным числом значащих цифр. Результирующие аналитические выражения приведены ниже, а их графическое изображение в сопоставлении с исходными зависимостями на рисунке 3а. На рисунке 3б дан график погрешности полученных аналитических аппроксимационных зависимостей с цифровыми данными исходных графических зависимостей.

$$d = aL^4 + bL^3 + cL^2 + dL + e ,$$

где

$$a = 0,217Fr^2 - 0,0488Fr + 0,00421;$$

$$b = -3,277Fr^2 + 0,7688Fr - 0,08 ;$$

$$c = 18,48Fr^2 - 4,96Fr + 0,6573 ;$$

$$d = -55,5Fr^2 + 19Fr - 2,949 ;$$

$$e = 142Fr^2 - 59,5Fr + 8,903 ,$$

где *Fr* – вынужденная частота качки.

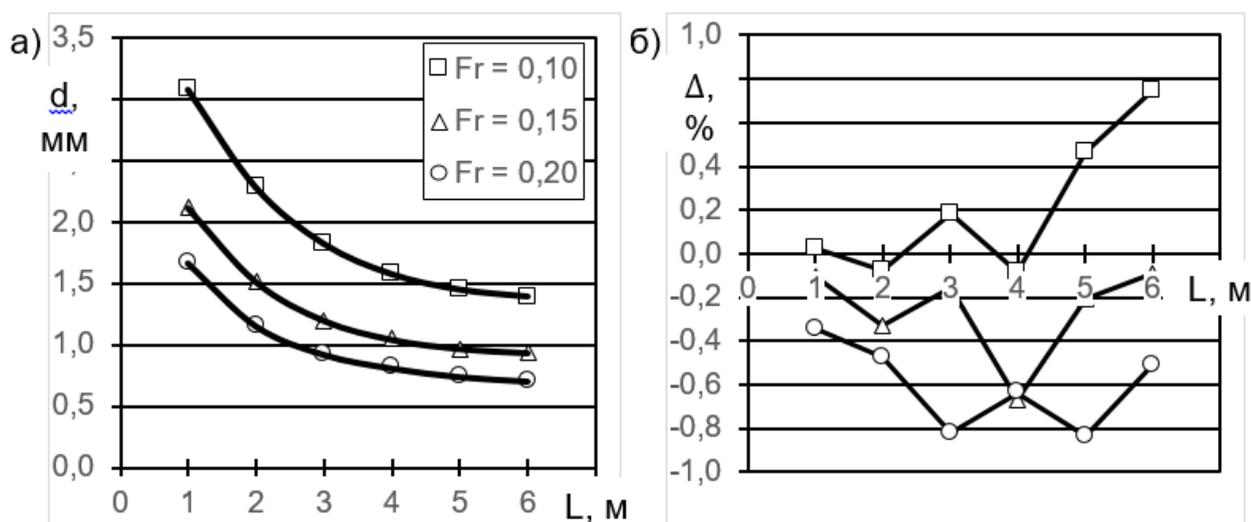


Рисунок 3 – Сопоставление аппроксимационных и исходных зависимостей для определения диаметра проволочного турбулизатора

Точность полученных выражений с максимальной погрешностью  $\pm 0,8\%$  можно считать удовлетворительной.

Полученное аппроксимационное выражение удовлетворительно соответствует восстановленным числовым данным и может послужить составлению расчётных программ на ЭВМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1 Справочник по теории корабля: В трех томах. Том 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители/Под ред. Я. И. Войткунского. — Л.: Судостроение, 1985. — 768 с.

2 Пат. №2626342 Российская Федерация, МПК G 06 F 17/10. Способ восстановления числовых данных по графическим зависимостям / Бимбереков П.А. — №2013117631; заявл. 04.05.2016; опубл. 26.07.2017, Бюл. №21. -2 с.

3 Бимбереков, П.А. Способ восстановления числовых данных по графическим зависимостям и получение аппроксимационных выражений водомётных движителей водоизмещающих судов / П.А. Бимбереков // - Науч. пробл. трансп. Сиб. и Дал. Вост. -2015. -№3. -С. 118-122.

1 Ship Theory Handbook. Ed. by Y. I. Voilkounski. In 3 Volumes. Vol. 1, Hydromechanics, Resistance of Ship, Ship Propulsion Devices. Leningrad. Sudosiroenie Publ. 1985. 768 p.

2 Bimberekov P.A. Method of restoring numerical data by graphical dependences [Sposob vosstanovleniya chislovykh dannykh po graficheskim zavisimostyam] Izobreteniya Poleznye modeli. July 26, 2017. No. 21, 2 p.

3 Bimberekov, P.A. Method of recovery of numerical data on graphic relationships and derivation of approximating expressions for relationships of hydrojet movers of displacement ships [Sposob vosstanovleniya chislovykh dannykh po graficheskim zavisimostyam i polucheniye approksimatsionnykh vyrazheniy dlya zavisimostey vodomotnykh dvizhiteley vodoizmeshchayushchikh sudov]. Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka. 2015. No. 3, pp. 118-122.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: проволочный турбулизатор, оцифровка графических зависимостей, аппроксимация графических зависимостей

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Бимбереков Павел Александрович, докт. техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «СГУВТ»  
 Беспалов Иван Андреевич, учебный мастер, магистрант ФГБОУ ВО «СГУВТ»  
 Грачев Алексей Евгеньевич, инженер ИГД им. Н.А. Чинакала СО РАН, магистрант ФГБОУ ВО «СГУВТ»

Почтовый адрес: Ярцев Андрей Владимирович, учебный мастер, магистрант ФГБОУ ВО «СГУВТ»  
 630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»  
 630091, г. Новосибирск, ул. Красный проспект, 54, ИГД им. Н.А. Чинакала СО РАН

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕТЛЕВЫХ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА FLOW SIMULATION

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

Е.А. Куликова

**RESEARCH OF THE EFFECTIVENESS OF LOOP PROPELLERS USING THE FLOW SIMULATION SOFTWARE**  
Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia  
Ekaterina A. Kulikova (Master's Degree of SSUWT)

**ABSTRACT:** The main issues of the topic of loop propellers, the history of their creation are considered. The characteristic of loop propellers and their efficiency from the point of view of the manufacturer is presented. The study of models of propellers of traditional geometry and with looped blades is described. The factors influencing the results of the study, analysis of their influence are given.

**Keywords:** *loop propeller, testing, efficiency research, SolidWorks, Flow Simulation*

Рассмотрены основные вопросы тематики петлевых винтов, истории их создания. Представлена характеристика петлевых винтов и их эффективности с точки зрения производителя. Описано исследование моделей винтов традиционной геометрии и с петлевыми лопастями. Приведены факторы, влияющие на результаты исследования, анализ их влияния.

За последние десятилетия геометрия и формы лопастей гребных винтов оставались практически неизменными. Однако компания «Sharrow Marine» разработала совершенно другой тип винта, который получил название «петлевой». Такая новинка снабжена своеобразными петлями сложной формы на своей ступице [1, 4].

Инженеры отказались от традиционной лопасти, заменив ее профилированной полосой металла в форме петли, закрепленной на ступице (рисунок 1). По утверждениям изобретателей это в ощутимой степени устранило проблему образования вихрей на кромках лопастей, которые увеличивают сопротивление и расход топлива, создают шум, вибрацию и провоцируют возникновение 1 и 2 стадий кавитации [2].

К идее создания гребного винта с лопастью в виде петли основатель компании пришел в процессе поиска решения проблемы нежелательного шума от летающих дронов-операторов, используемых во время съемок музыкальных клипов.

По мнению автора идеи, изменение показателей эффективности петлевой лопасти даже на один процент, требует обоснованных результатов тестирования. Для этого он объединил усилия с американским порталом и провел тестирование нескольких образцов винтов. Процесс тестирования сводился к фиксации бортовым компьютером показателей оборотов двигателя с холостых до максимальных и расхода топлива для разных типов винтов на одних и тех же оборотах.

Производство опытных образцов и дальнейшие испытания проводились с применением мощностей Лаборатории морской гидродинамики Мичиганского университета (рисунок 2).



Рисунок 1 – Гребные винты: а) – с лопастями традиционной формы; б) – с петлевыми лопастями



Рисунок 2 – Вид сверху на систему впрыска красителя в Лаборатории гидродинамики

Чтобы получить представление о сложном потоке жидкости через винт была разработана усовершенствованная 12-поточковая система визуализации впрыска красителя с помощью высокоскоростной камеры со скоростью 750 кадров в секунду. Система подкрашивает воду тонкой струей краски, съемка ведется на высокоскоростную камеру. Благодаря этому становятся видны потоки воды.

Был зафиксирован большой объем захваченного петлевым винтом потока и большее перемешивание ниже по потоку. Стандартный винт создает концентрированный вихрь на кончике, в то время как петлевой может не иметь его вовсе. Этот вихрь является причиной потерь и источником кавитации (рисунок 3).

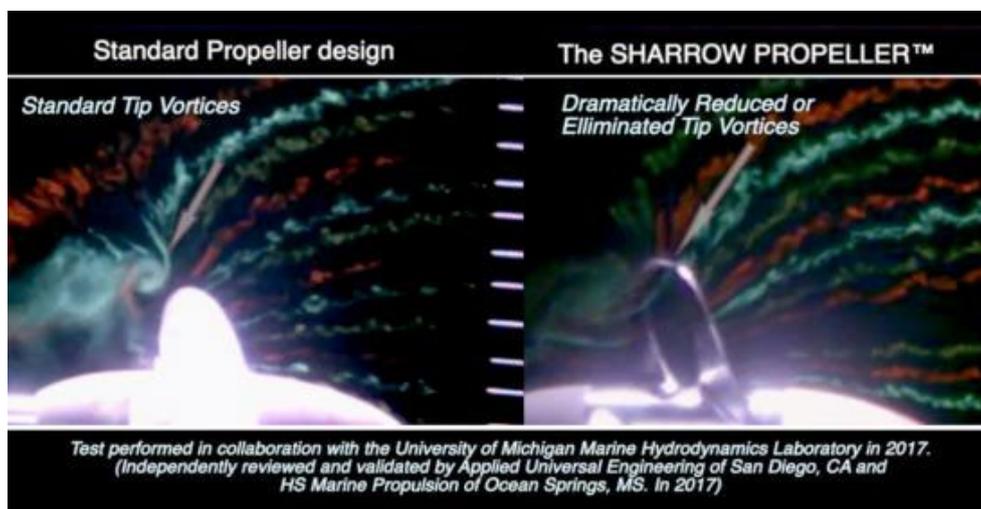


Рисунок 3 – Образование вихря на кончике стандартного гребного винта (слева)

Исходя из результатов таких исследований, был сделан вывод, что петлевой винт позволяет минимизировать кавитацию на 10-15 %, а в диапазоне работы двигателя в 3000 оборотов в минуту достигается его пиковая эффективность в сравнении с трехлопастными винтами [3].

В рамках моего исследования с помощью программы SolidWorks была построена модель винта с лопастями петлевой геометрии диаметром 1 м (рисунок 4).

Модель винта традиционной геометрии была получена с помощью веб-приложения «B-Series Propeller Generator», созданного для винтов серии B (рисунок 5).

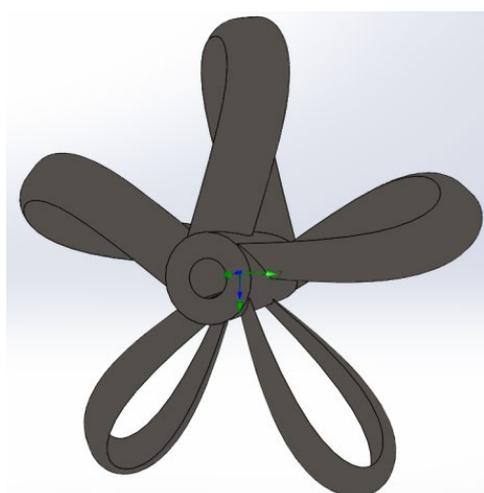


Рисунок 4 – Модель винта с лопастями петлевой геометрии

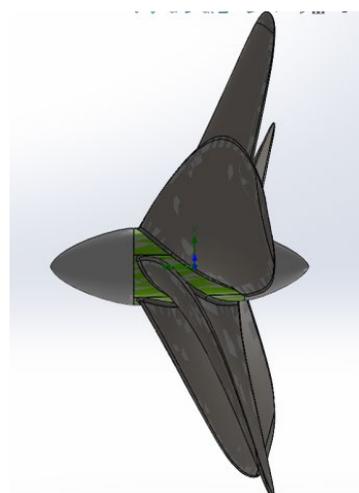


Рисунок 5 – Модель винта с лопастями традиционного типа

Проведено сравнение результатов расчета тяги винта по приложению и с помощью программного комплекса Flow Simulation. Результат расчета с помощью программного комплекса отличается от результата, полученного приложением, на 4%.

Траектории потока вокруг винта показаны на рисунке 6.

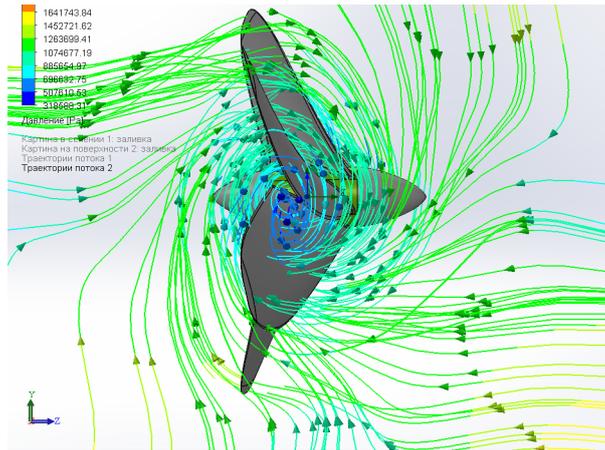


Рисунок 6 – Траектории потока вокруг винта с лопастями традиционного типа

Далее была построена модель петлевого винта с шаговым отношением 1,4. Обтекатель модели строился по схеме с диаграммы винта, где длина обтекателя больше длины ступицы в 1,2 раза (рисунок 7).

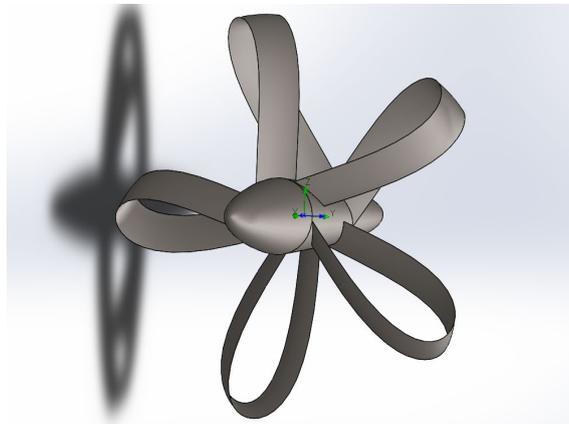


Рисунок 7 – Модель петлевого винта с шаговым отношением 1,4

Результат расчета петлевого винта с помощью программного комплекса Flow Simulation несколько лучше полученного по расчету винта традиционной геометрии. Наблюдается увеличение тяги винта в пределах 5%. Также можно отметить, что на результат расчета влияет форма обтекателя винта.

Траектории потока показаны на рисунке 8.

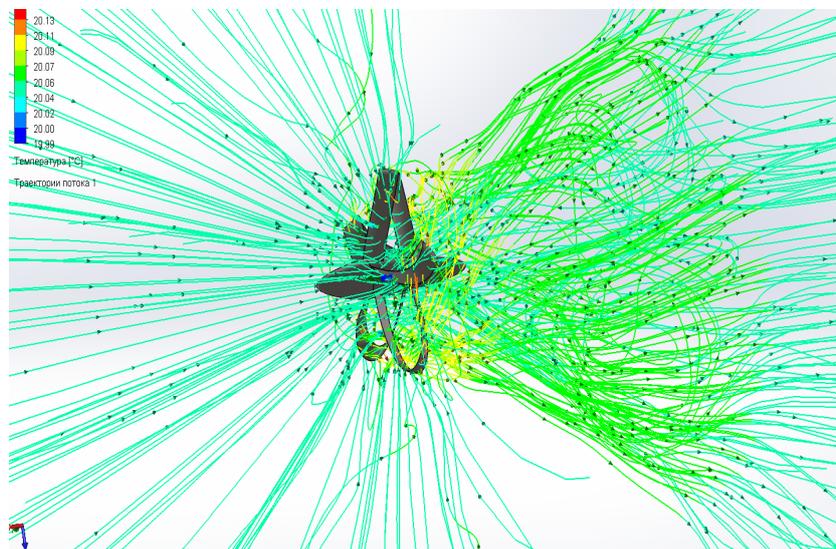


Рисунок 8 – Траектории потока вокруг петлевого винта

После изменения профиля сечения лопасти петлевого винта, за счет чего был получен винт со скругленными кромками лопастей, тяга уменьшилась, наблюдалось ухудшение результатов расчета и изменение траекторий потока.

Таким образом, среди факторов, влияющих на результаты исследования можно выделить форму обтекателей и геометрию винтов.

Вероятно, сложно выполненная профилировка внешних и внутренних поверхностей винта поможет снизить трение, зарегулировать движение воды, убирая эффект срыва потоков и завихрений на концах лопастей, что приведет к улучшению результатов, получаемых при расчетах.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ****REFERENCES**

1 Новинка: петлевой гребной винт эффективнее классики на 9 – 15% - Режим доступа: <https://fish360.ru/lodki-i-motory/petlevoj-grebnij-vint-sharrow/>.

2 Официальный сайт производителя петлевых гребных винтов - Режим доступа: <https://www.sharrowmarine.com>.

3 Результаты тестирования винтов для подвесного лодочного мотора - Режим доступа: <https://boattest.com/Sharrow-Propeller>.

4 Патент «Лопастный винт» - Опубликовано: 2021.02.02 – Режим доступа: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2742113C2\\_20210202](https://yandex.ru/patents/doc/RU2742113C2_20210202).

1 New: the loop propeller is 9-15% more efficient than the classics. URL: <https://fish360.ru/lodki-i-motory/petlevoj-grebnij-vint-sharrow/>.

2 Loop propeller manufacturer's official website. URL: <https://www.sharrowmarine.com>.

3 Outboard Propeller Test Results. URL: <https://boattest.com/Sharrow-Propeller>.

4 Patent "Blade propeller". Published: 2021.02.02. URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2742113C2\\_20210202](https://yandex.ru/patents/doc/RU2742113C2_20210202).

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *петлевой винт, тестирование, исследование эффективности, SolidWorks, Flow Simulation*

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:** *Куликова Екатерина Александровна, магистрант ФГБОУ ВО «СГУВТ»*

**ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:** *630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»*

---

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ПУТИ СНИЖЕНИЯ ИЗНАШИВАНИЯ ПОРШНЕВЫХ КАНАВОК АЛЮМИНИЕВЫХ ПОРШНЕЙ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

А.В. Мукасеев

**RESTORATION AND WAYS OF REDUCING WEAR OF PISTON GROOVES OF ALUMINUM PISTONS OF MARINE DIESEL**  
Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia  
Aleksandr V. Mukaseev (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)

**ABSTRACT:** The magnitude of the work of ship engines is directly affected by physical phenomena that create a wear problem due to the action of friction forces. That is why every shipbuilder is trying to reduce the harmful effects of such forces, but so far it has not been possible to completely eliminate this factor.

**Keywords:** forcing, engine, heat stress, thermomonitoring, control, temperature

На величину работы судовых двигателей непосредственно влияют физические явления, которые создают проблему износа, вследствие действия сил трения. Именно поэтому каждый судостроитель пытается уменьшить вредное воздействие таких сил, но полностью устранить этот фактор пока что не удалось.

В процессе эксплуатации судового дизеля наибольшему интенсивному изнашиванию в первую очередь подвержены детали цилиндропоршневой группы (ЦПГ), что отрицательно влияет на его работу [1-3].

Наиболее нагруженной деталью ЦПГ в процессе эксплуатации судового двигателя внутреннего сгорания (СДВС) является поршень [9, 10]. Наиболее часто в процессе эксплуатации СДВС у поршня нарушаются геометрические размеры верхней поршневой канавки, так как сопряжение «верхняя поршневая канавка – поршневое кольцо» изнашивается наиболее интенсивно [10].

На практике для снижения интенсивности изнашивания поршней СДВС используют термообработку, вставки из износостойкого материала, упрочняющие покрытия и ряд других мероприятий. Их применение, как правило, ограничивается сложностью и высокой стоимостью необходимого оборудования, увеличением массы и изменением геометрических параметров поршня [4-8].

Одним из эффективных для восстановления и снижения интенсивности изнашивания поршней является способ, состоявший из следующих этапов:

Изготавливается стальная втулка, размеры которой выполнены так, чтобы она плотно прилегала к поршню в области ниже поршневых колец. В зоне последних допускается зазор между стенками втулки и поршнем 2-3 мм.

В поршневые канавки, подлежащие деформации, устанавливаются кольца-калибры (полукольца). Они обеспечивают фиксирование размеров поршневых канавок во время операции восстановления.

В отверстие для поршневого пальца устанавливается калибровочный палец, который предотвращает его деформацию и сохраняет размеры.

На поршень в сборе с калибровочными кольцами и калибровочным пальцем устанавливается нагреватель индукционного типа (рис. 1), с помощью которого происходит нагрев зоны поршня, подлежащей деформации. Верхняя часть поршня нагревается до температуры закалки материала поршня.

После прогрева верхней части поршня индукционный нагреватель снимается, а поршень устанавливается в направляющую втулку.

Сверху на поршень устанавливают направляющую для деформируемой части доньшка.



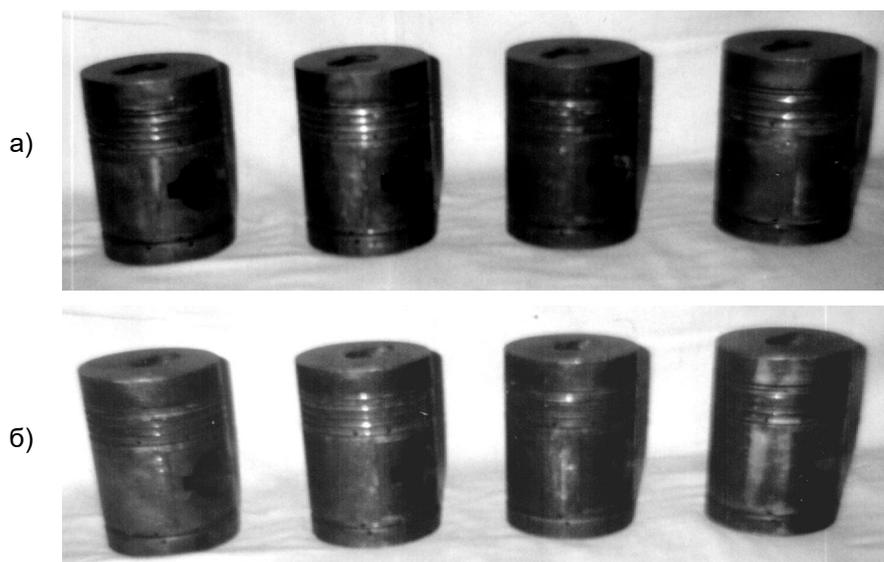
Рисунок 1 – Поршень дизеля NVD26A-3 в индукционном нагревателе: 1 – поршень; 2 – индукционный нагреватель

После чего ставят под пресс и давят на нее до тех пор, пока изношенные поршневые канавки полностью не прижмутся к кольцам-калибрам. Специальные обмеры, проведенные после деформации поршня, показывают, что его внутренние размеры остаются неизменными.

Зону доньшка поршня, освободившуюся от сплава после деформации, наплавляют с помощью ручной аргонно-дуговой сварки алюминиевой сварочной проволокой СВ АК 5 ГОСТ 7871-75. Перед наплавкой задан предварительный подогрев поршня до температуры 250-300 °С. После наплавки для снятия напряжений осуществлялся отпуск материала поршня в печи при температуре 200 °С в течение трех часов.

После всех вышеперечисленных операций поршень обрабатывают до чертежных размеров на токарном станке. При необходимости обрабатывают и отверстие под поршневой палец

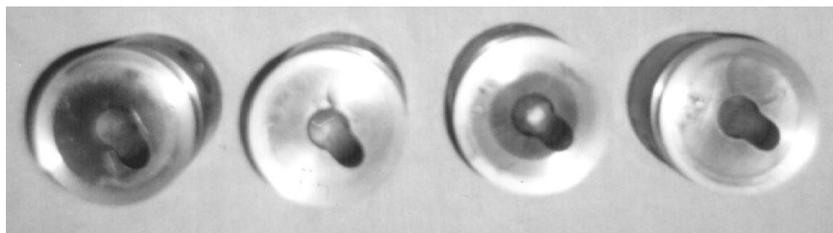
На рисунке 2–4 показаны бывшие в эксплуатации и восстановленные комбинированным методом поршни дизеля 4Ч10,5/13.



*Рисунок 2 – Алюминиевые поршни дизеля 4Ч10,5/13 бывшие в эксплуатации*



*Рисунок 3 – Восстановленные алюминиевые поршни дизеля 4Ч10,5/13*



*Рисунок 4 – Восстановленные алюминиевые поршни дизеля 4Ч10,5/13 (вид сверху)*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

- 1 Авторское свидетельство №1234147 СССР. Способ восстановления деталей /Д.А.Цакун, А.М.Ищенко, М.С.Куприянов.
- 2 Авторское свидетельство №1339002 СССР. Способ восстановления цилиндрических деталей. /Ф.Я.Рудик, В.И.Сухоруков, Б.С.Хохлов, А.Л.Шашкин, А.И.Есин.
- 3 Авторское свидетельство №1433739 СССР. Способ восстановления изношенных поверхностей деталей машин. /Н.С.Юдин, В.С.Ибрагимов.
- 4 Агафонов Е.А. «Исследование температурного поля в стенках рабочего цилиндра двигателя». Отчет ЦНИДИ, №6. 1935.
- 5 Альтман М.Б., Стромская Н.П. Повышение свойств стандартных литейных алюминиевых сплавов. – М.: Metallurgy, 1984.
- 6 Алюминий. Metallovedenie, obrabotka i primeneniye aluminievyykh spлавov. Пер с англ./Под ред. Туманова А.Т., Квасова Ф.И., Фридляндера И.Н. – М.: Metallurgiya. 1972.
- 7 Алюминий: свойства и физическое металловедение: Справ. изд. Пер. с англ./Под ред. Хэтча Дж.Е. – М.: Metallurgiya, 1989.
- 8 Петров Д.А. Вопросы теории сплавов алюминия. Metallurgizdat, 1951.
- 9 Петровский Н.В. Современные проблемы судового отечественного дизелестроения. «Судостроение», №1, 1963.
- 10 Петровский Н.В. Судовые двигатели внутреннего сгорания и их эксплуатация. М., «Транспорт», 1966.

- 1 Copyright certificate No. 1234147 USSR. The method of restoring parts / D.A. Tsakun, A.M. Ishchenko, M.S. Kupriyanov.
- 2 Copyright certificate No. 1339002 USSR. A method for restoring cylindrical parts. /F.Ya.Rudik, V.I.Sukhorukov, B.S.Khokhlov, A.L.Shashkin, A.I.Esin.
- 3 Copyright certificate No. 1433739 USSR. A method for restoring worn surfaces of machine parts. /N.S.Yudin, V.S.Ibragimov.
- 4 Agafonov E.A. "Investigation of the temperature field in the walls of the working cylinder of the engine". Report of TsNI-DI, No. 6. 1935.
- 5 Altman M.B., Stromskaya N.P. Improving the properties of standard cast aluminum alloys. – M.: Metallurgy, 1984.
- 6 Aluminium. Metal science, processing and application of aluminum alloys. Translated from English / Ed. Tumanova A.T., Kvasova F.I., Fridlyandera I.N. – M.: Metallurgy. 1972.
- 7 Aluminum: properties and physical metallurgy: Ref. ed. Per. from English / Ed. Hatch J.E. – Moscow, Metallurgiya Publ., 1989.
- 8 Petrov D.A. Questions of the theory of aluminum alloys. Metallurgizdat Publ., 1951.
- 9 Petrovsky N.V. Modern problems of domestic ship diesel industry. Sudostroyeniye Publ. No. 1, 1963.
- 10 Petrovsky N.V. Marine internal combustion engines and their operation. Moscow, Transport Publ., 1966.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *износ, поршень, двигатель, термообработка, эксплуатация*  
**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:** *Мукасеев Александр Владимирович, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»*  
**ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:** *630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»*

## О РОЛИ МАТЕМАТИКИ В ФОРМИРОВАНИИ КОМПЕТЕНТНОСТНОГО ПОДХОДА ПРИ ОБУЧЕНИИ СТУДЕНТОВ ФАКУЛЬТЕТА СУДОВОЖДЕНИЯ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

Е.В. Смирнова

IMPORTANCE OF MATHEMATICS IN FORMING OF COMPETENT APPROACH TO EDUCATION STUDENTS FACULTY OF SHIPPING

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia  
Ekaterina V. Smirnova (Ph.D. of Pedagogic Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)

**ABSTRACT:** Full mathematical education is necessary for forming competencies of boatmaster students

**Keywords:** *mathematics, competence-based approach, student navigators*

Формирование компетенций, необходимых судоводителям, требует их комплексной математической подготовки.

Компетентностный подход в современном образовании является в настоящее время важным условием подготовки квалифицированного специалиста. Как в техническом вузе организовать изучение общеобразовательных дисциплин, чтобы они были ориентированы в итоге на формирование компетенций, наличие которых потребуется будущему специалисту? Очевидно, потребуется провести анализ стандартов компетентностей на примере конкретной специальности и провести соответствующую корректировку организации учебного процесса по конкретным преподаваемым дисциплинам.

К примеру, спецификация минимального стандарта компетентности для вахтенных помощников капитана судов валовой вместимостью 500 или более (таблица А-II/1 кодекса ПДНВ, с поправками: Часть А, Глава II – Капитан и палубная команда [1]) при выполнении функции судовождения на уровне эксплуатации предполагает формирование знания, понимания и профессиональных навыков в области мореходной астрономии, а это, в свою очередь, требует математической подготовки по нескольким разделам математики. В частности, необходимо знание основ сферической геометрии, дифференциального исчисления функций нескольких переменных и элементов теории поля, что соответствует следующим разделам рабочей программы по математике: «Функции нескольких переменных», «Аналитическая геометрия в пространстве», «Двойные, тройные и криволинейные интегралы».

Действительно, как мы знаем, положение точки Р пространства в сферических координатах определяется тройкой чисел  $\theta$ ,  $r$ ,  $\varphi$ , где  $r$  – радиус-вектор точки Р,  $\varphi$  – угол между радиус-вектором и осью OZ,  $\theta$  – угол между проекцией радиус-вектора на плоскость OXY и осью OX.

Используя формулы связи прямоугольных декартовых координат со сферическими

$$x = r \sin \varphi \cos \theta; \quad y = r \sin \varphi \sin \theta; \quad z = r \cos \varphi,$$

можно получить формулу якобиана

$$|J| = \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial \theta} & \frac{\partial x}{\partial r} & \frac{\partial x}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta} & \frac{\partial y}{\partial r} & \frac{\partial y}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial z}{\partial \theta} & \frac{\partial z}{\partial r} & \frac{\partial z}{\partial \varphi} \end{vmatrix},$$

который после простых вычислений оказывается равным  $r^2 \sin \varphi$ .

Тем самым, получим формулу тройного интеграла в сферических координатах

$$\iiint_V f(x, y, z) dx dy dz = \iiint_V f(\theta, r, \varphi) r^2 \sin \varphi dr d\theta d\varphi.$$

Как мы видим, даже на примере одной из основных сфер компетентности – планирование и осуществление перехода и определение местоположения – требуется комплексная математическая подготовка будущего специалиста-судоводителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1 ПДНВ. Конвенция ПДНВ и Кодекс ПДНВ, Лондон, |

1 STCW. STCW Convention and STCW Code, London, 2011,

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** математика, компетентностный подход, студенты-судоводители  
**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:** Смирнова Екатерина Викторовна, канд. пед. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»  
**ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:** 630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧКИ ЭКСТРЕМУМА ДЛЯ НЕКОТОРОГО КЛАССА ФУНКЦИЙ, СОДЕРЖАЩИХ РАДИКАЛЫ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

О.Г. Куделин, В.И. Фомин, Е.В. Смирнова

**DETERMINATION OF THE EXTREME POINT FOR A CLASS OF FUNCTIONS CONTAINING RADICALS**  
 Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia  
**Oleg G. Kudelin** (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)  
**Vasilii I. Fomin** (Senior Lecturer of SSUWT)  
**Ekaterina V. Smirnova** (Ph.D. of Pedagogic Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)

**ABSTRACT:** At the junction of two sciences, algebra and vector algebra, a method of finding an extremum point for a function composed of the sum of radicals is worked out.

**Keywords:** function extremum point, sum of radicals, vector algebra

На стыке двух наук, алгебры и векторной алгебры, разработан способ нахождения точки экстремума для функции, составленной из суммы радикалов.

Рассмотрим уравнение, содержащее радикалы, вида:

$$f(x) = \sqrt{x^2 - 12x + 40} + \sqrt{x^2 - 4x + 5}, x \in R, \quad (1)$$

Функция  $f(x)$  после несложных действий принимает форму:

$$f(x) = \sqrt{(6-x)^2 + 2^2} + \sqrt{(x-2)^2 + 1^2},$$

которая

- 1) непрерывно дифференцируема  $\forall x \in R$ ;
- 2)  $\lim_{x \rightarrow \pm\infty} f(x) = +\infty$ .

Следовательно, согласно теореме Лагранжа [1] и её виду заключаем, что

$$\min f(x) = f(x_0),$$

где  $x_0$  – точка экстремума. Требуется определить значения экстремума (1) в точке  $x_0$ .

Определение экстремума по правилам дифференцирования для функции (1) достаточно трудоёмкая работа.

И действительно, сначала определяется производная:

$$f'(x) = \frac{2x-4}{2\sqrt{(x-2)^2+1}} + \frac{2x-12}{2\sqrt{(x-6)^2+4}} = \frac{(2x-4)\sqrt{(x-6)^2+4} + (2x-12)\sqrt{(x-2)^2+1}}{2\sqrt{(x-2)^2+1}\sqrt{(x-6)^2+4}}, \quad (2)$$

затем, приравняв числитель полученного выражения (2) к нулю, решается уравнение (2). Первоначально один из радикалов переносится в правую часть уравнения, а затем обе его части возводятся в квадрат. Далее придётся решать уравнение четвёртой степени.

Ниже предлагается нестандартный подход к определению экстремума функции (1), основанный на применении основных свойств векторного исчисления.

Добавив константу в правую часть (1), а его левую часть заменив на  $g(x)$ , перепишем его в следующем виде

$$g(x) = \sqrt{(6-x)^2 + 2^2} + \sqrt{(x-2)^2 + 1^2} + A, x \in R, A \in R, \quad (3)$$

где  $A$  – константа, при этом  $f'(x) = g'(x), g(x) = 0$ .

Если удастся решить уравнение

$$g(x) = 0, \quad (4)$$

то найденное значение  $x_0$  и будет точкой экстремума функции  $f(x)$ .

Перейдём к процедуре определения решения уравнения (4).

Введём в рассмотрение три вектора  $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ . Согласно представлению (3), их можно снабдить координатами:

$$\bar{a} = \{a_1 = (6 - x), a_2 = 2\} \quad \bar{b} = \{b_1 = (x - 2), b_2 = 1\}. \quad (5)$$

вследствие чего будут выполнены следующие условия:

$$\bar{c} = \bar{a} + \bar{b}, \quad (6)$$

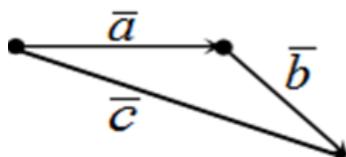
тогда координаты вектора  $\bar{c} = \{c_1, c_2\}$  будут вычисляться по формулам:

$$c_1 = a_1 + b_1, c_2 = a_2 + b_2,$$

и в таком случае

$$c_1 = 4, c_2 = 3 \quad |\bar{c}| = \sqrt{4^2 + 3^2} \geq 5. \quad (7)$$

Согласно выражению (7) для векторов  $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}$  должно выполняться неравенство треугольника (см. рис. 1).

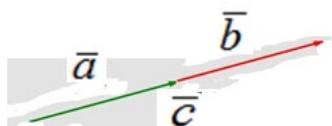


*Рисунок 1 – Расположение векторов в треугольнике*

Однако, если предположить, что будет выполнено условие

$$|\bar{c}| = 5, \quad (8)$$

то векторы  $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}$  будут лежать на одной прямой (см. рис. 2). В этой связи можно считать, что  $A = -5$ .



*Рисунок 2 – Расположение векторов  $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}$  на одной прямой*

Векторы  $\bar{a}, \bar{b}$ :

$$\bar{a} = \{a_1 = (6 - x), a_2 = -2\}; \quad \bar{b} = \{b_1 = (x - 2), b_2 = 1\} - \text{коллинеарные } (\bar{a} \parallel \bar{b}).$$

Используя основное свойство коллинеарных векторов [2], получаем уравнение

$$\frac{6 - x_0}{x_0 - 2} = \frac{2}{1},$$

из которого следует решение уравнения (1) в виде

$$x_0 = \frac{10}{3} \Rightarrow \min(f(x_0)) = -5. \quad (9)$$

Полученные значения определяют соответственно значения точки и экстремума функции (1) в этой точке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1 Фихтенгольц, Г.М. Основы математического анализа / Г.М. Фихтенгольц. -СПб: Лань, 2001. -Т.1. -440 с.  
2 Ефимов Н.В. Краткий курс аналитической геометрии. – М.: Наука, 1969 г.

1 Fikhtengol'ts G.M. Mathematical analysis fundamentals [Osnovy matematicheskogo analiza]. St. Petersburg. 2001. Vol. 1. 440 p.  
2 Efimov N.V. A short course in analytic geometry [Kratkiy kurs analiticheskoy geometrii]. Moscow, Nauka Publ., 1969.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:**

*точка экстремума функции, сумма радикалов, векторная алгебра*

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

*Куделин Олег Георгиевич, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»  
Фомин Василий Иванович, старший преподаватель ФГБОУ ВО «СГУВТ»  
Смирнова Екатерина Викторовна, канд. пед. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»*

**ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:**

*630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»*

## СОДЕРЖАНИЕ

### ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

<b>Синицын М.Г., Синицын Г.Я., Масленников С.Н.</b> ОЦЕНКА ТРАНСПОРТНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ВНУТРЕННИХ ВОДНЫХ ПУТЕЙ.....	5
<b>Ефимович А.Ю.</b> ОБЗОР И АНАЛИЗ ТРАНСПОРТНЫХ ПРОИСШЕСТВИЙ, СОВЕРШЕННЫХ В ЛЕНСКОМ БАСЕЙНЕ ЗА ПЕРИОД НАВИГАЦИИ 2017–2021 ГГ. ....	10

### TRANSPORT OPERATION AND ECONOMICS

<b>M.G. Sinitsyn, G.Ya. Sinitsyn, S.N. Maslennikov</b> ASSESSMENT OF TRANSPORT CAPABILITIES OF INLAND WATERWAYS.....	5
<b>A.Yu. Efimovich</b> REVIEW AND ANALYSIS OF TRAFFIC ACCIDENTS COMMITTED IN LENA BASIN FOR THE NAVIGATION PERIOD 2017-2021 .....	10

### ПУТЬ. ПУТЕВОЕ ХОЗЯЙСТВО

<b>Городилов Л.В.</b> МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ГИДРОУДАРНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ДНОУГЛУБИТЕЛЬНЫХ РАБОТ НА ВОДНЫХ ПУТЯХ.....	17
--	----

### INFRASTRUCTURE OF TRANSPORT ROUTES

<b>L.V. Gorodilov</b> METHOD OF CALCULATION OF PARAMETERS OF HYDRAULIC IMPACT DEVICES FOR DREDGING ON WATERWAYS .....	17
---	----

### СУДОВОЖДЕНИЕ

<b>Сичкарёв В.И., Умрихин В.П.</b> ПОСТАНОВКА ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ ПЛАВАНИЯ НА ВОЛНЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АМПЛИТУДНО- ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАЧКИ СУДНА.....	23
<b>Филюшов Ю.П., Воевода А.А., Филюшов В.Ю.</b> ПОЛИНОМИАЛЬНАЯ МАТРИЧНАЯ ДЕКОМПОЗИЦИЯ ДЛЯ СИНТЕЗА УПРАВЛЕНИЯ КОРАБЛЁМ.....	32
<b>Бимбереков П.А., Беспалов И.А., Грачев А.Е., Ярцев А.В.</b> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАТЕНТА РФ НА ИЗОБРЕТЕНИЕ №2626342 ДЛЯ ОЦИФРОВКИ ГРАФИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ И ПОСТРОЕНИЕ АППРОКСИМАЦИОННЫХ ВЫРАЖЕНИЙ ВЫБОРА ДИАМЕТРА ПРОВОЛОЧНОГО ТУРБУЛИЗАТОРА .....	38
<b>Куликова Е.А.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕТЛЕВЫХ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА FLOW SIMULATION.....	41

### MANAGEMENT AND MAINTENANCE OF MEANS OF TRANSPORT

<b>V.I. Sichkarev, V.P. Umrikhin</b> STATEMENT OF THE OPTIMIZATION PROBLEM OF SAILING ON WAVES USING THE AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTIC OF THE SHIP'S ROLL.....	23
<b>Yu.P. Filyushov, A.A. Voevoda, V.Yu. Filyushov</b> POLYNOMIAL MATRIX DECOMPOSITION FOR A SHIP CONTROL SYSTEM SYNTHESIS .....	32
<b>P.A. Bimberekov, I.A. Bespalov, A.E. Grachev, A.V. Yartsev</b> USING THE RF PATENT FOR INVENTION №2626342 FOR DIGITIZING GRAPHIC DEPENDENCES AND CONSTRUCTING APPROXIMATION EXPRESSIONS FOR CHOOSING THE WIRE TURBULIZER DIAMETER.....	38
<b>E.A. Kulikova</b> RESEARCH OF THE EFFECTIVENESS OF LOOP PROPELLERS USING THE FLOW SIMULATION SOFTWARE .....	41

### ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

<b>Мукасеев А.В.</b> ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ПУТИ СНИЖЕНИЯ ИЗНАШИВАНИЯ ПОРШНЕВЫХ КАНАВОК АЛЮМИНИЕВЫХ ПОРШНЕЙ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ.....	45
--	----

### HEAT POWER INDUSTRY

<b>A.V. Mukaseev</b> RESTORATION AND WAYS OF REDUCING WEAR OF PISTON GROOVES OF ALUMINUM PISTONS OF MARINE DIESEL .....	45
---	----

### ТРАНСПОРТНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

<b>Смирнова Е.В.</b> О РОЛИ МАТЕМАТИКИ В ФОРМИРОВАНИИ КОМПЕТЕНТНОСТНОГО ПОДХОДА ПРИ ОБУЧЕНИИ СТУДЕНТОВ ФАКУЛЬТЕТА СУДОВОЖДЕНИЯ.....	48
<b>Куделин О.Г., Фомин В.И., Смирнова Е.В.</b> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧКИ ЭКСТРЕМУМА ДЛЯ НЕКОТОРОГО КЛАССА ФУНКЦИЙ, СОДЕРЖАЩИХ РАДИКАЛЫ.....	49

### TRANSPORT EDUCATION

<b>E.V. Smirnova</b> IMPORTANCE OF MATHEMATICS IN FORMING OF COMPETENT APPROACH TO EDUCATION STUDENTS FACULTY OF SHIPPING.....	48
<b>O.G. Kudelin, V.I. Fomin, E.V. Smirnova</b> DETERMINATION OF THE EXTREME POINT FOR A CLASS OF FUNCTIONS CONTAINING RADICALS.....	49

## ПОРЯДОК ПРИЕМА МАТЕРИАЛОВ

Уважаемые коллеги!

Редакция журнала «Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока» приглашает Вас опубликовать результаты Ваших научных исследований в очередном номере журнала. Материалы (заявку и статью) просим высылать ответственному секретарю журнала Коновалову В.В. по электронной почте: [konovalov@nsawt.ru](mailto:konovalov@nsawt.ru). Оригиналы по почте на адрес Университета с пометкой для Коновалова В.В.

### Заявка на публикацию научной статьи

	на русском языке	на английском языке
НАЗВАНИЕ СТАТЬИ (без каких-либо сокращений и символов)		
Аннотация (до 300 знаков)		
<i>Ключевые слова</i> (от 3 до 10 слов)		
Организация (полное юридическое название и полный почтовый адрес работы каждого из авторов)		
Автор(ы) (ФИО полностью, ученая степень, занимаемая должность, числовой идентификационный номер автора: Author ID в системе РИНЦ)		
Количество ссылок на литературу		
Координаты для обратной связи (ФИО полностью, адрес электронной почты, мобильный телефон*)		

\*-номер мобильного телефона необходим для оперативного решения возможных вопросов по поводу публикации и разглашению не подлежит

С условиями публикации ознакомлен(ы), представленный материал ранее не был опубликован, о рецензировании статьи компетентным по тематике статьи лицом не возражаем.

Дата

Подпись(и)

Требования к представлению материалов:

- 1 Статья (оригинал) и ее электронная версия в формате MS WORD (объем 3-5 страниц А4, шрифт Arial размер 14, одинарный интервал, поля 2 см).
- 2 Заявка (оригинал) и ее электронная версия в формате MS WORD на публикацию научной статьи.
- 3 Графический материал не подлежит правке при наборе (при выполнении рисунков поясняющий текст должен быть разборчив); размеры рисунка не более 15×15 см; глубина цвета – оттенки серого.
- 4 Ширина таблиц не более 15 см.
- 5 Все математические формулы и выражения должны быть набраны в специальном редакторе формул (MathType и др.), шрифт Arial.
- 6 Обязательные ссылки на список литературы выполняются сквозной нумерацией арабскими цифрами в квадратных скобках в порядке указания. На каждый указанный в списке источник должны быть ссылки в тексте статьи.

**Редколлегия оставляет за собой право литературной редакции содержания статьи без согласования с автором(и)**

С условиями публикации материалов можно ознакомиться у ответственного секретаря журнала Коновалова Валерия Владимировича по электронной почте: [konovalov@nsawt.ru](mailto:konovalov@nsawt.ru). Почтовый адрес: 630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, д. 33. ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта», а также на интернет-странице по адресу: <http://www.ssuwt.ru> в разделе «Наука-Научные издания». Для аспирантов очного отделения публикация материалов в журнале – бесплатно, в порядке очередности и актуальности.

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ  
Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока  
№4 за 2021 год

Главный редактор – Палагушкин Б.В.

Ответственный за выпуск – Коновалов В.В.  
Перевод на английский язык – Руденко К.Д.

Подписано в печать 29.12.2021 г. с оригинал-макета  
Бумага офсетная №1, формат 60x84 1/8, печать трафаретная – Riso.  
Усл. печ. л. 6,05; тираж 500 экз. Заказ № 201  
Цена свободная.

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»  
(ФГБОУ ВО «СГУВТ»), 630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, тел. (383)222-64-68,  
факс (383)222-49-76

Отпечатано в издательстве ФГБОУ ВО «СГУВТ»

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ №ФС77-22440 выдано 20.12.2005 г.

ISSN 2071-3827

Подписной почтовый индекс 62390