

## 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

**Vitalii Sedykh** – 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)



## О ВЛИЯНИИ ВСТРЕЧНОЙ ШПОРЫ НА ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ УЧАСТКА РЕКИ В ПРОТОКЕ ВАРТОВСКАЯ ОБЬ РЕКИ ОБЬ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

М.А. Бучельников, В.Н. Кофеева, В.Н. Кофеев

ON THE INFLUENCE OF A METERING SPUR ON THE HYDROLOGICAL CONDITIONS OF THE RIVER SECTION IN THE VARTOVSKAYA OB BODY OF THE OB RIVER

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630039, Russia

Michael A. Buchelnikov (Ph.D. of Biological Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)

Vera N. Kofeeva (Senior Lecturer of SSUWT)

Vadim N. Kofeev (Assoc. Prof. of SSUWT)

**ABSTRACT:** The subject of the study is a potential change in hydrological conditions that may occur after the construction of a counter spur near the island. Vampugolsky in the Vartovskaya Ob channel of the Ob River. It has been established that the projected counter spur will redistribute the water discharges between the two branches, change the current velocities and may change the pattern of bank erosion.

**Keywords:** hydrological conditions, channel-forming discharge, channel processes

Предметом исследования является потенциальное изменение гидрологических условий, могущее возникнуть после возведения встречной шпоры у о. Вампугольский в протоке Вартовская Обь реки Обь. Установлено, что проектируемая встречная шпора перераспределит расходы воды между двумя рукавами, изменит скорости течения и может изменить картину размыва берегов.

Сибирские реки представляют собой природно-техногенный комплекс, в котором сочетаются как естественные, так и антропогенные факторы [1, 2, 3].

Протока Вартовская Обь реки Обь расположена на территории муниципального образования Нижневартовский район Ханты-Мансийского автономного округа – Югры Тюменской области и имеет длину 23 км. На 1714 км от устья, русло реки Обь раздваивается на две протоки: Чехлоней (судоходная) и Вартовскую Обь, которые на 1693 км от устья снова сливаются, образуя единое русло реки Обь.

Протока Вартовская Обь реки Обь имеет (при проектном уровне) следующие гидрологические характеристики: ширина изменяется от 400 м до 1300 м; средняя глубина – 2,4 м; скорость течения в период минимального стока (межени) - 0,5 м/с; скорость течения в период максимального стока (половодья) – 1,38 м/с; минимальный расход воды при 95% обеспеченности – 840 м<sup>3</sup>/с; среднемноголетний расход воды – 5500 м<sup>3</sup>/с; расход воды в меженный период – 2402 м<sup>3</sup>/с; уклон свободной водной поверхности – 0,000033;

Протока Чехлоней располагается на 1702 км по левому берегу р. Обь и имеет длину 18 км. Остров Вампугольский - сложной конфигурации, около 13 км в длину, берега практически по-всеместно пологие.

Основной судовой ход проходит по протоке Чехлоней, по протоке Вартовская Обь осуществляется только подход к причалам города Нижневартовска, причем в меженный период суда заходят в протоку Вартовская Обь снизу.

В протоке Вартовкая Обь периодически производилась добыча речного аллювия, что привело к увеличению глубин у острова Вампугольский, а следовательно - некоторому уменьшению расходов воды в судоходной протоке Чехлоней. Для предотвращения ухудшения судоходных условий на данном участке реки было предложено создать струенаправляющее гидротехническое сооружение - встречную шпору [5,7] у приверха острова Вампугольский.

Для определения распределения расхода воды по рукавам и руслоформирующего расхода использовали осредненный график колебаний уровней воды за многолетний период по гидропосту г. Сургут. При этом период физической навигации делится на промежутки  $\Delta t$  и для каждого промежутка находится соответствующий уровень воды. По кривой зависимости расхода воды от уровней  $Q=f(H)$  (см. рисунок 1) для каждого уровня определяется соответствующий ему расход.

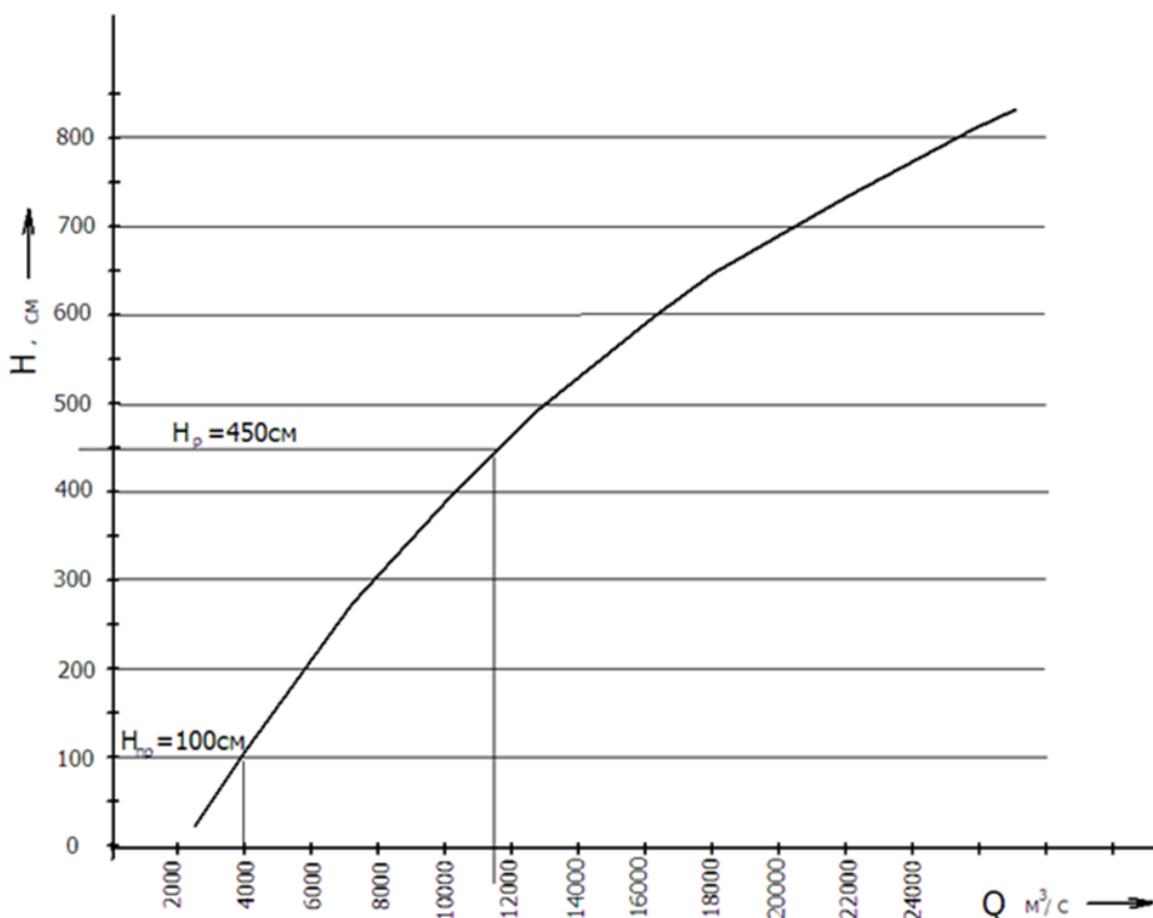


Рисунок 1 – Кривая зависимости расхода воды от уровней  $Q=f(H)$

Руслоформирующий расход находим по формуле (1):

$$Q_{Pф} = \sqrt{\frac{\sum \Delta t_i \times Q_i^2}{\sum \Delta t_i}} \quad (1)$$

где  $i$  – номер промежутка времени;  
 $\Delta t_i$  – промежуток времени, сутки;  
 $\Delta Q_i$  – расход соответствующий  $\Delta t$ , м³/с.

Расчеты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Определение руслоформирующих расходов

№ п.п.	$\Delta t$ , сут.	$\Sigma \Delta t$ , сут.	H, см	Q, м³/с	Q² * 10⁴	$\Delta t * Q^2 * 10^4$	$\Sigma \Delta t * Q^2 * 10^4$
1	16	16	420	10650	11342	181472	181472
2	15	31	625	16800	28224	423360	604832
3	15	46	650	17000	29241	438615	1043337
4	14	60	630	16900	28561	399854	1443301
5	14	74	540	13700	18769	262766	1706067
6	17	91	440	11100	12321	209457	1915524
7	16	107	290	7500	5625	90000	2005524
8	15	122	210	6000	3600	54000	2059524
9	30	152	160	4800	2304	69120	2128644
10	15	167	140	4500	2025	30375	2159019

В результате расчетов в таблице 1 находим руслоформирующий расход:

$$Q_P = \sqrt{\frac{\sum \Delta t_i \times Q_i^2 \times 10^4}{\sum \Delta t_i}} = \sqrt{\frac{2159019 \times 10^4}{167}} = 11370 \text{ м}^3 / \text{с} \quad (2)$$

По кривой зависимости  $Q=f(H)$  находим расчетный уровень:  $H_p=450$  см.

Расчет плана течений производим по методу М.А. Великанова [6]. Построение плана течений выполняется в последовательности, приведенной ниже.

1. На плане последнего года намечаются поперечные сечения, располагаемые по возможности нормально течению.

2. По каждому из выполненных сечений строятся поперечные профили, наносится расчетный уровень воды.

3. По кривой расходов  $Q = f(H)$  определяется расчетный расход воды  $Q_p$ , соответствующий расчетному уровню  $H_p$ . В проекте принято:  $Q_p = 11400 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $H_p = 450$  см.

4. Расход воды в сечении выражаем равенством:

$$Q_P = \frac{\sqrt{J}}{n} \int_0^B T_{CP}^{5/3} dB \quad (3)$$

где  $J$  – продольный уклон свободной поверхности воды;

$n$  – коэффициент шероховатости;

$T_{CP}$  – средняя глубина реки между расчетными вертикалями, м;

$B$  – ширина реки, м.

Обозначив  $\frac{\sqrt{J}}{n} = \varepsilon$ , получим:

$$Q_P = \varepsilon \int_0^B T_{CP}^{5/3} dB \quad (4)$$

Интегрирование заменяем суммированием по участкам элементарной величины  $\Delta B$ :

$$Q_P = \varepsilon \sum_0^B T^{5/3} \Delta B \quad (5)$$

а частный расход каждого участка

$$\Delta Q_i = \varepsilon T^{5/3} \Delta B \quad (6)$$

5. Поперечный профиль разбивается на ряд участков по ширине с учетом рельефа дна (в точках перелома поперечного профиля), после чего определяется:

– ширина каждого участка  $\Delta B$ ;

– его средняя глубина  $T_{cp}$ , равная площади участка, деленной на ширину;

– значение  $\Delta B \cdot T_{cp}^{5/3}$

Все значения  $\Delta B \cdot T_{cp}^{5/3}$  суммируются, и определяется величина:

$$\varepsilon = \frac{Q_P}{\sum_0^B T^{5/3} \Delta B} \quad (7)$$

После этого определяется по каждому участку  $\Delta Q_i$  по формуле (6), а затем -  $\sum \Delta Q_i$ . В конце последней строки записанное значение  $\sum \Delta Q$  должно быть равно  $Q$  или максимально близко к нему по значению.

6. По полученным в таблице, расположенной ниже поперечного профиля, значениям

$\sum \Delta Q_i$  над поперечным профилем строится интегральная кривая расходов. Для этого на вертикальной оси откладывается в определенном масштабе  $\sum \Delta Q_i$ .

7. Задавшись числом равнорасходных струй  $m = 12$ , разобьем на это число значение расхода  $Q_P$  и снесем границы струй сначала по горизонтали на интегральную кривую расхода, а с нее по вертикалям – на расчетный и проектный уровни воды. Точки пересечения вертикалей с проектным уровнем дают границы струй. Эти точки переносятся на соответствующий поперечник на плане.

В результате производится построение планов течений для данного разветвления в начале без сооружения (встречной шпоры), а затем с сооружением (см. рисунки 2 и 3).

Экспериментальная установка представлена на рисунке 2.

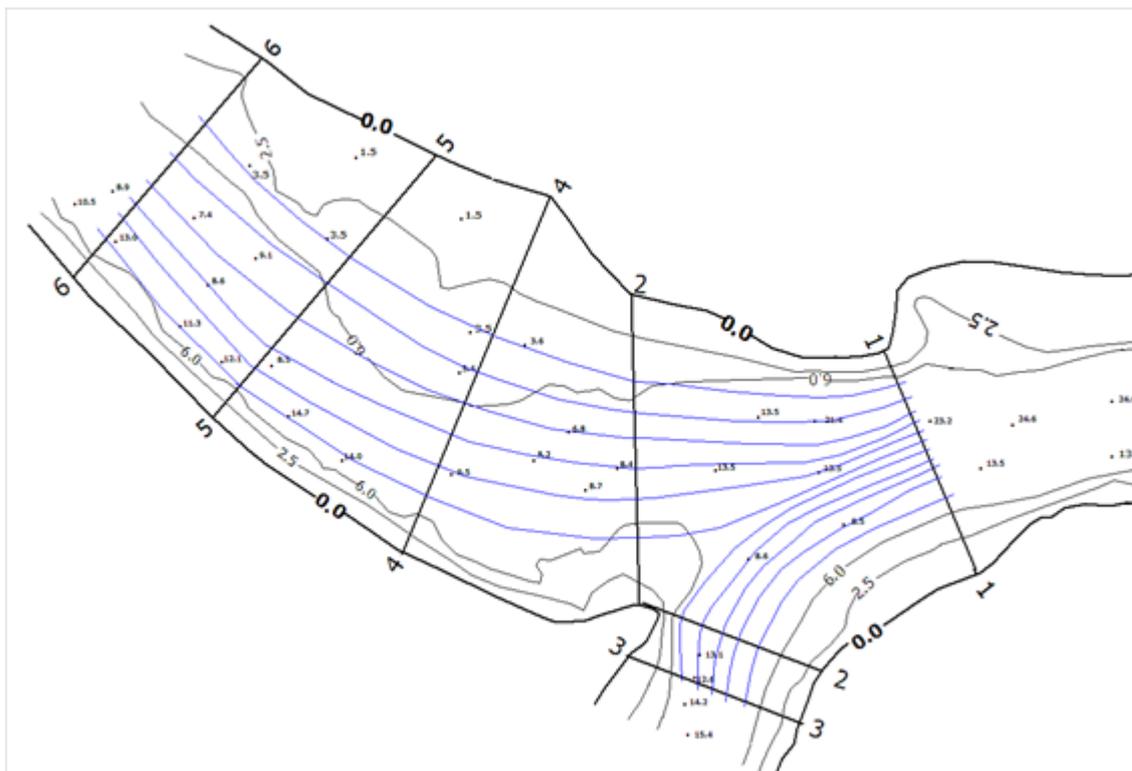


Рисунок 2 – План течений при руслоформирующем расходе (без встречной шпоры).

По каждой струе определяются: границы струй, средняя глубина, площадь живого сечения, расход и скорость.

Анализ выполненных расчетов показывает, что на данном участке разветвления без встречной шпоры расходы воды по рукавам практически равны и соответствуют  $5515 \text{ м}^3/\text{с}$  – судоходный рукав,  $5885 \text{ м}^3/\text{с}$  – несудоходный, т.е. в несудоходном рукаве расход на  $370 \text{ м}^3/\text{с}$  больше. Максимальная скорость течения воды в судоходном рукаве  $1,69 \text{ м/с}$ , а в несудоходном  $-1,21 \text{ м/с}$ , а средняя скорость в сечениях соответственно  $1,11 \text{ м/с}$  и  $0,88 \text{ м/с}$ .

В результате строительства встречной шпоры расход воды в судоходной протоке увеличивается до  $7033 \text{ м}^3/\text{с}$ , а в несудоходной уменьшается до  $4810 \text{ м}^3/\text{с}$ . Скорости течения воды в судоходном рукаве увеличиваются: максимальная до  $2,10 \text{ м/с}$ , средняя до  $1,46 \text{ м/с}$ . В несудоходном рукаве максимальная скорость понижается до  $0,87 \text{ м/с}$ , средняя до  $0,7 \text{ м/с}$ .

Подобное изменение характеристик потока на представленном участке реки может привести к определенным русловым деформациям. Известно, что правый берег Оби сложен мелко- и среднезернистыми песками. Под воздействием водного потока берег интенсивно размывается, за период с 1964 г. береговая полоса сместилась от 80 до 150 м в сторону города. Длина береговой полосы, подвергнутая переработке, составила 8 км до устья реки Малый Еган. В этом случае, можно утверждать, что указанное изменение расходов и течений после построения встречной шпоры благоприятно скажется на условиях судоходства в протоке Чехлоней, а также уменьшит скорость размыва в протоке Вартовская Обь, что в свою очередь, позволит рассмотреть возможность продолжения добычи аллювия в ее русле и за-тапливаемой пойме.

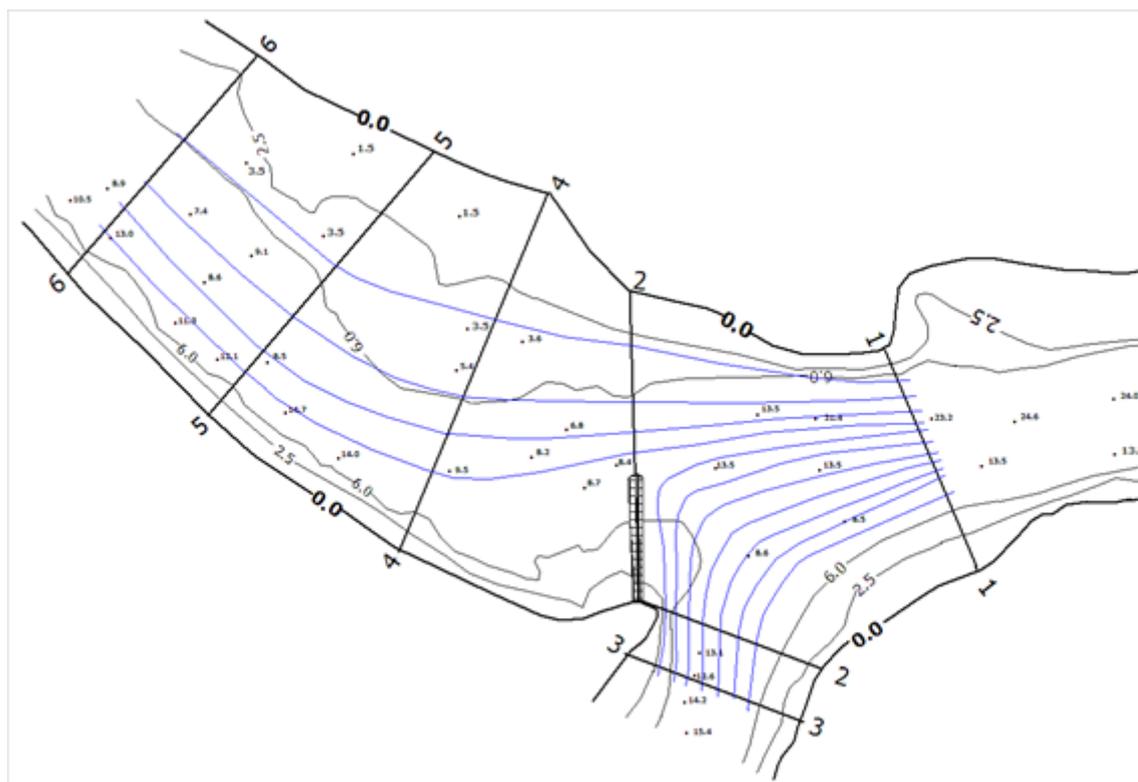


Рисунок 3 – План течений при руслоформирующем расходе (со встречной шпорой).

Увеличение скоростей течения в протоке Чехлоней для гидробионтов можно признать незначительным, а несколько ниже по течению, непосредственно за шпорой, может возникнуть локальный биоценоз [8].

Особое внимание следует уделять прогнозированию возможных размывов грунта в основании встречной шпоры, т.е. изменения конфигурации самого приверха острова Вампугольский. Для уменьшения размыва корня и тела встречной шпоры во время весеннего половодья возможно применение промораживания надводной части путем очистки от снега в течение всей зимы; с началом весенней оттепели снег не должен убираться для защиты грунта от преждевременного оттаивания.

Встречная шпора и прилегающие к ней участки русла должны находиться под постоянным визуальным и инструментальным наблюдением. Русловые деформации, опасные для встречной шпоры, должны прогнозироваться на основе анализа планов выправленного участка реки за период после возведения гидросооружения. При нежелательной направленности русловых процессов проводится подробная съемка участка реки в необходимых границах и строятся планы течений по натурным наблюдениям при различных уровнях после чего намечаются новые мероприятия для улучшения судоходных условий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ботвинков В.М., Дегтярев В.В., Седых В.А. Гидроэкология на внутренних водных путях. – Новосибирск: Сибирское соглашение. - 2002 г.
2. Бучельников, М.А. Транзитные дноуглубительные работы в русле реки Оби как один из основных гидроэкологических факторов Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2015. – №2. – С.221-224.
3. Бучельников, М.А. Оценка воздействия дноуглубительных работ на окружающую среду/ М.А. Бучельников, В.А. Седых // Актуальные проблемы безопасности жизнедеятельности и экологии: сб. трудов международной науч-практич. конф. – Тверь: ТГТУ. – 2016. – С 206-207.
4. Бучельников, М.А. Экологическая оценка планируемых дноуглубительных работ на Колпашевском перекате р. Оби/ М.А. Бучельников// Научные

REFERENCES

1. Botvinkov V.M., Degtyarev V.V., Sedykh V.A. Hydroecology on inland waterways. - Novosibirsk: Siberian Agreement. - 2002
2. Buchelnikov, M.A. Transit dredging in the Ob riverbed as one of the main hydroecological factors. Scientific problems of transport in Siberia and the Far East. - 2015. - No. 2. - P.221-224.
3. Buchelnikov, M.A. Assessment of the impact of dredging on the environment / M.A. Buchelnikov, V.A. Sedykh // Actual problems of life safety and ecology: Sat. Proceedings of the international scientific and practical. conf. - Tver: TSTU. - 2016. - From 206-207.
4. Buchelnikov, M.A. Environmental assessment of the planned dredging works on the Kolpashevsky rift of the river. Ob / M.A. Buchelnikov // Scientific problems of transport in Siberia and the Far East. - 2015. - No. 1. - P.230-233.
5. Implementation of research to improve the stability of navigation cuts on the Upper Ob: a report on research / hands. topics V.M. Botvinkov. - Novosibirsk: NIIVT. - 1991. - 150 p.

проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2015. – №1. – С.230-233.

5. Выполнение исследований по повышению устойчивости судоходных прорезей на Верхней Оби: отчет о НИР / рук. темы В.М. Ботвинков. – Новосибирск: НИИВТ. – 1991. – 150 с.

6. Дегтерев, В.В. Проектирование и эксплуатация выправительных сооружений на внутренних водных путях: монография/ В.В. Дегтярев. – М.: Транспорт. – 1981. – 224 с.

7. Исследование воздействия руслового карьера нерудных строительных материалов на режим переката на верхней Оке / Беркович К.М., Злотина Л.В., Ильясов А.К., Турыкин Л.А. // Речной транспорт (XXI век). 2016. – № 4 (80) – с. 44.

8. Седых, В.А. О формировании биоценоза в районе гидротехнических сооружений у Новосибирского северного объездного моста/ В.А. Седых, М.А. Бучельников // Науч. пробл. транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2014 г. – №3. – С.77-79.4.

Silyakov, S. L. Surface Cladding by Combined Use of Metallothermy and Induction Heating / S. L. Silyakov, V. I. Yukhvid, V. F. Aulov // International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. – 2019. – Vol. 28. – No 3. – P. 213-215. – DOI 10.3103/S1061386219030154.

5. Analysis of the retailoring methods and the workability of deposited surfaces / V. V. Konovodov, A. V. Valentov, E. G. Grigoryeva, K. A. Abdrasulov // Materials treatment: current problems and solutions, Yurga, 26–28 ноября 2015 года / National Research Tomsk Polytechnic University. – Yurga: IOP Publishing Ltd, 2016. – P. 12035.

6. Degterev, V.V. Design and operation of correctional structures on inland waterways: monograph / V.V. Degtyarev. – М.: Transport. - 1981. - 224 p.

7. K. M. Berkovich, L. V. Zlotina, A. K. Ilyasov, and L. A. Turykin, Investigation of the impact of a channel quarry of non-metallic building materials on the regime of rolling on the upper Oka. // River transport (XXI century). 2016. - No. 4 (80) - p. 44.

8. Седых, В.А. О формировании биоценоза в районе гидротехнических сооружений у Новосибирского северного объездного моста/ В.А. Седых, М.А. Бучельников // Науч. пробл. транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2014 г. – №3. – С.77-79.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:**

*гидрологические условия, руслоформирующий расход, русловые процессы*

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

*Бучельников Михаил Александрович, канд. биол. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»*

*Кофеева Вера Николаевна, ст. преподаватель ФГБОУ ВО «СГУВТ»*

*Кофеев Вадим Николаевич, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»*

**ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:**

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

---

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ФИЛЬТРАЦИИ РАСЧЁТНЫХ ВЫСОТ ВОЛН ПО РАДИОЛОКАЦИОННОМУ ИЗОБРАЖЕНИЮ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

В.И. Сичкарев, Б.В. Палагушкин, В.П. Умрихин

### APPLICATION OF THE METHOD OF FILTERING THE CALCULATED WAVE HEIGHTS FROM THE RADAR IMAGE OF THE WAVE FIELD

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

Victor I. Sichkarev (D. of Sciences, Prof. of SSUWT)

Boris V. Palagushkin (D. of Sciences, Prof. of SSUWT)

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

**ABSTRACT:** A variant of bringing the calculated parameters of wave heights obtained from a radar image of the wave field into line with the actual wave heights from visual observations and hydrometeorological information is being considered.

**Keywords:** waves, radar images of the wave field, obtaining wave heights

Рассматривается вариант приведения расчётных параметров высот волн, полученных по радиолокационному снимку волнового поля, в соответствие действительным высотам волн по визуальным наблюдениям и гидрометеорологической информации.

Радиолокация как метод получения характеристики волнения позволяет достаточно просто оценить обобщённые параметры волнения в зоне радиолокационного обзора. В то же время он не даёт информации о характеристиках индивидуальных волн. Иной подход к исследованию волнения радиолокационным методом намечен в работах [1 – 3], позволяющий получать индивидуальные характеристики длин волн по прямым измерениям на радиолокационном изображении волнового поля и высот по косвенным измерениям. Недостаток косвенного метода заключается в том, что вследствие неодинаковости высот измеряемой и предшествующей волн, расчётные высоты некоторых волн оказываются чрезвычайно завышенными. Эту ситуацию можно считать методическим промахом и исключать волны завышенной высоты из обработки. Такой приём легко реализовать при ручной обработке изображения волнового поля. Однако, для автоматизированной обработки нужно искать такие приёмы, которые применимы при формальном подходе. Одним из таких приёмов, может быть, метод фильтрации расчётных высот на основе величин, получаемых непосредственно из результатов расчёта.

Для отработки метода фильтрации представляет интерес исследование статистических характеристик параметров волнения на примере конкретных имеющихся снимков экрана радиолокатора с изображением волнового поля, рисунок 1.

Для проведения статистических исследований на снимках выполнены измерения, описанные в [1] и заключающиеся в установлении направления истинного ветра и проведении сетки параллельных истинному ветру линий с шагом, соизмеримым с длиной волны и длиной гребней волн. Вдоль каждой из линий выполняется измерение ширины полосы засветки  $x$ , расстояния между соответствующими точками соседних полос засветки  $b$ , которое при пересчёте на натурные размеры даёт радиовидимую длину волны  $\lambda$ , а также расстояние  $D$  от измеряемой волны до центра развёртки экранного изображения. Из обработки исключаются области вблизи центра развёртки, где изображение индивидуальных волн сливается, а также область, где радиолокационный луч скользит вдоль гребней волн и не отображает рельефную структуру длин волн. Эти области обозначены как зона А.

Обработанные таким образом снимки позволяют получать до нескольких сотен значений индивидуальных длин волн и рассчитать индивидуальные высоты этих же волн по приведённым в [2, 3] формулам:

$$\frac{h}{e} = \frac{2(1 - \frac{x}{\lambda})}{(\frac{D}{\lambda} - \frac{x}{\lambda}) - (\frac{D}{\lambda} - 1) \cdot \cos \frac{2\pi x}{\lambda}}, \quad (1)$$

где  $h$  – высота волны;  
 $e$  – высота установки антенны РЛС на судне.

Формула (1) получена для регулярных гармонических волн, движущихся по генеральному направлению распространения волн, когда предшествующий и измеряемый гребни волны, имеющей длину  $\lambda$ , имеют одинаковую высоту  $h$ . В действительности высоты всех гребней различны. При этом могут встретиться случаи, когда предшествующая высота больше измеряемой, и наоборот. Принимая в качестве важного допущения, что обе эти ситуации равновероятны, можно ожидать, что среднее значение высот по (1) по всему волновому полю будет отображать реальную статистическую картину волнения.

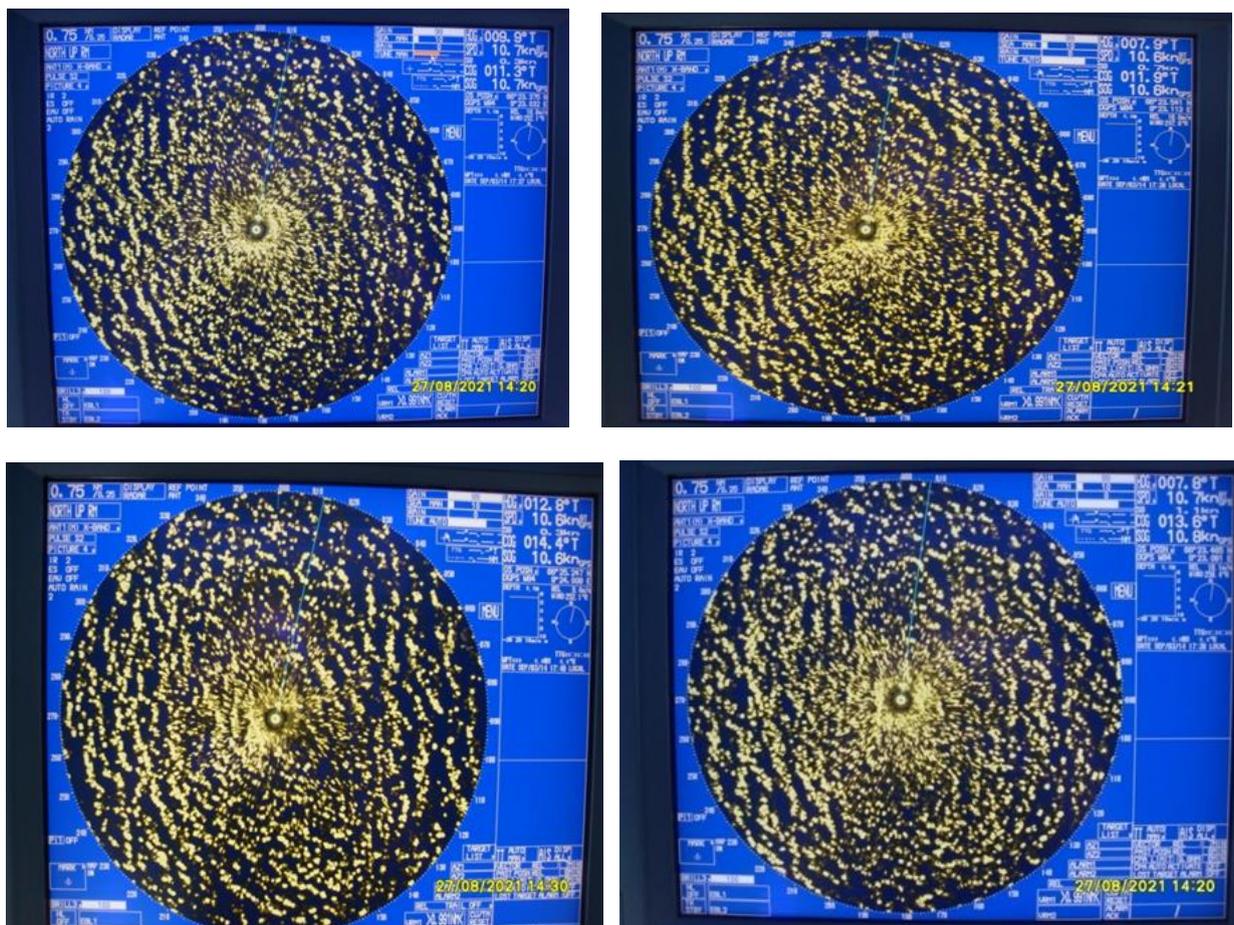


Рисунок 1 – Фотоснимок экрана радиолокатора с изображением волнового поля. Серия снимков снята Р.Д.Русмиленко с 17.36 по 17.48 судового времени в Норвежском море (указанные на снимках время и дата ошибочные)

Однако, в действительности постоянно встречающаяся нерегулярность волнения даёт в некоторых случаях завышенные или заниженные значения высот волн, рассчитанных по (1). Пример таких значений, существенно выделяющихся из общего объёма наблюдений, приведён в [1], рисунок 2, где в отдельных случаях встречаются расчётные высоты волн свыше 20 и даже 30 м, что не характерно для волнения со средней высотой волн около 2 м.

Физически обоснованных оснований для фильтрации высот волн немного. Прежде всего следует отметить возможную предельную крутизну волн  $h / \lambda$ : она не может превышать величины  $1/7 - 1/10$  из условия сохранения формы волны (при большей крутизне гребень волны обрушивается). Минимальное её значение не нормируется, но при значениях крутизны менее  $1/100$  волна для качки судна становится не актуальной. Поэтому фильтр первого уровня – по условию граничной крутизны

$$1/100 < h / \lambda < 1/10. \quad (2)$$

Результат фильтрации-1 исходного ряда обработки снимков по (2) представлен на рисунке 3.

Дополнительную фильтрацию - 2 можно провести по статистическому правилу «трёх

СИГМ»:

$$h < h^- \pm 3 \cdot \sigma, \quad (2)$$

где  $h^-$  – средняя высота по результатам первой фильтрации,  $(h^-) = 3,6777$  м;  
 $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение высот волн по исходным данным после первой фильтрации ( $\sigma=3,86158$ ).

Результат фильтрации – 2 представлен на рисунке 4.

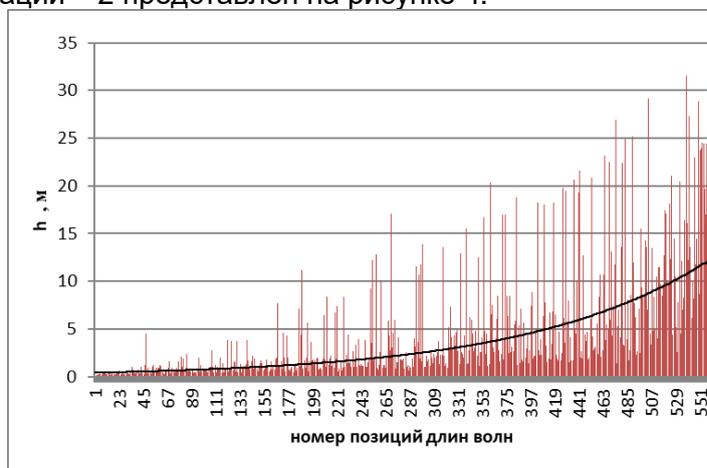


Рисунок 2 – Распределение высот волн при длинах волн от 20 до 400 м; средняя длина волны 109 м

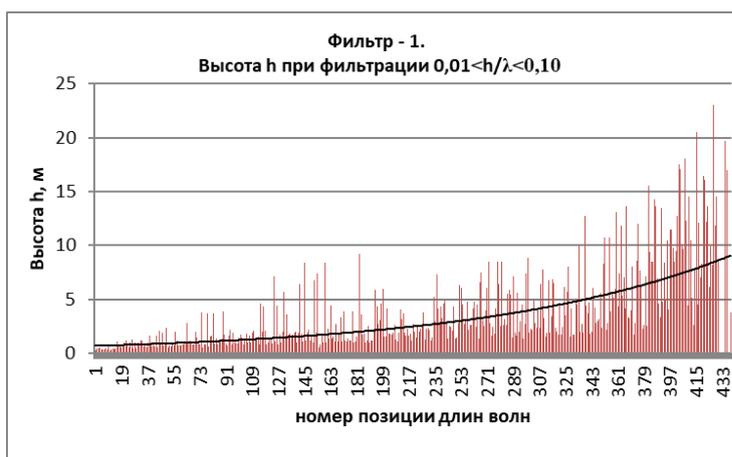


Рисунок 3 – Результат фильтрации-1 расчётных высот волн по критерию крутизны волны

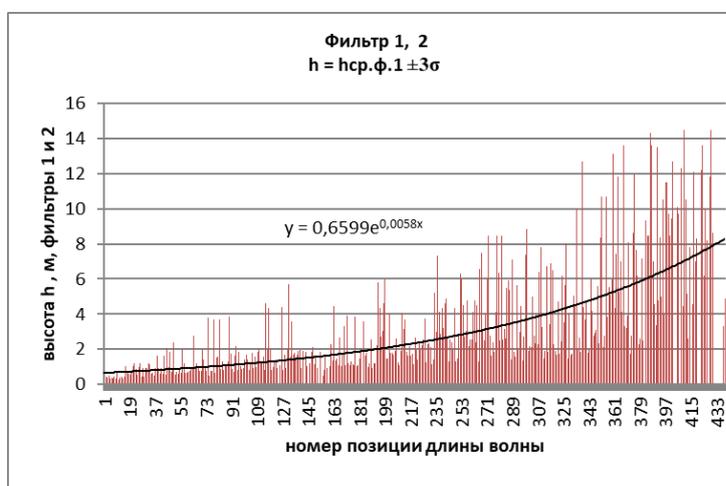


Рисунок 4 – Результат дополнительной фильтрации-2 расчётных высот волн по критерию «трёх сигм»: средняя высота волн  $h_{\phi 2} = 3,32196$  м

Ещё одну фильтрацию – 3 можно провести из условия предельной высоты нерегулярного волнения. Принято считать, что предельные высоты  $h_{пр}$  приближаются к значению утроенной средней высоты волн. Тогда

$$h \leq h_{пр} = 3 \cdot h_{ф2} \quad (4)$$

Результат третьей фильтрации представлен на рисунке 5.



Рисунок 5 – Результат фильтрации-3 расчётных высот волн по критерию предельной высоты волны относительно средней по фильтрации-2: средняя высота волн  $h_{ф3} = 2,782$  м

Среднее значение высоты волн после третьей фильтрации  $\bar{h}_{ф3} = 2,782$  м; отношение средней высоты  $\bar{h}_{ф3}$  к средней фактической высоте волн  $h_{ф} = 2,00$  м зафиксированного на снимках волнения  $\bar{h}_{ф3} / h_{ф} = 1,391$ ; обеспеченность такого волнения

$$F(h) = \exp [- \pi / 4 (h / h_{ср})] = 21,88 \%$$

Таким образом, результаты фильтрации постепенно приближают осреднённые параметры волнения (предположительно, и параметры индивидуальных волн) к их предполагаемым фактическим средним значениям, таблице 1.

Таблица 1 – Результаты фильтрации расчётных высот волн

Параметр волнения	Исходные данные обработки снимков	Результаты фильтрации			Предполагаемые фактические значения
		I	I и II	I, II и III	
Min $\lambda$ , м	19,8	21,2	21,2	21,2	
Max $\lambda$ , м	424	424	424	424	
Средняя $\lambda$ , м	109,033	113,514	110,697	105,693	109
Min $h$ , м	0,14	0,24	0,24	0,24	
Max $h$ , м	31,6	23	14,5	9,96	6
Средняя высота $h$ , м	4,581	3,678	3,3299	2,782	2,50
Обеспеченность $F(h)$ , %	1,62	7,02	11,34	21,88	45,59

Последовательное применение критериев фильтрации по граничной крутизне волны, по статистическому правилу «трёх сигм» с непревышением разброса высот относительно среднего значения в утроенное значение среднего квадратического отклонения, по условию предельной высоты нерегулярного волнения в утроенное значение средней высоты, с вычислением средних значений после каждой очередной фильтрации приводит средние показатели волнения к показаниям гидрометеорологических центров. В этом отношении выдвинутую гипотезу можно считать удовлетворённой.

Однако применением метода фильтрации добиться полного соответствия расчётных высот волн наблюдаемому волнению не удаётся, что оставляет актуальной задачу совершенствования расчётного определения индивидуальных высот волн.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Сичкарев В.И. Способ определения высот волн по радиолокационной картине волнового поля / В.И.Сичкарев // Судовождение-2010: сб. науч. трудов. – Новосибирск: НГАВТ, 2010. – С. 3 – 19.
2. Сичкарев В.И. Развитие методов получения параметров вет-ровых волн в судовых условиях / В.И.Сичкарев, К.И.Зинченко // Сб. науч. трудов SWorld. T.1 Транспорт. – Одесса: Из-во Купrienko С.В., 2012. – С. 64 – 72.
3. Сичкарев В.И. Влияние различных факторов на ширину за-светки гребня волны в радиолокационном изображении волнового поля / В.И.Сичкарев // Modern scientific researches: International peri-odic scientific journal. Issue № 4, Vol.1., 2018. - P. 57 – 62.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:**  
**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

**ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:**

*волнение, радиолокационные снимки волнового поля, получение высот волн*  
Сичкарев Виктор Иванович, д-р техн.наук, профессор ФГБОУ ВО «СГУВТ»  
Палагушкин Борис Владимирович, д-р техн.наук, профессор ФГБОУ ВО «СГУВТ»  
Умрихин Виктор Павлович, канд. техн. наук ФГБОУ ВО «СГУВТ»  
630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»

**REFERENCES**

1. Sichkarev V.I. A method for determining wave heights from the radar pattern of the wave field / V.I. Sichkarev // Navigation-2010: coll. scientific works. - Novosibirsk: NGAVT, 2010. - S. 3 - 19.
2. Sichkarev V.I. Development of methods for obtaining the parameters of wind waves in ship conditions / V.I. Sichkarev, K.I. Zinchenko // Sat. scientific Proceedings of SWorld. T.1 Transport. - Odessa: Izvo Kuprienko S.V., 2012. - S. 64 - 72.
3. Sichkarev V.I. Influence of various factors on the wave crest illumination width in the radar image of the wave field / V.I. Sichkarev // Modern scientific researches: International peri-odic scientific journal. Issue No. 4, Vol.1., 2018. - P. 57 – 62.

## ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЗАПИСЕЙ КАЧКИ СУДНА В ЭКСПЛУАТАЦИОННОМ РЕЙСЕ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

**В.И. Сичкарев, В.П. Умрихин**

**HARMONIC ANALYSIS OF SHIP ROLL RECORDINGS DURING THE OPERATIONAL VOYAGE**

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

Victor I. Sichkarev (D. of Sciences, Prof. of SSUWT)

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

**ABSTRACT:** A harmonic analysis of a 10-minute roll recording was performed. A pitching frequency spectrum and a phase-frequency response are constructed. The ship's own rolling period has been confidently identified. In the pumping spectrum in the form of local maxima there is a parametric resonance and an apparent period of dominant excitement.

**Keywords:** harmonic analysis, on-board pitching, frequency spectrum of pitching, intrinsic pitching period.

Проведён гармонический анализ 10-минутной записи бортовой качки. Построен частотный спектр качки и фазово-частотная характеристика. Уверенно выявлен собственный период качки судна. В спектре качки в виде локальных максимумов присутствует параметрический резонанс и кажущийся период доминирующего волнения.

Выполняемая современными цифровыми устройствами запись качки судна представляет собой дискретные временные ряды в виде отметок времени с устанавливаемым программными средствами фиксированным шагом и соответствующими этим моментам времени отметками различных параметров качки, например, угла крена  $\theta$ , дифферента  $\psi$  и др. Компактность, простота монтажа и обслуживания этого программно-аппаратного комплекса позволяют вести регистрацию качки судна в обычном эксплуатационном рейсе силами судоводительского состава. Это обстоятельство открывает новые возможности по анализу реакций судна на волнение. Суть этих новых возможностей заключается в том, что судно находится в состоянии фактической загрузки и на фактическом волнении, что достаточно сложно смоделировать в лабораторных условиях.

Естественно, этот метод определения реакций судна не лишён недостатков. Главный из них заключается в том, что в эксплуатационном рейсе неизвестен фактический спектр волнения, из-за чего из полученных реакций не удаётся вычлениить инварианты, например, в

виде амплитудно-частотной характеристики качки, пригодные для прогноза поведения судна на любом волнении или при изменении параметров движения судна (скорости или курса, определяющего курсовой угол волнения). Решение этой полной проблемы ждёт своего времени, но даже отсутствие инвариантов реакций судна позволяет решать задачи оптимизации управления судном в пределах квазистационарности того волнения, на котором регистрируется качка. Для этого необходимо извлечь из записи качки информацию об амплитудах и частотах качки, т.е. получить спектр качки, а также принять во внимание, что эта качка вызвана кажущимися частотами волнения. Если перейти от кажущихся частот волнения к истинным, то представляется возможным прогнозировать качку на этом волнении при любом изменении параметров движения судна, получая новые кажущиеся частоты волнения.

Задача получения спектра качки может быть решена разными путями. Традиционный путь, используемый при непрерывной записи временных рядов, состоит в вычислении автокорреляционной функции, по которой на основании теоремы Винера-Хинчина вычисляется функция спектра.

Другой путь, достаточно удобный при дискретной записи временных рядов, состоит в вычислении по записи качки времени нулевых значений угла качки (корней функции качки), по которым определяются полупериоды качки, а также выбираются амплитудные значения качки в пределах полупериода.

Для анализа временных рядов используется также гармонический анализ, одинаково пригодный как для непрерывных записей, так и для дискретных. Суть его состоит в аппроксимации некоторой периодической функции  $f(x)$  тригонометрическим рядом, члены которого определяются должным образом назначенными частотами гармоник. Амплитуды этих гармоник для сходимости ряда к  $f(x)$  также должны быть подчинены определённым условиям. Чем больше рассматриваемый период функции, тем большее количество частот может содержать тригонометрический ряд, что в итоге позволяет создать линейчатый спектр аппроксимируемой периодической функции.

Рассмотрим математический аппарат гармонического анализа.

Пусть рассматривается нерегулярная непрерывная функция  $f(t)$  с конечным периодом  $T$ . Её можно представить в виде бесконечной суммы гармоник:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} C(\omega, \beta, t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} a(\omega, t) + \sum_{i=1}^{\infty} b(\omega, t), \quad (1)$$

где  $C(\omega, \beta, t) = C_i \cdot \cos(\omega_i \cdot t + \beta_i)$ ;

$$C_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2};$$

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T f(t) dt;$$

$$a_i = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T f(t) \cdot \cos(\omega t) dt;$$

$$b_i = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T f(t) \cdot \sin(\omega t) dt;$$

$$\omega_i = \frac{2 \cdot \pi \cdot i}{T};$$

$$\operatorname{tg}(\beta_i) = \frac{a_i}{b_i};$$

$$a(\omega, t) = a_i \cdot \cos(\omega_i \cdot t);$$

$$b(\omega, t) = b_i \cdot \sin(\omega_i \cdot t);$$

$$i=1, 2, \dots, \infty.$$

Дисперсия процесса, описываемого функцией  $f(t)$ , равна

$$D_f = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T F(t) dt, \quad (2)$$

где  $F(t) = f^2(t)$ ,

а среднее квадратическое отклонение (СКО, стандарт)

$$m_f = \sqrt{D_f}. \quad (3)$$

Если функция  $f(t)$  задана дискретно, то интегрирование в (1 – 3) удобнее заменить одним из приёмов численного интегрирования в виде суммирования промежуточных значений функции. При этом сумма тригонометрического ряда даёт наилучшее приближение в смысле наименьших квадратов, если её коэффициенты вычислены по формулам Бесселя, [1]:

$$n \cdot a_0 = \sum_{k=0}^{2n-1} f(k); \quad (4)$$

$$n \cdot a_m = \sum_{k=0}^{2n-1} f(k) \cdot c(k, m); \quad (5)$$

$$n \cdot b_m = \sum_{k=0}^{2n-1} f(k) \cdot s(k, m), \quad (6)$$

где  $c(k, m) = \cos\left(\frac{\pi \cdot k \cdot m}{n}\right)$ ;

$$s(k, m) = \sin\left(\frac{\pi \cdot k \cdot m}{n}\right)$$

период  $T$  разделён на  $2n$  равных частей;

абсциссы точек деления  $t_k = \frac{k \cdot T}{2 \cdot n}$ ;

ординаты точек деления  $f(t) = f(k)$ ;

$k = 0, 1, 2, \dots, 2n$ ;

$m = 1, 2, \dots, n$ .

Допустим, запись качки выполняется в течение периода квазистационарности волнения  $T = 20 \text{ мин} = 20 \cdot 60 = 1200 \text{ с}$ .

Разделим этот период  $T$  на 2400 равных частей по 0,5с. Тогда  $n = 1200$ , а абсциссы точек деления  $t_k = \frac{k \cdot T}{2 \cdot n} = 0,5 \cdot k$ . Аргумент  $\omega_i \cdot t$  тригонометрических функций равен

$$\frac{\pi \cdot k \cdot m}{n} = \frac{\pi \cdot k \cdot m}{1200} = 0,002618 \cdot k \cdot m,$$

где 0,002618 – шаг частот.

Это потребует довольно большого объёма вычислений

$$Q = 1 + 2m \cdot 2n = 1 + 4n^2 \approx 5760000.$$

При охвате периода записи  $T=10\text{мин} = 600\text{с}$  объём записи  $2n = 1200$ , а  $n = 600$ . В этом случае объём вычислений  $Q = 4n^2 = 1440000$  сокращается в 4 раза. При любом изменении используемого для гармонического анализа периода записи необходимо проверять соблюдение квазистационарности волнения, например, по дисперсии процесса (2) или СКО (3).

Сокращения объёма вычислений можно добиться ещё двумя приёмами: представлением функции  $f(t)$  в виде чётной или нечётной функции или переходом к быстрому преобразованию Фурье и расчётом коэффициентов Фурье по рекуррентным формулам [2]. Имеются и иные методы снижения объёма вычислений [3].

Если функция  $f(t)$  задана на интервале  $(0, 1)$ , то её можно разложить как в ряд по косинусам, так и в ряд по синусам. Однако, за пределами интервала  $(0, 1)$  ряд по косинусам даёт чётное продолжение функции  $f(t)$ , а ряд по синусам – нечётное. Учитывая, что накренения судна на каждый борт могут быть неодинаковыми, нечётное продолжение привело бы к тому, что накренения левого борта оказались бы отнесёнными к правому борту, и наоборот. Поэтому для гармонического анализа качки приемлемо только чётное продолжение, если понадобится стремиться к сокращению объёма вычислений. В этом случае коэффициенты Фурье записываются в виде

$$a_k = 2 \cdot \int_0^l f(x) \cdot \cos\left(\frac{\pi k x}{l}\right) dx; \quad (7)$$

$$f(t) \approx s(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a \cdot \cos\left(\frac{\pi k x}{l}\right), \quad (8)$$

где  $a = a_k$ .

При этом в чётном разложении по косинусам частота в аргументе косинуса в два раза больше частоты в аргументе синусов и косинусов в разложении (4–6).

Для обработки методологии гармонического анализа примем период записи  $T=600\text{с}$  с делением этого периода на  $2n = 1200$  частей по  $\Delta t = 0,5\text{с}$ . Аргумент и коэффициенты Фурье для разложения (4–6)

$$\omega_k = \frac{\pi k m}{n} = 0,005235987 k m = w k m;$$

$$a_0 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=0}^{2n-1} f(k) = 0,01667 \sum_{k=0}^{2n-1} f(k);$$

$$a_m = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=0}^{2n-1} f(k) \cdot \cos\left(\frac{\pi k m}{n}\right) = 0,01667 \sum_{k=0}^{2n-1} f(k) \cdot \cos(w k m);$$

$$b_m = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=0}^{2n-1} f(k) \cdot \sin\left(\frac{\pi k m}{n}\right) = 0,01667 \sum_{k=0}^{2n-1} f(k) \cdot \sin(w k m); \quad (9)$$

$$C_m = \sqrt{a_m^2 + b_m^2};$$

$$\text{tg}(\beta_m) = \frac{a_m}{b_m};$$

$$k=0, 1, 2, \dots, 2n;$$

$$m=1, 2, \dots, n.$$

Результаты расчётов в Excel по алгоритму (9) для номеров гармоник  $m=1-600$  (частотный диапазон  $\omega = 0,005236-3,131493$  с-1) представлены на рисунке 1, для номеров  $m=1-300$  на рисунке 2.



*Рисунок 1 – Линейчатый спектр 10-минутной бортовой качки по 600 расчётным гармоникам*

Из рисунка 1 видно, что гармоники выше  $m = 300$  имеют весьма незначительные амплитуды и имеет смысл более подробно рассматривать зону основного максимума в диапазоне  $m = 1 - 100$ , рисунки 3, 4.



*Рисунок 2 – Линейчатый спектр 10-минутной бортовой качки по 600 расчётным гармоникам*



Рисунок 3 – Линейчатый спектр  $C_m$  бортовой качки по первым 100 гармоникам

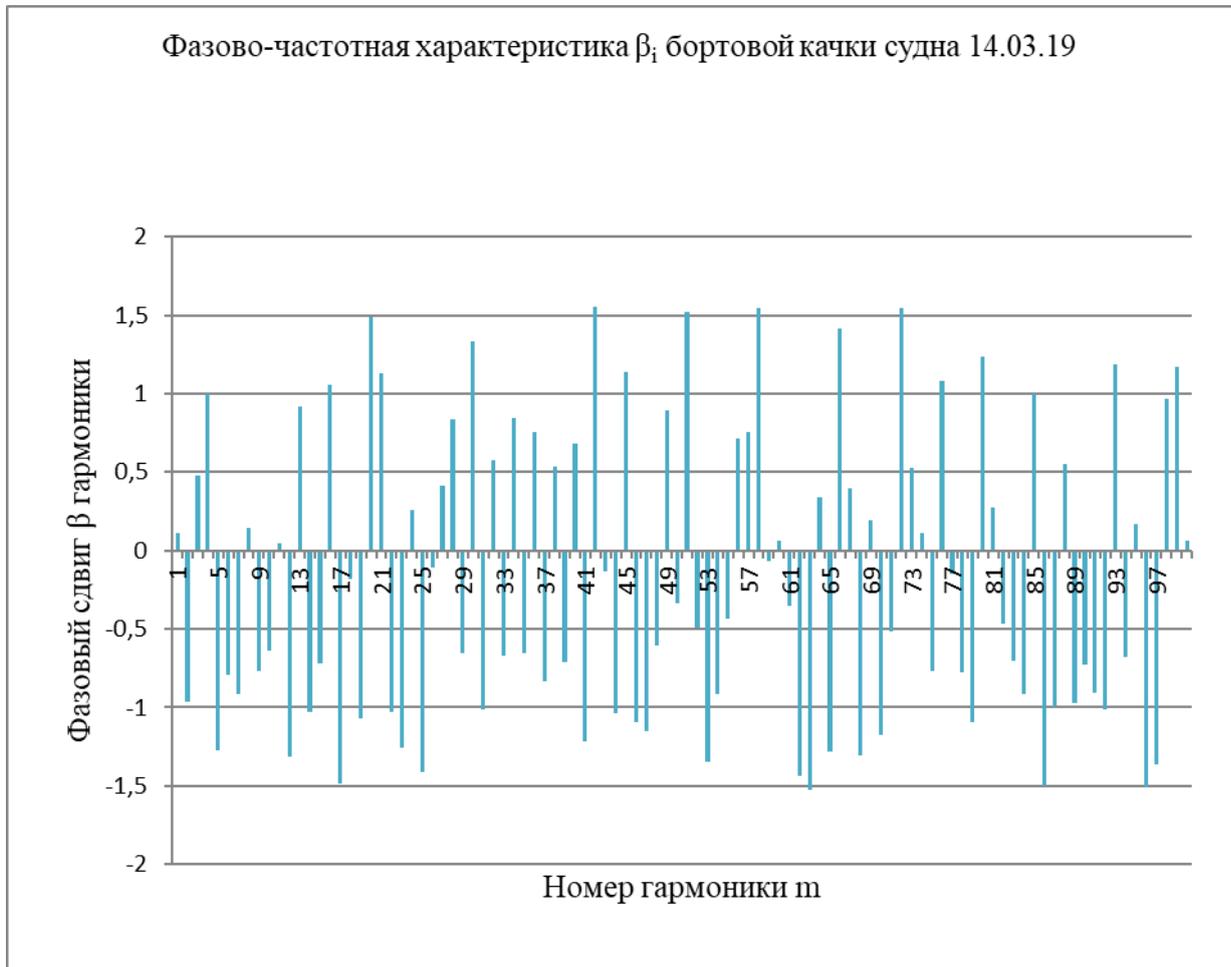


Рисунок 4 – Фазово-частотная характеристика  $\beta$  бортовой качки (гармоники  $m = 1 - 100$ )

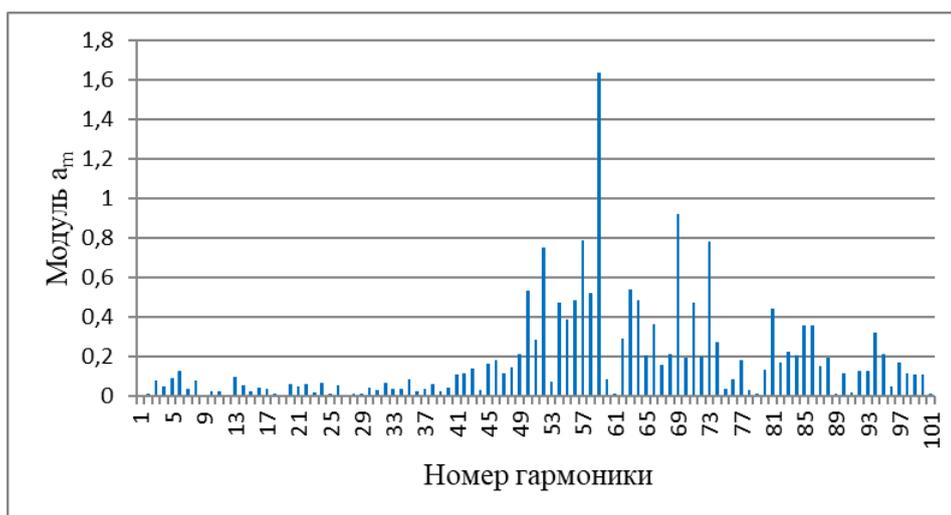


Рисунок 5 – Спектр модулей амплитуд  $a_i$  в разложении (9)

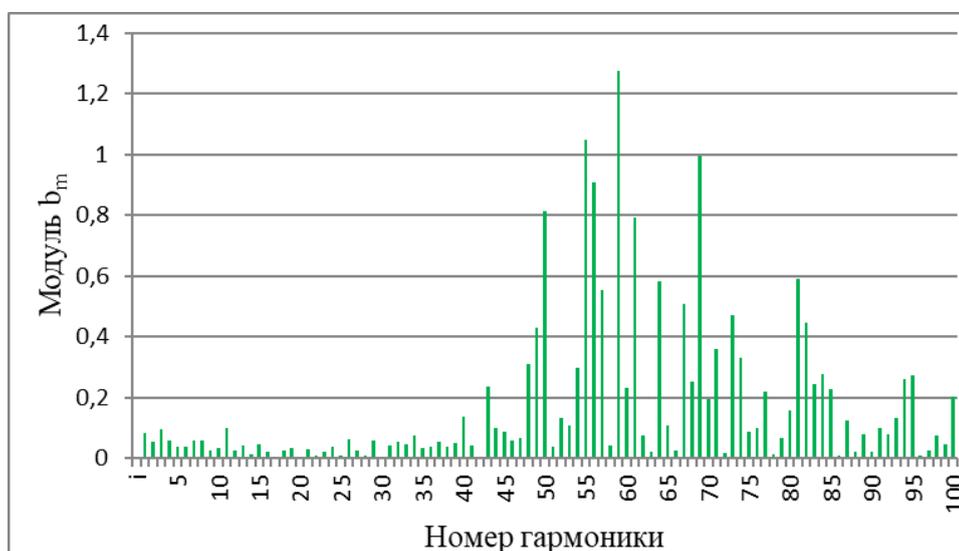


Рисунок 6 – Спектр модулей амплитуд  $b_i$  в разложении (9)

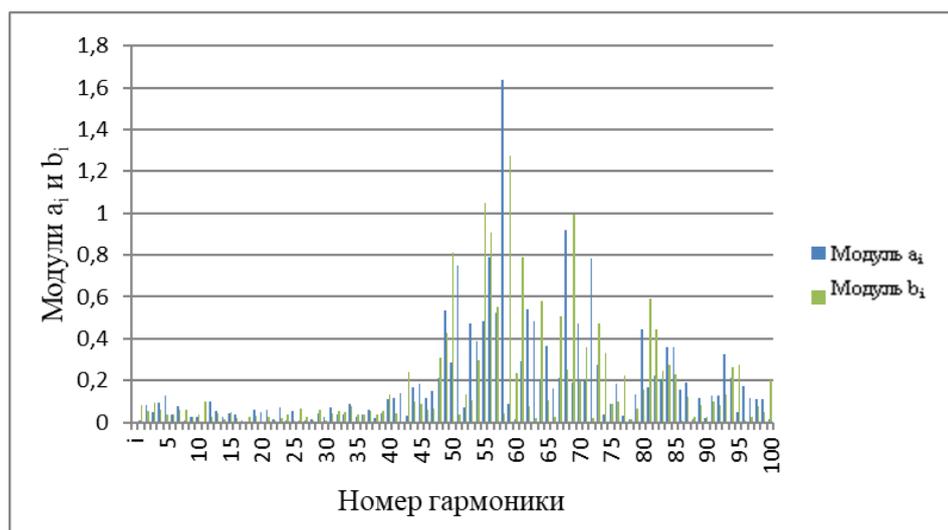


Рисунок 7 – Сопоставление спектров модулей амплитуд  $a_i$  и  $b_i$  в разложении (9)

Спектры модулей амплитуд косинусов  $a_m$  и амплитуд синусов  $b_m$ , определяющих амплитуду  $S_m$  в разложении (9), представлены на рисунках. 5, 6, 7.

Номера гармоник и соответствующие им частоты приведены в таблице 1.

**MANAGEMENT AND MAINTENANCE OF MEANS OF TRANSPORT**

*Таблица 1 – Соответствие частот  $\omega$  и кажущихся периодов  $\tau_k$  волн номерам  $m$  гармоник*

$m$	$\omega_m$	$\tau_k$	$m$	$\omega_m$	$\tau_k$
1	0,005236	1199,996	51	0,267036	23,52934
2	0,010472	599,9981	52	0,272272	23,07685
3	0,015708	399,9987	53	0,277508	22,64144
4	0,020944	299,999	54	0,282744	22,22215
5	0,02618	239,9992	55	0,28798	21,81811
6	0,031416	199,9994	56	0,293216	21,4285
7	0,036652	171,428	57	0,298452	21,05256
8	0,041888	149,9995	58	0,303688	20,33892
9	0,047124	133,3329	59	0,308924	19,99994
10	0,05236	119,9996	60	0,31416	19,67207
11	0,057596	109,0906	61	0,319396	19,35478
12	0,062832	99,99968	62	0,324632	19,04756
13	0,068068	92,3074	63	0,329868	18,74994
14	0,073304	85,71401	64	0,335104	18,46148
15	0,07854	79,99975	65	0,34034	18,18176
16	0,083776	74,99976	66	0,345576	17,91039
17	0,089012	70,58801	67	0,350812	17,647
18	0,094248	66,66645	68	0,356048	17,39125
19	0,099484	63,15769	69	0,361284	17,1428
20	0,10472	59,99981	70	0,36652	16,90135
21	0,109956	57,14268	71	0,371756	16,66661
22	0,115192	54,54528	72	0,376992	16,4383
23	0,120428	52,17375	73	0,382228	16,21616
24	0,125664	49,99984	74	0,387464	15,99995
25	0,1309	47,99985	75	0,3927	15,78942
26	0,136136	46,1537	76	0,397936	15,58437
27	0,141372	44,4443	77	0,403172	15,38457
28	0,146608	42,85701	78	0,408408	15,18983
29	0,151844	41,37918	79	0,413644	14,99995
30	0,15708	39,99987	80	0,41888	14,81477
31	0,162316	38,70955	81	0,424116	14,6341
32	0,167552	37,49988	82	0,429352	14,45779
33	0,172788	36,36352	83	0,434588	14,28567
34	0,178024	35,29401	84	0,439824	14,1176
35	0,18326	34,28561	85	0,44506	13,95344
36	0,188496	33,33323	86	0,450296	13,79306
37	0,193732	32,43233	87	0,455532	13,63632
38	0,198968	31,57885	88	0,460768	13,4831
39	0,204204	30,76913	89	0,466004	13,33329
40	0,20944	29,9999	90	0,47124	13,18677
41	0,214676	29,2682	91	0,476476	13,04344
42	0,219912	28,57134	92	0,481712	12,90318
43	0,225148	27,90689	93	0,486948	12,76592
44	0,230384	27,27264	94	0,492184	12,63154
45	0,23562	26,66658	95	0,49742	12,49996
46	0,240856	26,08687	96	0,502656	12,37109

## СУДОВОЖДЕНИЕ

47	0,246092	25,53183	97	0,507892	12,24486
48	0,251328	24,99992	98	0,513128	12,12117
49	0,256564	24,48972	99	0,518364	11,99996
50	0,2618	23,99992	100	0,5236	12,0000

Имея предварительную информацию о собственном расчётном периоде бортовой качки судна  $T_\theta = 23\text{с}$ , о параметрах ветрового волнения и зыби, а также о параметрах движения судна, можно рассчитать курсовой угол каждого вида волнения и его кажущийся период, таблица 2.

Кажущийся период волнения  $\tau_k$  рассчитывается по формуле

$$\tau_k = \frac{\tau^2}{\tau + \frac{2\pi V}{g \cdot \cos(q)}}, \quad (10)$$

где  $g = 9,806 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}$  – ускорение свободного падения.

*Таблица 2 – Информация о параметрах движения судна и о волнении*

Судно	Курс	105°	Курсовой угол волнения $q$	Кажущийся период волнения $\tau_k$
	Скорость $V$	18,8 уз. = 9,66 м/с		
Ветровое волнение	Направление	90°	15° л/б	2,14 с
	Период $\tau$	4,8с		
	Высота волн $h$	0,7 м		
Зыбь	Направление	338°	127° л/б	18,81 с
	Период $\tau$	13,7с		
	Высота волн $h$	3,4 м		

Анализируя с этими данными рисунки 3, 4, соответствующие расчётные таблицы Excel и таблицу 1, можно видеть, что линейчатый спектр на рисунке 3 имеет один доминирующий экстремум и несколько локальных. Доминирующий экстремум существенно выделяется среди других и приходится на гармонику  $m=58$  с амплитудой  $C=1,637$  и фазовым сдвигом  $\beta=1,544$  радиана. Этой гармонике по таблице 1 соответствует период  $\tau = 20,689$  с.

Согласно теории качки, если в волнении, являющимся внешним возбудителем качки, присутствуют волны с периодом, равным собственному периоду качки, а фазовый сдвиг качки относительно этих волн равен  $\pi/2$ , то наступает явление резонанса. Таким образом, доминирующий экстремум спектра качки соответствует резонансу волнения с собственным периодом бортовой качки судна  $T_\theta = 20,689$  с.

Однако, поскольку частотный ряд дискретный, граничными значениями полученного собственного периода можно взять середину предыдущего и последующего частотных интервалов; это даёт диапазон собственных периодов  $T_\theta$  от 20, 51 до 20,87 с.

Очевидно, различие полученного значения с расчётным собственным периодом качки 23с может быть отнесено как к непродолжительному исследованному периоду записи качки, так и к неточностям судового расчёта, учитывая, что контейнерный груз рассчитывается по задекларированному весу грузоотправителя.

Помимо основного максимума спектра качки, на рисунках 2, 3 обнаруживается ещё несколько, приведённых в таблице 3.

*Таблица 3 – Локальные максимумы спектра  $C_m$  качки и их параметры*

$m$	34	40	43	50	56	61	64	69	72	81
$C$	0,11	0,17	0,24	0,86	1,20	0,84	0,62	1,01	0,78	0,62
$\omega$	0,178	0,209	0,225	0,262	0,293	0,319	0,335	0,361	0,377	0,424
$\tau$	35,3	30,0	27,9	24,0	21,4	19,7	18,8	17,4	16,7	14,8

<i>m</i>	84	87	89	93	100
<i>C</i>	0,45	0,23	0,14	0,35	0,20
$\omega$	0,439	0,456	0,466	0,487	0,524
$\tau$	14,28	13,79	13,48	12,9	12,0

Среди них могут присутствовать гармоника, соответствующая параметрическому резонансу, а также гармоника, соответствующая максимуму спектров ветрового волнения и зыби. Так, на 64 гармонике имеется максимум, соответствующий кажущемуся среднему периоду зыби. Спектр зыби может иметь достаточно широкий диапазон частот, а интерференция разнонаправленных ветровых волн и зыби и дисперсионное соотношение приводят к возникновению групповой и трёхмерной структуры волнения, что может вызывать дополнительные локальные максимумы спектра качки.

Представляет интерес проверка гармоник на параметрический резонанс. Параметрический резонанс возникает только при определённых соотношениях между частотой внешнего воздействия  $\sigma$  и частотой собственных колебаний  $\omega$ . За счёт вертикальной качки восстанавливающий момент бортовой качки становится переменным, что приводит к изменениям в бортовой качке. Опасность возникновения параметрического резонанса оказывается наибольшей [4] при

$$\frac{\sigma}{\omega} = \frac{2}{n}, \quad (11)$$

где  $n = 1, 2, 3, \dots$

Полагая  $\omega = 0,303688$  при  $m = 58$ , найдём по (11) частоты параметрического резонанса  $\sigma = \omega_{\text{пар}} = 0,607376; 0,303688; 0,202458; 0,151844; 0,121475; 0,101229, \dots$

Дополнительный расчёт на частотах, близких к частоте первого параметрического резонанса, представлен в таблице 4.

Фазовый сдвиг  $\beta$ , близкий к  $\pi/2$ , пришёл на 116 гармонику, тогда как максимальная амплитуда соответствует 115 гармонике. В таком случае собственный период качки  $T_{\theta} = 2\pi/115 = 20,86\text{с}$ .

*Таблица 4 – Проверка амплитуд и фазовых сдвигов вблизи первого параметрического резонанса*

<i>m</i>	$\omega_{\text{пар}}$	$\tau_k$	<i>C</i>	$\beta$
113	0,59167	10,62	0,18441	0,816
114	0,59690	10,53	0,23986	1,353
115	0,60214	10,43	0,29349	-0,586
116	0,60738	10,34	0,08927	1,5596
117	0,61261	10,26	0,12333	0,9907

Анализ спектра на следующих за основным резонансом частотах параметрического резонанса представлен в таблице 5.

*Таблица 5 – Анализ спектра на частотах, близких к частотам параметрического резонанса*

$\omega_{\text{пар}}$	Ближкие частоты		<i>C</i>	$\beta$	Примечание
	<i>m</i>	$\omega$			
0,202458	40	0,20944	0,17379	0,681	Локальный max
0,151844	29	0,15184	0,07390	-0,65	Локальный max
0,121475	23	0,12043	0,07301	-1,258	Локальный max
0,101229	20	0,10472	0,04951	1,487	Локальный max

Как видно из таблицы 5, в спектре  $C_m$  обнаруживаются локальные максимумы, более или менее близкие к частотам параметрического резонанса. Например, по параметрической гармонике  $m = 29$  собственный период качки также составляет 20,689 с.

В целом поиск объяснений существования других локальных максимумов ещё необходимо вести. Однако, сравнение их с фазово-частотной характеристикой качки показывает в большинстве случаев отсутствие фазового сдвига, характерного для резонансных условий. Поэтому есть основание считать эти частоты отнесёнными к параметрам сложного волнения и ставить новую задачу определения параметров этого волнения по выявленным кажущимся частотам локальных максимумов, не относящихся к основной или параметрической качке судна.

Гармонический анализ с уверенностью выделяет основной резонансный режим, соответствующий собственному периоду качки судна. Качка на наиболее вероятном волнении присутствует в спектре, однако заметным образом среди других локальных максимумов не выделяется. Параметрический резонанс также выявлен на нескольких частотах, хотя он присутствует и не выделенно.

Объём вычислений при гармоническом анализе довольно значительный, однако, расчётные схемы не сложные, а вмешательства оператора в расчётный алгоритм до формирования спектра качки не требуется. Имеются методы уменьшения объёма вычислений.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н.Бронштейн, К.А.Семендяев. – М.: Наука, 1964. – 608 с.
2. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н.Бронштейн, К.А.Семендяев. Под ред. Г.Гроше, В.Циглера. – 13 издание. – М.: Наука, 1986. – 544 с.
3. Жовинский А.Н. Инженерный экспресс-анализ случайных процессов / А.Н.Жовинский, В.Н.Жовинский. – М.: Энергия, 1979. – 112 с.
4. Ремез Ю.В. Качка корабля / Ю.В.Ремез. – Л.: Судостроение, 1983. – 328 с.

**REFERENCES**

1. Bronstein I.N. Handbook of mathematics for engineers and students of technical colleges / I.N. Bronshtein, K.A. Semendyaev. – M.: Nauka, 1964. – 608 p.
2. Bronstein I.N. Handbook of mathematics for engineers and students of technical colleges / I.N. Bronshtein, K.A. Semendyaev. Ed. G. Grosche, W. Ziegler. – 13th edition. – M.: Nauka, 1986. – 544 p.
3. Zhovinsky A.N. Engineering express analysis of random processes / A.N. Zhovinsky, V.N. Zhovinsky. – M.: Energy, 1979. – 112 p.
4. Remez Yu.V. Rocking the ship / Yu.V. Remez. - L. : Shipbuilding, 1983. - 328 p.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:**

*гармонический анализ, бортовая качка, частотный спектр качки, собственный период качки.*

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

*Сичкарев Виктор Иванович, д-р техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «СГУВТ»  
Умрихин Виктор Павлович, канд. техн. наук ФГБОУ ВО «СГУВТ»*

**ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:**

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

## ВЛИЯНИЕ ИЗНОСА ПОРШНЕЙ НА ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДИЗЕЛЯ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

А.В. Мукасеев, Б.О. Лебедев, О.Б. Лебедев

### INFLUENCE OF PISTON WEAR ON DIESEL ECONOMIC INDICATORS

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

Alexander V. Mukaseev (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)

Boris O. Lebedev (D. of Engineering Sciences, Prof. of SSUWT)

Oleg B. Lebedev (Senior Lecture of SSUWT)

**ABSTRACT:** The piston group of diesel engines (including marine ones) is the weakest in terms of durability and reliability. The fact is that on the river, depending on certain conditions, such as shallow water, rifts, etc., sometimes it is necessary to force the main ship engines. The navigator quite often faces the question of what to choose: either to force diesel engines and prevent an emergency, or to keep the diesel engine working and endanger the ship. One of the weakest links in SIDS are the piston grooves of the compression rings, as they wear out very quickly. The experiment was carried out on a stationary installation, where pistons with worn grooves for compression rings were installed. The installation was put into operation and brought to the nominal mode. Measurements of the required parameters were made at the operating temperature of the coolant and oil. After that, fuel consumption, crankshaft rotation frequency, and torque were determined. The results showed that groove wear contributes to increased oil consumption.

**Keywords:** diesel, piston, heat, wear, consumption

Поршневая группа дизелей (судовых в том числе) является наиболее слабой с точки зрения долговечности и надежности. Дело в том, что на реке в зависимости от некоторых условий, таких как мелководье, перекаты и т.п., иногда приходится форсировать главные судовые двигатели. Перед судоводителем довольно часто возникает вопрос о том, что выбрать: либо форсировать дизели и предотвратить аварийную ситуацию, либо сохранить работоспособность дизеля и подвергнуть судно опасности. Одним из самых слабых звеньев СДВС являются поршневые канавки компрессионных колец, так как они очень быстро изнашиваются. Эксперимент проводился на стационарной установке, где были установлены поршни с износом канавок под компрессионные кольца. Установку запускали в работу и выводили её на номинальный режим. Замеры нужных параметров делали при рабочей температуре охлаждающей жидкости, и масла. После этого определяли расход топлива, частоту вращения коленвала крутящий момент. Результаты показали, что износ канавок, способствует увеличению расхода масла.

Опыт эксплуатации судовых дизелей показывает, что одной из самых слабых звеньев в работе судовых ДВС являются поршни, особенно в случае форсировки. Это способствует возрастанию тепловой нагрузки.

На речных судах наибольшее распространение получили дизели Ч18/20, Ч15/18, Ч10,5/13 и Ч8,5/11. Эксплуатация судов на подводных крыльях и воздушной подушке требует применения судовых двигателей с малыми массой и габаритными размерами. Однако высокооборотные дизели имеют ряд недостатков, в том числе и малый моторесурс.

На речных судах в определенные моменты их эксплуатации периодически приходится форсировать главные судовые двигатели из-за ряда причин (мелководье, перекаты и т.д.). Перед судоводителем возникает выбор о том, что необходимо форсировать дизели и избежать аварии, либо сохранить работоспособность двигателей и попасть в аварийную ситуацию.

Форсировка двигателей отражается в работе на ухудшении свойств поршневых групп. Это отражено результаты эксплуатации дизелей Ч15/18 теплоходов Енисейского пароходства. Это подтверждаются материалами таблицы 1, где приведены данные по отказам двигателя 6ЧН15/18.

Поломка поршней занимает одно из первых мест у СДВС Ч18/20 [4].

Поршневые канавки алюминиевых поршней изнашиваются с большой скоростью и у высокооборотных судовых двигателей, и у двигателей с повышенной оборотностью. Проанализировав скорость износа поршневых канавок СДВС 6ЧНСП16/22,5, можно сделать вывод о том, что в среднем срок эксплуатации поршня не превышает 2500 ч. Аналогичные ситуации

возникают и у поршней двигателей средней оборотности, например, 6ЧСП 18/22.

*Таблица 1 – Основные неисправности судовых двигателей внутреннего сгорания*

Причина	Процент отходов
Дымность двигателя и прогары поршней	45
Разрыв шпилек сшивных	18
Выход из строя коленвала	9
Выход из строя подшипников коленвала (заклинивание)	7
Дефекты шатуна, в том числе обрыв	5
Повышенный износ коленвала	4
Выход из строя картера (излом)	4
Выход из строя реверс-редуктора	3

Проанализировав вышеуказанные работы, можно наблюдать, что часто встречающиеся дефекты поршней - это поломка перемычек между канавками; потеря подвижности; утрата подвижности и залегание колец; оплавление днища и отдельных участков боковой поверхности головки; наплаивания и натирания поршня.

Также замечено, что у СДВС 6ЧСП18/22 при ремонте заменяют около 70 % поршней и 100 - поршневых колец.

Повышенный износ поршней приводит к увеличению потери рабочего тела из КС. Потери вызывают:

- термический КПД СДВС снижается;
- индикаторный КПД СДВС снижается;
- ухудшение параметров смесеобразования;
- и т.д..

Все это подтверждается целым рядом исследований [2,3 и др.]

Увеличение расхода смазочного масла [3] для дизеля 6ЧСП15/18 представлено в таблице 2.

*Таблица 2 – Расход смазочного масла СДВС 6ЧСП15/18*

Работа СДВС	Масла расход, г/с	Масла расход (увеличение), %
0-2	0,155	100
2-4	0,178	115
4-6	0,200	120
6-8	0,203	130

То есть, одни из слабых звеньев СДВС – это канавки поршневых компрессионных колец. Также был определен химанализ поршня. Результаты представлены в таблице 3.

*Таблица 3 – Химсостав алюминиевого сплава поршня*

Характеристики поршня	Si	Mg	Fe	Mn	Cu	Ni	Al	Материалотвердость
Верх	0,62	1,68	1,11	0,06	1,95	1,12	Ост.	790
Низ	0,65	1,66	1,11	0,07	1,96	1,09	Ост.	790
Сплава состав по стандарту	0,6-1,3	1,5-1,9	0,9-1,4	0,3	1,8-2,6	0,9-1,4	Ост.	1200

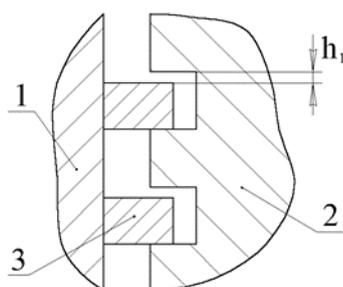
Одной из причин оплавления алюминиевых поршней является ухудшение отвода теплоты, ухудшение условий смазки, а также несоответствие химического состава сплава. Для уточнения этого был проведен химический анализ поршней. Результаты сравнения сплавов показывают, что материал поршней удовлетворяет требованиям стандартов. Наблюдается снижение твердости. Разупрочнение сплава происходит вследствие воздействия высоких температур. Твердость снижается одинаково в верхней и в нижней части поршня.

Исследования проводим на установке с двигателем 2Ч8,5/11. Основные данные приведены в таблице 4.

*Таблица 4 – Основные данные двигателя 2С8,5/11 [4]*

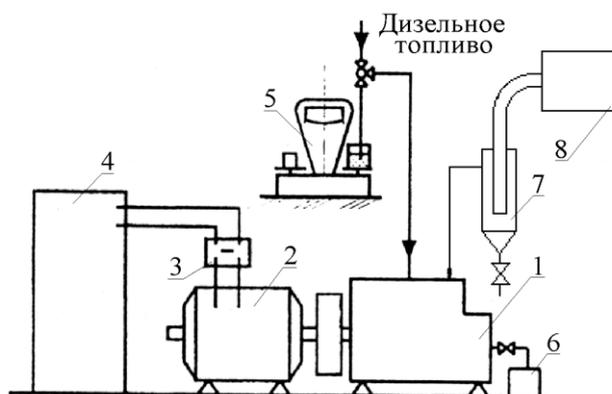
Наименование параметра	Размерность параметра	Величина параметра
Цилиндра объем	м <sup>3</sup>	6,2·10 <sup>-4</sup>
Вращения частота	мин <sup>-1</sup>	1500
Мощность номинальная	кВт	8,83
Смесеобразования способ	–	вихрекамерный
Сжатия степень	–	17
Расход топлива удельный эффективный	г/(кВт·ч)	272
Расход масла удельный эффективный	г/(кВт·ч)	5,50
Допустимый размер зазора между поршнем и втулкой	мм	0,20-0,29
Допустимый зазор между поршнем и втулкой	мм	0,5
Цилиндра объем	м <sup>3</sup>	6,2·10 <sup>-4</sup>
Вращения частота	мин <sup>-1</sup>	1500
Мощность номинальная	кВт	8,83
Смесеобразования способ	–	вихрекамерный

Замеряли при значениях зазора между поршнем и втулкой цилиндра: 0,2 и 0,37 мм. При исследовании меняли зазор: 0,2; 0,4 и 0,8 мм.



*Рисунок 1 – Поршневой узел: 1-втулка цилиндра; 2-поршень; 3-кольца компрессионные*

Экспериментальная установка представлена на рисунке 2.



*Рисунок 2 – Установка для обследования износов канавок под поршневые кольца: 1-двигатель, 2- электротормоз, 3 – переключатель, 4 - реостат, 5 - весы, 6 – емкость, 7 – сепаратор, 8- счетчик газа.*

На СДВС установили поршни с износом канавок под поршневые кольца. Измеряли параметры при выравнивании температуры охлаждающей воды двигателя, масла, выпускных газов. Замеры производились 7 раз согласно рекомендациям [5].

По параметрам измерений строим график.

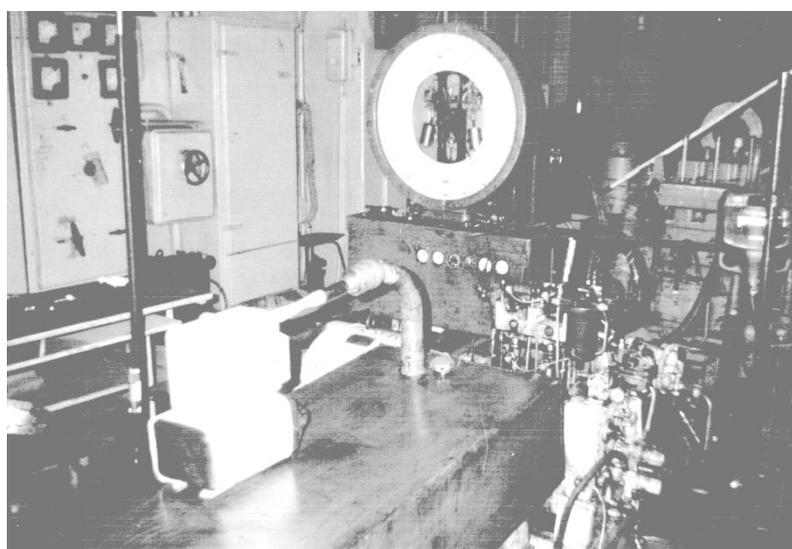
Опыты производились на номинальном режиме работы ( $N_e=8,82$  кВт,  $n=1500$  мин<sup>-1</sup>).

При этом определяли: частоту вращения коленвала; крутящий момент; расход топлива; расход смазочного масла.

По результатам замеров определили мощность эффективную; расход топлива эффективный удельный [6].

*Таблица 5 – Основные данные двигателя 248,5/11 [4]*

Характеристика	Параметр
Избыточное давление	50 кПа
Погрешность :	
– от $V_{min}$ до $2 V_{max}$	$\pm 3 \%$
– от $2 V_{min}$ до $V_{max}$	$\pm 2 \%$
Температур диапазон	-40 °С - +50 °С



*Рисунок 3 – Экспериментальная установка*

Результаты приведены в таблице 6, из которой можно сделать вывод о том, что при переходе зазора  $h_1=0,2$  мм к  $h_1=0,4$ ; 0,8 мм наблюдается снижение утечки из КС СДВС. Здесь происходит уменьшение расход топлива. Но при росте  $h_1$  они возрастают.

Исследования показывают, что при износе канавок под поршневые кольца СДВС Ч8,5/11 на величину 0,3 мм расход масла увеличивается примерно в 14 раз [7].

*Таблица 6 – Результаты испытаний*

№ варианта	Зазор, $h$ , мм	№ канавки	Зазор, $h_1$ , мм	Расход топлива, кг/ч	Расход масла, г/ч	Утечка газов, мЗ/ч
1	0,2	1	0,2	2,400	49	0,80
		2	0,2			
		3	0,2			
2	0,2	1	0,4	2,355	75	-
		2	0,2			
		3	0,2			
3	0,2	1	0,4	2,360	95	-
		2	0,4			
		3	0,2			
4	0,2	1	0,4	2,360	105	-
		2	0,4			

		3	0,4			
5	0,2	1	0,8	2,370	110	-
		2	0,4			
		3	0,4			
6	0,2	1	0,8	2,375	121	-
		2	0,8			
		3	0,4			
7	0,2	1	0,8	2,390	133	-
		2	0,8			
		3	0,8			
8	0,37	1	0,2	2,470	106	1,24
		2	0,2			
		3	0,2			
9	0,37	1	0,4	2,410	125	1,39
		2	0,4			
		3	0,4	2,410	125	1,39
10	0,37	1	0,8	2,465	135	1,37
		2	0,4			
		3	0,4			
11	0,37	1	0,8	2,570	146	1,48

Сказано, что состояние деталей ЦПГ СДВС оказывает влияние на качество работы. Их износ приводит к снижению экономических показателей работы дизеля.

При больших расходах топлива и смазочного масла двигатель разбирают, заменяют поршневые кольца, а либо отбраковывают и сами поршни. Эта операция весьма дорогая.

Возникает задача исследовать износ канавок под поршневые кольца.

На основании результатов испытаний представляется возможность составить механизм разрушения поршней судовых дизелей.

При работе двигателя происходит износ поршневых канавок. Это вызывает «залегание» поршневых колец. В определенный момент наступает прорыв газов в картер. При форсировке двигателя разрушение поршня возрастает.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Sh. Khusainov, A. A., Glushchenko, Theoretical Prerequisites for Lowering Piston Temperature in Internal Combustion Engines. *Procedia Engineering*, Volume 150, 2016, Pages 1363-1367
2. InturiVamsi, G.R.Sabareesh, P.K.Penumakala, Comparison of condition monitoring techniques in assessing fault severity for a wind turbine gearbox under non-stationary loading. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 124, 1 June 2019, Pages 1-20.
3. S.Spiller, C.Lenauer, T.Wopelka, M.Jech, Real time durability of tribofilms in the piston ring – cylinder liner contact, *Tribology International*, Volume 113, September 2017, Pages 92-100.
4. G.P.Celata, M.Cumo, D.Gallo, A.Mariani, G.Zummo, A Photographic study of subcooled flow boiling burnout at high heat flux and velocity, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 50, Issues 1–2, January 2007, Pages 283-291.
5. Natáliade Assis Brasil Weber, Bárbara Pachecoda Rocha, PauloSmith Schneider, Luiz CarlosDaemme, Renatode Arruda Penteadode Neto, Energy and emission impacts of liquid fueled engines compared to electric motors for small size motorcycles based on the Brazilian scenario, *Energy*. Volume 168, 1 February 2019, Pages 70-79.
6. Himani, RatnaDah, Condition monitoring of wind turbine for rotor fault detection under non stationary conditions, *Ain Shams Engineering Journal*, Volume 9, Issue 4, December 2018, Pages 2441-2452.

## REFERENCES

- Theoretical Prerequisites for Lowering Piston Temperature in Internal Combustion Engines. *Procedia Engineering*, Volume 150, 2016, Pages 1363-1367
2. InturiVamsi, G.R.Sabareesh, P.K.Penumakala, Comparison of condition monitoring techniques in assessing fault severity for a wind turbine gearbox under non-stationary loading. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 124, 1 June 2019, Pages 1-20.
  3. S.Spiller, C.Lenauer, T.Wopelka, M.Jech, Real time durability of tribofilms in the piston ring – cylinder liner contact, *Tribology International*, Volume 113, September 2017, Pages 92-100.
  4. G.P.Celata, M.Cumo, D.Gallo, A.Mariani, G.Zummo, A Photographic study of subcooled flow boiling burnout at high heat flux and velocity, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 50, Issues 1–2, January 2007, Pages 283-291.
  5. Natáliade Assis Brasil Weber, Bárbara Pachecoda Rocha, PauloSmith Schneider, Luiz CarlosDaemme, Renatode Arruda Penteadode Neto, Energy and emission impacts of liquid fueled engines compared to electric motors for small size motorcycles based on the Brazilian scenario, *Energy*. Volume 168, 1 February 2019, Pages 70-79.
  6. Himani, RatnaDah, Condition monitoring of wind turbine for rotor fault detection under non stationary conditions, *Ain Shams Engineering Journal*, Volume 9, Issue 4, December 2018, Pages 2441-2452.
  7. MustafaKaragoz, CuneytUysal, UmitAgbulut, SuatSaridemir, Energy, exergy, economic and sustainability assessments of a compression ignition diesel engine fueled with tire pyrolytic oil diesel blends, *Journal of Cleaner Production*, Volume 264, 10 August 2020, 12172.

7. MustafaKaragoz, CuneytUysal, UmitAgbulut, SuatSaridemir, Energy, exergy, economic and sustainability assessments of a compression ignition diesel engine fueled with tire pyro-lytic oil-diesel blends, Journal of Cleaner Production, Volume 264, 10 August 2020, 12172.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *дизель, поршень, теплота, износ, расход*  
**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:** *Мукасейев Александр Владимирович, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»*  
*Лебедев Борис Олегович, д-р техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «СГУВТ»*  
*Лебедев Олег Борисович, старший преподаватель ФГБОУ ВО «СГУВТ»*  
**ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:** *630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»*

## **СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ СОЕДИНЕНИЙ ТВЕРДОГО СПЛАВА И СТАЛИ, ПАЯНЫХ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫМ ПРИПОЕМ (НА ПРИМЕРЕ ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА)**

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный аграрный университет»

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

**В.В. Коноводов, Е.В. Агафонова, В.Н. Хрянин, Е.С. Губин**

### **STRUCTURE FORMATION OF HARD ALLOY AND STEEL JOINTS BRAZED WITH IRON-CARBON SOLDER (ON THE EXAMPLE OF A CAR-BIDE TOOL)**

Novosibirsk State Agrarian University (NSAU), 160, Dobrolyubova St., Novosibirsk, 630039, Russia  
Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630039, Russia  
**Vitaly V. Konovodov** (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of NSAU)

**Ekaterina V. Agafonova** (Senior Lecturer of NSAU)

**Victor N. Khryanin** (.D. of Engineering Sciences, Prof. of NSAU)

**Eugene S. Gubin** (Postgraduate of SSUWT)

**ABSTRACT:** The reason for the low level of reliability of the used blade tools made according to traditional technologies (solder based on copper or silver) is the insufficient strength of the connection between the cutting plates and the tool body. This work is based on theoretical substantiations and experimental processing of the composition and mode of soldering carbide tools with a new iron-carbon solder. The purpose of the study is to establish the patterns of structure formation of hard alloy and steel joints brazed with iron-carbon solder. The paper substantiates the technological properties of iron-carbon solder and formulates the basic requirements that a new type of solder must satisfy. Methods and particular techniques are presented: smelting and preparation of solder; technique of microstructural studies of solder, hard alloy and brazed joint; soldering of carbide tools with iron-carbon solder. The results of studies on the permissible heating rates of hard-alloy plates during soldering are presented. According to the results of experimental studies of structure formation in relation to the developed composition of iron-carbon solder, it was found that the technological modes provide the formation of a given graphite-pearlite-cementite microstructure of the weld, with indicators of a high-quality brazed joint: the diffusion zone at the boundary "hard alloy - solder" is not less than 0.1 mm; the presence in the microstructure of the weld of a graphite-pearlite-cementite zone with a thickness of 0.3 ... 0.4 mm.

**Keywords:** *soldering, iron-carbon solder, brazed joint, carbide tool, structure formation, microstructure*

Причиной низкого уровня надежности применяемых лезвийных инструментов, изготовленных по традиционным технологиям (припой на основе меди или серебра), является недостаточная прочность соединения режущих пластинок с корпусом инструмента. В основе данной работы лежат теоретические обоснования и экспериментальная обработка состава и режима пайки твердосплавных инструментов новым железоуглеродистым припоем. Цель исследования заключается в установлении закономерности структурообразования соединений твердого сплава и стали, паяных железоуглеродистым припоем. В работе обоснованы технологические свойства железоуглеродистого припоя и сформулированы основные требования, которым должен удовлетворять припой нового типа. Представлены методы и частные методики: выплавки и приготовления припоя; методика микроструктурных исследований припоя, твердого сплава и паяного соединения; пайки твердосплавных инструментов железоуглеродистым припоем. Приведены результаты исследований по допустимым скоростям нагрева твердосплавных пластин при пайке.

Отказы твердосплавных инструментов связаны не только с износом, но и с разрушением режущей части, особенно при обработке труднообрабатываемых материалов.

Работоспособность паяного твердосплавного инструмента обеспечивается: прочностью

и жесткостью элементов конструкции инструмента (твердосплавной пластинки, паяного соединения и державки); уровнем и характером распределения напряженного состояния в элементах резца; отсутствием дефектов.

Практика металлообработки показывает, что прочность рабочей части сборного инструмента и его стойкость в значительной мере зависят от процессов, происходящих в зоне соединения режущего элемента и корпуса, причем физико-механические свойства паяного соединения определяют работоспособность, как самого соединения, так и оказывает существенное влияние на прочность режущего элемента, а, следовательно, определяют и общую работоспособность инструмента в целом [1].

Способы изменения состава и свойств припоев в современных условиях развития инструментального производства весьма ограничены преимущественным использованием припоев на основе сплавов меди и серебра. Основными недостатками этих припоев следует считать: недостаточно высокий уровень прочности, особенно при повышенных температурах эксплуатации инструмента; плохая паяемость сплавов с низким содержанием кобальта, титано-вольфрамовых и безвольфрамовых твердых сплавов; высокая рассогласованность по температурному коэффициенту линейного расширения (ТКЛР) с твердым сплавом и сталью.

Определенного внимания заслуживают литейные технологии, на основе которых разработаны способы получения литого соединения, однако, широкого применения в металлообработке литой твердосплавный инструмент не получил в силу технологических ограничений: изготовления корпуса инструмента из чугуна, механические свойства которого по ряду требований, предъявляемых к державке уступают стальному; а также сложности с оснащением инструмента титано-вольфрамовыми и безвольфрамовыми твердыми сплавами.

Надежность паяного инструмента с использованием железоуглеродистого припоя (FeC-припоя) значительно возрастает, одним из достоинств такого инструмента является формирование высокопрочного ( $\sigma_{ср} = 540 \dots 600$  МПа) и жесткого (НВ 2600...3400) соединения, позволяющего эксплуатацию при рабочей температуре до 600 °С.

Цель исследования заключается в установлении закономерности структурообразования соединений твердого сплава и стали, паяных FeC-припоем.

В соответствии с поставленной целью в процессе исследований необходимо решить следующие задачи:

1. выявить закономерности структурообразования паяных соединений твердого сплава и стали и разработать состав FeC-припоя;

2. обосновать структурный состав и рациональные технологические режимы пайки твердосплавного инструмента FeC-припоем, обеспечивающие высокую прочность режущей части и релаксацию напряжений.

- 2.1. Обоснование технологических свойств инструментального железоуглеродистого припоя

Анализ и производственный опыт эксплуатации позволяет сделать вывод, что применяемые в настоящее время припои, преимущественно на основе медных сплавов, не удовлетворяют требованиям производства. Более перспективным направлением создания паяного твердосплавного инструмента является разработка припоев нового типа. При этом применение этих припоев должно гарантировать более высокий качественный уровень инструмента при рациональном расходе дефицитного дорогостоящего твердого сплава [2]

Следовательно, основные требования, которым должен удовлетворять припой нового типа в сравнении с известными следующие:

1. более высокие механические свойства материала припоя, особенно в интервале повышенных эксплуатационных температур, что обеспечит высокую прочность и жесткость паяного соединения, а, следовательно, эксплуатационную надежность и повышенный ресурс инструмента;

2. достаточная жидкотекучесть и смачиваемость паяемых поверхностей твердого сплава и стали расплавом припоя;

3. меньшее различие по ТКЛР между материалом припоя и соединяемыми материалами – твердым сплавом и сталью [3];

4. способность материала припоя к релаксационным процессам в паяном шве;

5. температурный интервал технологического процесса пайки должен соответствовать температуре структурно-фазовых превращений инструментального и конструкционного материалов.

- 2.2. Выплавка и приготовление железоуглеродистого припоя

Припой получали в три этапа в результате переплава стали с добавлением необходимых элементов в соответствии с заданным химическим составом (патент РФ №5036802, авторы Коноводов В. В., Глазачев С. У., Каллойда Ю. В., Малышко А. А.) на высокочастотной плавильно-закалочной установке ЛПЗ-67М. На первом этапе, в тигле соединяли сталь У8А, сталь 20 и порошок графита. На втором этапе, в готовый расплав добавляли порошок ферросилициума марки ФС75 и ФС45. На третьем этапе, после соответствующей выдержки в расплав добавлялась стружка меди М1. Контроль температуры расплава осуществляли оптическим пирометром.

Перед заливкой припоя проводилось раскисление расплава в тигле с добавлением стружки алюминиевого сплава. В качестве формы использовались кокили из электродного графита с внутренним диаметром 160 мм, установленные в металлические опоки с засыпкой из песка.

Пластинки припоя получали вырубкой из дисков толщиной 1.5...2 мм, срезанных от отливок на токарном станке. Таблитизированный припой изготавливался из стружки прессованием.

2.3. Методика микроструктурных исследований припоя, твердого сплава и паяного соединения

Подготовка микрошлифов включала следующие операции:

- вырезка образца от средней части отливки для изучения исходной микроструктуры;
- аналогично, для паяного соединения изготавливались поперечные и продольные микрошлифы;
- микрошлифы готовились по известной схеме: шлифование, полирование, травление (микроструктуры до и после травления).

Травление шлифов проводили известными реактивами (0,5...6 % раствор азотной кислоты в этиловом спирте), для выявления микроструктуры твердых сплавов применяли травители, (ГОСТ 9391-80), при этом оценивалась пористость и состояние  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  и  $\zeta$  фаз.

Исследования микроструктуры осуществляли на металлографических микроскопах МИМ-7, МИМ-8М при увеличении 80...1350 раз. Увеличение при фотографировании составляло 40...1800 раз, при печатании фотографий  $\times 3...7$ . Для определения увеличения при измерениях отдельных элементов структуры использовали окуляр-микрометры с ценой деления шкалы 0.1 мм, при фотографировании применяли объект-микрометр с ценой деления  $1 \times 10^{-3}$  м.

Исследование микроструктурных изменений в твердых сплавах, имеющих место после нагрева их до температуры пайки железоуглеродистыми припоями, проводили для сплавов марок: ВК8, Т15К6, КНТ16, ТН20. Для работы использовали шестигранные пластинки (ГОСТ 19047-80), которые исследовались (ГОСТ 9391-80) до и после термического воздействия и имитаций процесса пайки FeC-припоем (нагрев до  $t_p = 1200$  °С, выдержка до 30с при температуре пайки, охлаждение на воздухе с последующим отпуском при  $t = 200...250$  °С в течение 3...6 часов).

2.4. Пайка твердосплавных инструментов железоуглеродистым припоем

Исследования составов припоев и режимов пайки производили на образцах 16x25x50 из стали 45 и У7 и образцах для испытаний на прочность, на которые напайвали твердосплавные пластинки марок ВК8, Т15К6, Т30К4, КНТ16, ТН20. Для проведения лабораторных и производственных испытаний производили пайку твердосплавных резцов с сечением державки 16x10x100, 25x16x140, 32x25x170 и 40x32x200 различной номенклатуры, также для производственной эксплуатации изготавливались партии (по 10...100 шт.) различных специальных инструментов широкой номенклатуры [4].

Пайку осуществляли с использованием индукционного нагрева высокочастотной установкой ЛПЗ-67М. Скорость нагрева варьировалась в пределах оптимизации технологической операции формирования паяного шва с ограничением максимально допустимой скорости нагрева твердых сплавов в зависимости от марки и размеров пластинок, в соответствии с таблицей 1.

Экспериментальное исследование структурообразования проводилось применительно к разработанному составу железоуглеродистого припоя (патент РФ №5036802, авторы Коноводов В. В., Глазачев С. У., Каллойда Ю. В., Малышко А. А.), позволяющему, как было установлено результатами предварительных экспериментов, формировать графитно-перлитно-цементитной микроструктуры материала паяного шва в соединении «твердый сплав – припой – сталь» в пределах наложенных технологических ограничений.

*Таблица 1 – Допустимые скорости нагрева твердосплавных пластин при пайке, °С/с*

Толщина пла- стинки, мм	Т30К4	Т15К6, ВК6-0М	Т5К10, ВК6	ВК8	КНТ16, ТН20
до 4,5	32	42	60	100	25
от 5 до 7	20	26	40	65	15
от 7 до 12	10	12	20	32	10

Конструктивно-технологическими режимами, определяющими физические процессы структурообразования паяного соединения, являются:

- скорость нагрева,  $V_n$ , град-с-1;
- температура пайки,  $t$ , °С;
- время выдержки при температуре пайки,  $t_v$ , с;
- толщина паяного шва,  $h_p$ , мм;
- скорость охлаждения,  $V_{охл}$ , град с-1.

Экспериментальные исследования влияния технологических режимов на структурообразование проводились варьированием факторов в пределах наложенных технологических ограничений. На основании рассмотренных положений о влиянии технологических режимов на формирование качественного паяного соединения «твердый сплав – FeC-припой – сталь» определялось влияние скорости нагрева под пайку на температуру начала плавления припоя, наличие ваточного графита, структурное состояние металла шва и состояние паяного соединения в целом, результаты приведены в таблице 2.

Из результатов микроструктурных исследований следует, что с увеличением скорости нагрева возрастает температура начала плавления припоя. Причем, температуру плавления припоя в интервале скоростей нагрева 15...60 град-с-1 следует считать приемлемой.

*Таблица 2 – Результаты исследования состояния паяного соединения от скорости нагрева под пайку*

Скорость нагрева, $V_n$ , град-с-1	Температура начала плавления припоя, $t$ , °С	Наличие остаточного графита об. %	Состав структуры (охлаждение на воздухе)	Состояние паяного соединения
5	1147	0...0.2	цементит + перлит	Трещины в твердом сплаве
15	1147	0.5...0.8	графит + перлит + цементит	Трещин в сплавах ТН20, Т30К4, КНТ16, Т15К6 нет
30	1147...1153	0.7...0.9	графит + перлит + цементит	Трещин в сплавах ВК8, Т15К6, Т5К10 нет
60	1147...1174	0.6...1.0	графит + перлит + цементит	Трещин в сплаве ВК8 нет
100	1198...1216	0.3...1.4	графит + перлит + цементит и цементит + перлит	Структурная неоднородность, трещины в сплаве

По результатам экспериментальных исследований влияния скорости нагрева на структурообразование паяного соединения «твердый сплав – FeC-припой – сталь» следует вывод, что, нагрев под пайку твердосплавного инструмента железомуглеродистым припоем со скоростью 15...60 градус-с-1 обеспечивает формирование графитно-перлитно-цементной микроструктуры паяного шва, что укладывается в интервал допустимых скоростей нагрева твердосплавных элементов широкой номенклатуры. Данное обстоятельство позволяет использовать исследуемый FeC-припой для изготовления твердосплавных инструментов с режущими элементами, наиболее эффективными при обработке, например, наплавленных поверхностей [5].

Температура пайки при высокочастотном нагреве обуславливается температурой плавления исходного железомуглеродистого припоя (1147 °С) и перенагревом, величина которого, как было рассмотрено в таблице 1, зависит от скорости нагрева. При теоретическом обосновании активности применения железомуглеродистых припоев для производства твердосплавного инструмента было установлено, что температура пайки не должна превышать 1200 °С, так как с учетом перенагрева вероятен перегрев твердого сплава, приводящий к структурным изменениям и снижающий их режущие свойства.



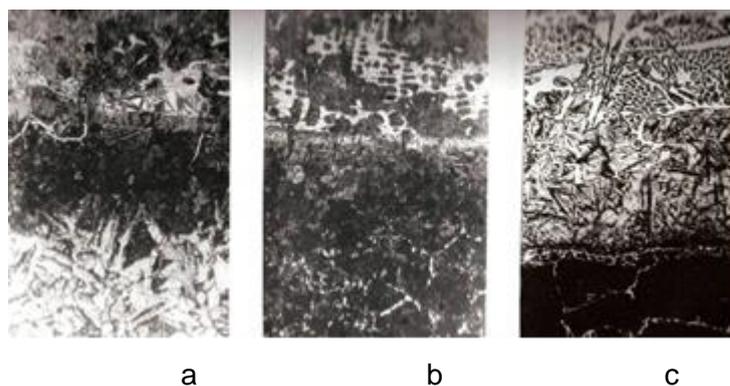


Рисунок 3 – Зона диффузионного взаимодействия припоя и стали: а – FeC-припой – сталь Ст3; б – FeC-припой – сталь 45,  $\times 100$ ; с – граничный слой FeC-припой – сталь 45,  $\times 400$ .

По проведенным металлографическим исследованиям можно заключить, что разработанный состав FeC-припоя и исследованные технологические режимы пайки обеспечивают теоретически обоснованное структурное состояние паяного соединения «твердый сплав – FeC-припой – сталь», которое гарантирует релаксацию напряжений при достаточно высокой прочности и жесткости паяного соединения режущего элемента и корпуса инструмента.

Анализ результатов экспериментальных исследований влияния конструктивно-технологических факторов на структурообразование и зависимостей свойств паяных соединений твердых сплавов и сталей от структурного состояния шва позволяют установить режимы пайки твердосплавных инструментов разработанным FeC-припоем:

- скорость нагрева под пайку 15...60 град·с<sup>-1</sup>, но не превышающая допустимую скорость нагрева для соответствующих твердосплавных пластинок;
- температура пайки не более 1200 °С;
- время выдержки при температуре пайки (припоя в жидкой фазе) 5...7 с;
- толщина паяного шва 0.5...0.6 мм при пайке твердого сплава с корпусом инструмента из конструкционных легированных и инструментальных сталей, 0.6...0.8 мм – из низко- и среднеуглеродистых сталей;
- охлаждение после пайки на воздухе со скоростью 10...20 град·с<sup>-1</sup>.

Показателями качественного паяного соединения твердого сплава и стали, образованного FeC-припоем являются:

- диффузионная зона на границе «твердый сплав – припой» не менее 0.1 мм;
- наличие в микроструктуре шва графитно-перлитно-цементитной зоны толщиной 0.3...0.4 мм, содержащей 5...9 об.% графита;
- отсутствие трещин, сколов и непропаев площадью более 5 %.

Авторы выражают глубокую благодарность канд. техн. наук АА Малышко, доценту С.У Глазачеву за методическую помощь в исследовании и описании микроструктуры твердосплавных паяных инструментов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Technological improvement of surfacing of parts of hammer crushers used in coke-chemical industry / N. N. Malushin, D. V. Valuev, D. P. L'yaschenko [et al.] // Materials Science Forum. – 2018. – Vol. 927 MSF. – P. 168-175. – DOI 10.4028/www.scientific.net/MSF.927.168.
2. On the Problem of Wear Resistant Coatings Separation from Tools and Machine Elements / S. I. Petrushin, R. H. Gubaidulina, A. V. Likholat, S. V. Gruby // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Yurga, 21–23 мая 2015 года. – Yurga: Institute of Physics Publishing, 2015. – P. 012048. – DOI 10.1088/1757-899X/91/1/012048.
3. Valentov, A. V. Forecasting residual and operating stress in soldering cutting tools with tungsten-free hard alloy inserts / A. V. Valentov, V. V. Konovodov, E. V. Agafonova // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 379. – P. 28-31. – DOI 10.4028/www.scientific.net/AMM.379.28.

## REFERENCES

1. Technological improvement of surfacing of parts of hammer crushers used in coke-chemical industry / N. N. Malushin, D. V. Valuev, D. P. L'yaschenko [et al.] // Materials Science Forum. – 2018. – Vol. 927 MSF. – P. 168-175. – DOI 10.4028/www.scientific.net/MSF.927.168.
2. On the Problem of Wear Resistant Coatings Separation from Tools and Machine Elements / S. I. Petrushin, R. H. Gubaidulina, A. V. Likholat, S. V. Gruby // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Yurga, 21–23 мая 2015 года. – Yurga: Institute of Physics Publishing, 2015. – P. 012048. – DOI 10.1088/1757-899X/91/1/012048.
3. Valentov, A. V. Forecasting residual and operating stress in soldering cutting tools with tungsten-free hard alloy inserts / A. V. Valentov, V. V. Konovodov, E. V. Agafonova // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 379. – P. 28-31. – DOI 10.4028/www.scientific.net/AMM.379.28.
4. Silyakov, S. L. Surface Cladding by Combined Use of Metal-thermy and Induction Heating / S. L. Silyakov, V. I. Yukhvid, V. F. Aulov // International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. – 2019. – Vol. 28. – No 3. – P. 213-215. – DOI 10.3103/S1061386219030154.

4. Silyakov, S. L. Surface Cladding by Combined Use of Metallothermy and Induction Heating / S. L. Silyakov, V. I. Yukhvid, V. F. Aulov // International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. – 2019. – Vol. 28. – No 3. – P. 213-215. – DOI 10.3103/S1061386219030154.

5. Analysis of the retailoring methods and the workability of deposited surfaces / V. V. Konovodov, A. V. Valentov, E. G. Grigoryeva, K. A. Abdrasulov // Materials treatment: current problems and solutions, Yurga, 26–28 ноября 2015 года / National Research Tomsk Polytechnic University. – Yurga: IOP Publishing Ltd, 2016. – P. 12035.

5. Analysis of the retailoring methods and the workability of deposited surfaces / V. V. Konovodov, A. V. Valentov, E. G. Grigoryeva, K. A. Abdrasulov // Materials treatment: current problems and solutions, Yurga, 26–28 ноября 2015 года / National Research Tomsk Polytechnic University. – Yurga: IOP Publishing Ltd, 2016. – P. 12035.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ КАВИТАЦИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ СТЕНКИ ЦИЛИНДРА ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** пайка, железоуглеродистый припой, паяное соединение, твердосплавный инструмент, структурообразование, микроструктура

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:** Коноводов Виталий Васильевич, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «НГАУ»  
Агафонов Екатерина Васильевна. Ст. преподаватель ФГБОУ ВО «НГАУ»  
Хрянин Виктор Николаевич, д-р техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «НГАУ»  
Губин Евгений Сергеевич, аспирант ФГБОУ ВО «СГУВТ»

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

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

**С.В. Пинясов, Г.С. Юр**

### **INVESTIGATION OF CAVITATION DESTRUCTION OF THE INTERNAL SURFACE OF THE CYLINDER WALL OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES**

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630039, Russia  
**Sergey.V. Pinyasov (Postgraduate of SSUWT)**

**Gennady S. Yur (D. of Engineering Sciences, Prof. of SSUWT)**

**ABSTRACT:** The cylinder liner of internal combustion engines is one of the most critical parts. During operation, the inner surface (mirror) wears out and this part must be replaced. A hypothesis is proposed that the initial cause of wear is the destruction of the metal surface as a result of cavitation, followed by chipping and flaking of small particles. These particles, getting into the gap between the cylinder liner, piston and piston rings, as well as into the lubricating oil, are the main cause of the subsequent development of abrasive wear. The results of a numerical study of the destruction of the surface layer of various metals under the action of a cumulative jet are presented. Studies have shown that steel breaks 2.2 times faster and cast iron 3.5 times faster than the experimental SVP-1 alloy. Based on the calculations performed, we recommend using SVP-1 alloy for the manufacture of an anti-wear ring installed in the upper part of the cylinder liner.

**Keywords:** cylinder liner, cavitation, cumulative jet, surface destruction, wear..

Втулка цилиндра двигателей внутреннего сгорания является одной из самых ответственных деталей. В процессе эксплуатации происходит износ внутренней поверхности (зеркала), и эта деталь подлежит замене. Предложена гипотеза, о том, что первоначальной причиной износа является разрушение поверхности металла в результате кавитации, с последующим выкрашиванием и отслаиванием мелких частиц. Эти частицы, попадая в зазор между втулкой цилиндра, поршнем и поршневыми кольцами, а также в смазочное масло будут, являются основной причиной последующего развития абразивного износа. Представлены результаты численного исследования разрушения поверхностного слоя различных металлов при действии кумулятивной струи. Исследования показали, что сталь разрушается в 2,2 раза быстрее, а чугун в 3,5 раза быстрее, чем экспериментальный сплав SVP-1.

Втулка цилиндра является одним из самых ответственных и критичных деталей дизеля, которые подвержены износу с последующим их заменой в процессе эксплуатации.

Износ внутренней поверхности втулки происходит в результате комплексного влияния механических, тепловых и химических процессов. К основным причинам износа зеркала цилиндра относятся:

- газовая коррозия, происходящая в результате взаимодействия сухих газов с металлом при высоких температурах;

- химическая и электрохимическая коррозия, происходящая в результате взаимодействия металлов и газовой среды содержащий соединения серы и пары воды, находящихся при

температурах ниже точки росы;

- абразивный износ, происходящий при трении зеркала цилиндра с поверхностями поршня и поршневых колец;

- кавитационное разрушение верхней части поверхности втулки цилиндра.

Наиболее агрессивным и наименее изученным по нашему мнению, особенно в высокофорсированных судовых дизелях, является разрушение металла под действием кавитации.

По высоте внутренняя поверхность втулки изнашивается неравномерно. Наибольший износ происходит в верхней части, в районе первого компрессионного кольца.

Предположим, что первоначальной причиной появления износа является разрушения поверхности в результате кавитации, с последующим отслаиванием кристаллов и мелких частиц металла. Эти частицы, попадая в смазочное масло и зазор между втулкой цилиндра, поршнем и поршневыми кольцами, будут, являются основной причиной последующего абразивного износа.

Затем, с течением времени, происходит интенсивное «аварийное» изнашивание цилиндрических втулок и поршневых колец. «Аварийное» изнашивание обычно возникает внезапно и наиболее часто происходит у высокофорсированных дизелей. В этом случае скорость изнашивания может превышать нормальную в 3–4 раза.

На рисунке 1 схематично изображена эпюра износа внутренней стенки цилиндра дизеля ЗД6 [1].

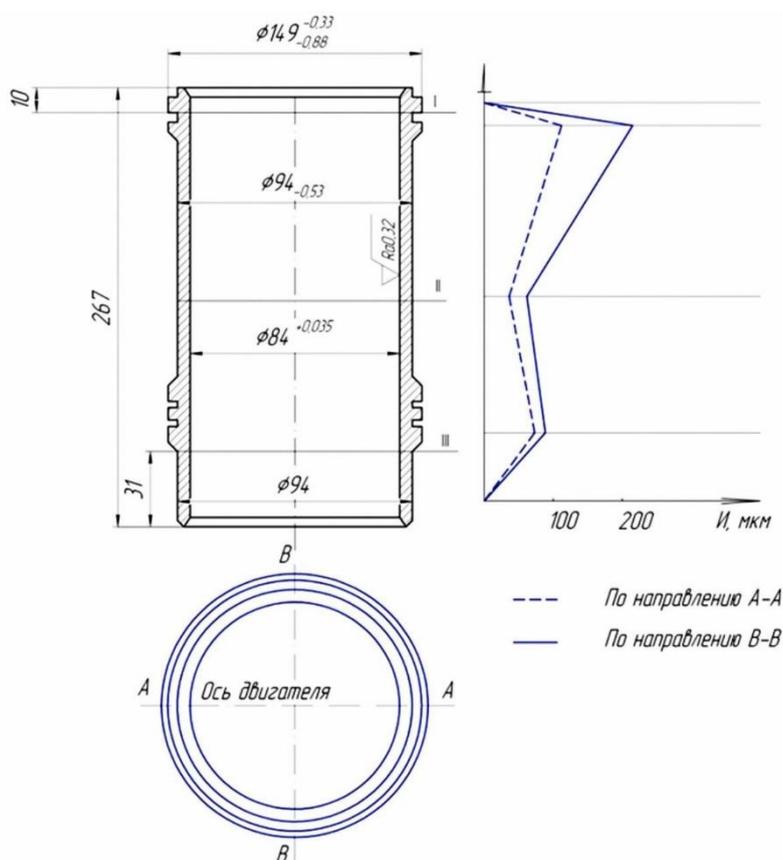


Рисунок 1 – Износ внутренней поверхности втулки цилиндра

К характерным признакам возникновения интенсивного изнашивания относятся появление на зеркале втулки и на кольцах вертикальных темных полос и рисок, появление в масле мелких металлических частиц.

На рисунке 2 приведена фотография рисок, образовавшихся на стенках цилиндра в результате абразивного износа.

Для изготовления цилиндрических втулок для судовых дизелей, в основном используют высококачественные легированные чугуны марок СЧ 25 и СЧ 30 с твердостью в пределах НВ 1900–2300 МПа и НВ 2400–2800 МПа. Материалом для втулок высокофорсированных высокооборотных двигателей часто используется сталь. Наибольшее распространение для таких двигателей получила азотированная сталь 38ХМЮА.

Рассмотрим механизм кавитационного разрушения поверхности.

Кавитация представляет собой термодинамический процесс схлопывания парогазовых пузырьков в жидкостной среде с выделением большого количества энергии.

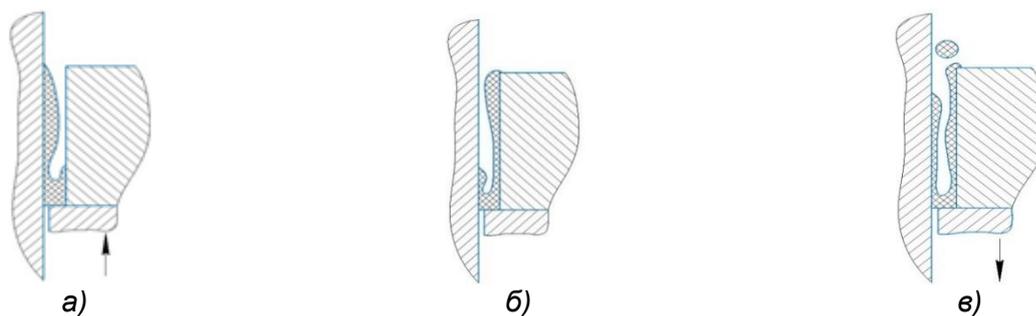
В цилиндре дизеля кавитация происходит в пристеночном слое масла. Известно, что расход смазочного масла в дизельных двигателях типа 6ЧСН 36/45 составляет 6-7 г/кВтч [2]. Масло через поршневые кольца нагнетается в направлении камеры сгорания и растекается по стенке цилиндра в виде тонкой масляной пленки.

При движении поршня от НМТ к ВМТ часть собранного поршневым кольцом масла, перетекает с торца кольца на боковую поверхность головки поршня (рисунок а). Достигнув верхней кромки поршня, масло располагается на ней в виде валика (рисунок б). С течением времени, за несколько ходов поршня, толщина масляного валика увеличивается и происходит отрыв масла в виде отдельных капель (рисунок в). При износе ЦПГ, с увеличением зазора между поршнем и цилиндром, увеличивается поток масла в камеру сгорания и его расход на угар.



*Рисунок 2 – Продольные риски на зеркале втулки цилиндра*

В пленке масла и топлива находятся мельчайшие парогазовые пузырьки и различные примеси, которые являются зародышами кавитации. При резком повышении давления в цилиндре происходящего в результате сгорания топлива внутри капли формируется кумулятивная струя [4].

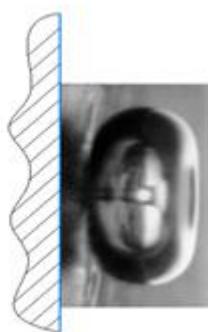


*Рисунок 3 – Формирование капель масла, попадающего в зазор между поршнем и цилиндром [3]*

Струя, ударяясь о поверхность металла, разрушает графит, кристаллическую решётку и отслаивает отдельные частицы, которые являются основной причиной абразивного износа.

Кроме этого, при захлопывании парогазовых пузырьков, происходит высокотемпературный пиролиз масла с выделением диссоциированного водорода. Взаимодействие протонов водорода с материалом цилиндрической втулки приводит к наводороживанию поверхностного слоя. Это создаёт большие давления внутри коллекторов (сотни атмосфер) вызывая напряжённое состояние в решётке металла, нарушая структуру металла, способствуя расщеплению и образованию трещин.

На рисунке 4 приведена фотография образования кумулятивной струи.



*Рисунок 4 – Формирование кумулятивной струи в капле масла, находящейся около стенки цилиндра [5]*

Численное исследование процесса разрушения поверхности металла выполнено по программе Ansys Autodyn [6]. Программа позволяет рассчитывать скорость разрушения различных материалов.

В качестве модели для образования кумулятивной струи используем клинообразную заготовку, изображённую на рисунке 5.

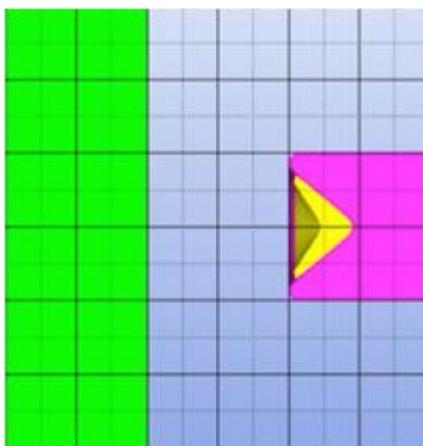


Рисунок 5 – Графическое изображение расчётной модели

Полость формирования кумулятивной струи заполнена смазочным маслом.

На рисунке 6 приведены результаты расчета разрушения поверхности различных материалов за 10000 циклов ударов кумулятивной струи.

Исследования показали, что сталь разрушается в 2,2 раза быстрее, а чугун в 3, 5 раза быстрее экспериментального сплава SVP-1. На основании выполненных расчётов рекомендуем использовать сплав SVP-1 для изготовления противоизносного кольца, устанавливаемого в верхней части втулки цилиндра.

В результате проведённого анализа установлено, что одной из основных причин износа поверхности в верхней части цилиндрической втулки является разрушение поверхности металла в результате кавитации, с последующим отслаиванием кристаллов и мелких частиц. Эти частицы, попадая в зазор между втулкой цилиндра, поршнем и поршневыми кольцами, а также в смазочное масло будут, являются причиной абразивного износа цилиндрической поршневой группы.

Кроме этого, при захлопывании парогазовых пузырьков, происходит высокотемпературный пиролиз масла с выделением диссоциированного водорода, который проникая в кристаллическую решётку вызывает напряжённое состояние и приводит к водородному охрупчиванию, расслаиванию и образованию трещин.

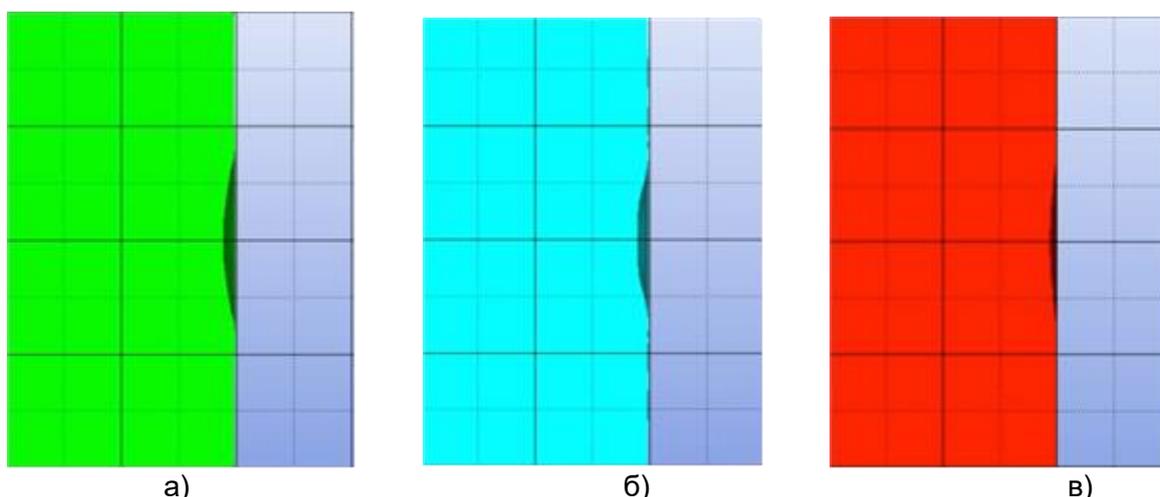


Рисунок 6 – Разрушение металлов после 10000 циклов детонации. а) – чугун СЧ25, б) – сталь 20, в) – экспериментальный сплав SVP-1.

Для повышения долговечности внутренней поверхности втулок цилиндра высокофорсированных дизелей применяются следующие конструктивные решения:

- 1) зеркала чугунных и стальных втулок покрывают пористым хромом. Интенсивность износа таких поверхностей уменьшается примерно в два раза;
- 2) обработка поверхности втулки лучом лазера. При взаимодействии луча лазера с поверхностью происходит выжигание графита. Оплавленная лазерным лучом поверхность находится в окружении холодного металла, вследствие чего происходит его закалка;
- 3) в верхней части втулки, в специально проточенный паз устанавливают противоизносное кольцо, изготовленное из стали. Часто это кольцо называют антиполировочным. Оно значительно уменьшает абразивное изнашивание поверхности и увеличивает срок эксплуатации дизелей.

Такие кольца применяются в цилиндрических втулках высокофорсированных дизелей финской фирмы «Вяртсиля», английской фирмы Роллс-Ройс и других [7].

Общий вид противоизносного кольца и втулки цилиндра показан на рисунке 7.

Одной из основных причин износа поверхности в верхней части цилиндрической втулки является водородное охрупчивание и разрушение поверхности металла под действием кумулятивных струй, образующихся в процессе кавитации.

Выполненные нами расчёты показали, что наиболее устойчивым материалом, противостоящим кавитационному разрушению, является экспериментальный сплав SVP-1.

Этот материал можно рекомендовать для изготовления противоизносных колец, которые устанавливаются в верхней части втулок цилиндра высокофорсированных судовых дизелей.



Рисунок 7 – Расположение противоизносного (антиполировочного) кольца во втулке цилиндра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Токарев, А.О. Отказы деталей машин. Анализ причин, техническая диагностика и профилактика: учебник /А.О. Токарев, И.Г. Мироненко// Издательство «Инфра-Инженерия» 2020. 215 с.

REFERENCES

- 1 Tokarev, A.O. Failures of machine parts. Analysis of causes, technical diagnostics and prevention: textbook / A.O. Tokarev, I.G. Mironenko // Infra-Engineering Publishing House 2020. 215 p.

2 Лебедев, Б.О. Теоретические основы процесса угара масла в дизелях и разработка мероприятий по его сокращению /Б.О. Лебедев// Новосибирск. Изд-во НГАСВТ. 1998. – 167 с.

3 Кузнецов, Г.К. Движение масла в камеру сгорания поршневого двигателя /Г.К. Кузнецов, П.П. Дудко// Двигателестроение, 1963, № 4, – С. 24-26.

4 Маргулис, М.А. Звукохимические реакции и сонолюминисценция / М.А. Маргулис ; – М.: Химия, 1986.– 288 с.

5 Blake J. R., Keen G. S., Tong R. P., Wilson M. Acoustic cavitation: the fluid dynamics of non-spherical bubbles // Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1999. Vol. 357, no. 1751. P. 251–267.

6 Ansys Autodyn [Электронный ресурс]: математическая модель уравнения JWL, 2020. URL: [https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v202/en/exd\\_ag/ds\\_ex\\_mat\\_jwleos.html%23ds\\_ex\\_mat\\_jwleos](https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v202/en/exd_ag/ds_ex_mat_jwleos.html%23ds_ex_mat_jwleos) (дата обращения: 29.12.2020)

7 Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines Eighth. Edition by Doug Wood. yard 2004 Elsevier Ltd. 884 p.

2 Lebedev, B.O. Theoretical foundations of the process of oil waste in diesel engines and the development of measures to reduce it /B.O. Lebe-dev// Novosibirsk. Publishing house NGAVT. 1998. - 167 p.

3 Kuznetsov, G.K. The movement of oil into the combustion chamber of a piston engine /G.K. Kuznetsov, P.P. Dudko // Engine building, 1963, No. 4, - S. 24-26.

4 Margulis, M.A. Sound-chemical reactions and sonoluminescence / M.A. Margulis; - M.: Chemistry, 1986. - 288 p.

5 Blake J. R., Keen G. S., Tong R. P., Wilson M. Acoustic cavitation: the fluid dynamics of non-spherical bubbles // Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1999. Vol. 357, no. 1751. P. 251–267.

6 Ansys Autodyn [Электронный ресурс]: математическая модель уравнения JWL, 2020. URL: [https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v202/en/exd\\_ag/ds\\_ex\\_mat\\_jwleos.html%23ds\\_ex\\_mat\\_jwleos](https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v202/en/exd_ag/ds_ex_mat_jwleos.html%23ds_ex_mat_jwleos) (дата обращения: 29.12.2020)

7 Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines Eighth. Edition by Doug Wood. yard 2004 Elsevier Ltd. 884 p.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:**

*штулка цилиндра, кавитация, кумулятивная струя, разрушение поверхности, износ.*

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

*Пинясов Сергей Владимирович, аспирант ФГБОУ ВО «СГУВТ»*

*Юр Геннадий Сергеевич, д-р техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «СГУВТ»*

**ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:**

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

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСКЛЮЧЕНИЯ ПОТЕРЬ НЕФТЕПРОДУКТОВ ПРИ ИХ ИСПАРЕНИИ В ПРОЦЕССЕ ТРАНСПОРТИРОВКИ ТАНКЕРАМИ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

**А.М. Пичурин**

### EVALUATION OF THE POSSIBILITY OF ELIMINATING THE LOSS OF OIL PRODUCTS DURING THEIR EVAPORATION DURING TRANSPORTATION BY TANKERS

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630039, Russia

**Aleksandr M. Pichurin (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)**

**ABSTRACT:** A significant amount of oil products is lost during transportation. The main reason for these losses should be considered their evaporation. This negatively affects the quality of the remaining cargo, negatively affects the environmental situation and increases the fire hazard in transport. During the study, the main reason for these losses was established - this is heat exchange with the environment and an increase in the temperature of the transported cargo. A numerical experiment was carried out to assess the non-stationary heating of the load during its thermal interaction with the environment. The results obtained indicate that these losses are mainly due to heat transfer and evaporation of light fuel fractions. It is proposed, to solve this problem, to heat-insulate the heat exchange surface and a small amount of steam, to reduce the pressure in the tanks, to distill into a special compartment, which has a smaller volume and a more durable body. during the period of daily temperature rise and reverse return when the temperature drops and reverse heat exchange occurs - from the cargo to the environment.

**Keywords:** oil, oil products, gasoline, volatility, fractional composition, non-stationary heat transfer, heat flow, tank, cargo compartment, thermal insulation.

Значительное количество нефтепродуктов теряется при транспортировке. Основной причиной этих потерь следует считать их испарение. Это негативно отражается на качестве оставшегося груза, негативно отражается на экологической обстановке и повышает пожароопасность на транспорте. В ходе исследования было установлена главная причина этих потерь – это теплообмен с окружающей средой и рост температуры перевозимого груза. Выполнен численный эксперимент, по оценке нестационарного прогрева груза при тепловом его взаимодействии с окружающей средой. Полученные результаты свидетельствуют о том, что данные потери обусловлены в основном теплообменом и выпариванием легких фракций топлива. Предложено, для решения этой задачи теплоизолировать поверхность теплообмена и незначительное количество пара, для снижения давления в танках, перегонять в специальный отсек, имеющий меньший объем и более прочный корпус. в период суточного повышения температуры и обратный возврат при понижении температуры и возникновении обратного теплообмена – от груза к окружающей среде.

При транспортировке нефти и нефтепродуктов, содержащих в своем составе большое количество легких фракций, а также при доставке бензина с заводов изготовителей до мест потребления, наблюдаются значительные потери.

По данным исследований, более 75% потерь бензинов (это один из основных продуктов переработки нефти) связано с их испарением. /1/.

На танкере при перевозке нефти и нефтепродуктов происходит газообмен между паровоздушной смесью, содержащейся в подпалубном пространстве грузовых танков, и внешней атмосферой. Выброс этой паровоздушной смеси в атмосферу в современных условиях, является крайне нежелательным явлением, так как, во-первых, это приводит к загрязнению окружающей среды, усилению парникового эффекта, загрязнению рабочей среды на судне и значительным потерям груза, а также создает пожарную опасность на судне и т. п. А, во-вторых, при испарении теряются наиболее ценные фракции нефти. При этом потери нефти за один рейс продолжительностью 3–4 недели могут превышать 0,7 % от общего количества груза. /2/. Анализ существующих методик расчета потерь бензина от испарения не позволяет решить эту задачу /4,5/.

Поэтому хорошо организованная последовательная и систематическая борьба с потерями нефтепродуктов, и, в частности, бензинов от испарения на всех этапах транспортирования и хранения имеет большое значение.

Согласно изложенному, основной задачей является анализ этих проблем и поиск путей их решения.

Основные потери при транспортировке груза водным транспортом связаны с «малым дыханием» и, соответственно потерями груза при суточных колебаниях температур /3/. Эти колебания приводят к периодическому изменению избыточного давления в танках нефтеналивных судов. Для поддержания давления в приемлемых границах, обеспечивающих прочность корпуса танка, возникает необходимость снижать это давление путем выброса в атмосферу части испарившегося груза. Основной задачей является установлений наиболее значимых причин испаряемости и оценка возможности их исключения или минимизации.

Экспериментальное определение влияния нагрева бензина на испаряемость.

Для определения данного условия использовалась экспериментальная установка, представленная на рисунке 1. В ходе исследования отслеживался расход этого вида топлива при различных температурах.

Резервуар с испытуемым топливом 2 помещался внутри кольцевой водяной «бани» 1, сосуда с водой, который нагревался до температур, максимально близких к наибольшим температурам окружающей среды, характерных для летнего периода. В качестве нагревателя использовался обычный ТЭН 3. Температура фиксировалась посредством терморпары 6 и потенциометра 4. Встроенное в потенциометр температурное реле 5, с источником питания 12В поддерживало стабильную температуру в водяной «бане». Эта установка размещалась на электронных весах, с точностью определения массы 1 грамм. В ходе исследования было установлено, что наиболее интенсивно начинает уменьшаться масса при достижении температуры топлива 35 °С. Потери массы в течение двух часов составляли около 0,1%. При поддержании такого температурного режима на стационарном уровне происходило постепенное снижение потерь от испарения и через 4 часа активный процесс снижения массы практически остановился. Его невозможно было отслеживать при использовании весов с такой точностью. Дальнейший аналогичный рост испарения топлива в виде скачка наблюдался уже при подъеме температуры до 50 °С.

Реальные температуры окружающей среды 35–40 °С вполне достижимы в летний период даже в северных широтах России. Такой характер испаряемости можно объяснить только особенностью фракционного состава бензина. Испаряемость самых легких фракций (практически их кипение) наблюдается при температурах близких к 35 °С. В ходе транспортировки именно эта часть топлива оказывается потерянной при «малом дыхании».

Численный расчет теплообмена между грузом и окружающей средой.

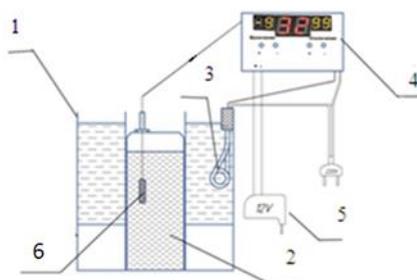


Рисунок 1 - схема экспериментальной установки

Для подтверждения этой гипотезы был проведен численный эксперимент, характеризующий возможное реальное влияние внешней среды (ее температуры) на характер испаряемости и потери груза.

Рассматривалась задача нестационарного теплообмена между грузом и окружающей средой.

В качестве математической модели использовалось уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) = c \rho \frac{\partial T}{\partial \tau};$$

где  $T$  – температура топлива  $^{\circ}\text{C}$ ;  
 $\lambda$  – теплопроводность топлива,  $\text{Вт/м}^{\circ}\text{C}$ ;  
 $c$  – теплоемкость топлива,  $\text{Дж/кг}^{\circ}\text{C}$ ;  
 $\rho$  – плотность топлива,  $\text{кг/м}^3$ .

В ходе решения этой задачи теплопроводность, теплоемкость и плотность топлива (бензина) принимались постоянными.

Граничное условие, описывающее конвективный теплообмен с окружающей средой, определялось уравнением Ньютона-Рихмана

$$q = \alpha(T_{\text{жс}} - T);$$

где  $T_{\text{жс}}$  – температура окружающей среды ( $T_{\text{жс}} = \text{const}$ );  
 $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от внешней среды к стенке грузового отсека ( $\alpha = \text{const}$ ).

Данные допущения практически не искажают реальную картину. Все параметры, которые приняты постоянными, в реальной ситуации меняются не значительно. Температура окружающей среды принята постоянной на уровне максимально возможной.

В ходе исследования тепловое сопротивление стенки танка не учитывалось.

В результате численного решения данной задачи была получена динамика прогрева грузового танка, представленная на рисунке 2. Размеры танка при решении данной задачи были взяты с реального речного танкера проекта Р42.

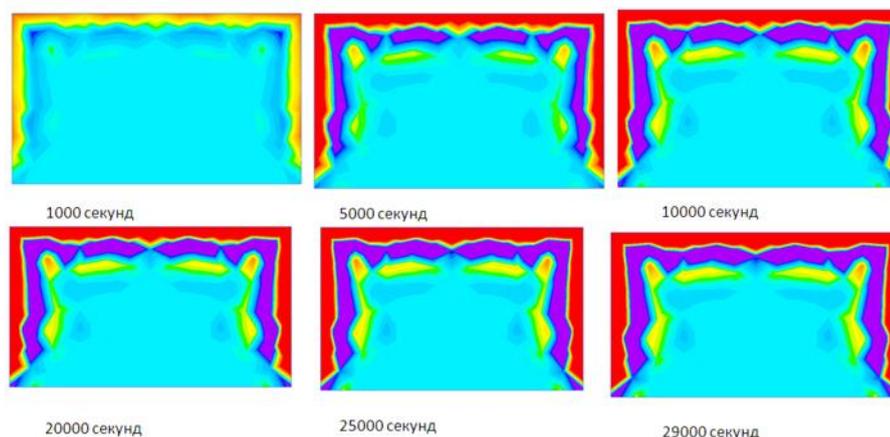


Рисунок 2 – Динамика прогрева бензина в танке

## ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Здесь красно-оранжево-желтые тона определяют высокие температуры. (Красный цвет соответствует температуре окружающей среды. Цвет голубой – начальной температуре топлива. Со временем интенсивность теплообмена снижалась, что связано, видимо, с формированием топливного слоя вблизи стенки, имеющего температуру, близкую к температуре окружающей среды, и выполняющую роль изолятора для остальной массы груза, расположенной в центральной части танка. Полученные численные результаты сведены в таблицу 1.

*Таблица 1 – Изменение теплового потока передаваемого в перевозимый груз (бензин) во времени*

<i>Изменение теплового потока, передаваемого в перевозимый груз (бензин) во времени</i>					
Время теплообмена, с	Тепловой поток, Вт	Время теплообмена, с	Тепловой поток, Вт	Время теплообмена, с	Тепловой поток, Вт
1000	3048	13000	711	25000	248
2000	3675	14000	639	26000	233
3000	2351	15000	576	27000	219
4000	2068	16000	520	28000	208
5000	1823	17000	472		
6000	1609	18000	430	44000	129
7000	1423	19000	393	45000	127
8000	1261	20000	360	46000	125
9000	1119	21000	331	47000	125
10000	995	22000	303	48000	123
11000	887	23000	283	49000	121
12000	793	24000	265	50000	120

Анализируя то, как меняется тепловой поток в течение представленного времени, была определена величина теплоты, переданная грузу за отмеченный в таблице промежуток времени (это примерно 12-13 часов). В течение этого времени возможен суточный прогрев топлива и его потери от испарения.

Принимая значение теплоты парообразования бензина, равную 250 кДж/кг, было установлено, что потери груза от испарения составили 0,1% от всего его количества.

Таким образом, основной причиной потери груза от испарения, можно считать теплообмен с окружающей средой. И то, что подводимая теплота к грузу практически полностью расходуется на процесс испарения (выпаривания) легких фракций.

Для снижения теплообмена, с целью сокращения (и даже исключения) потерь груза от испарения предлагается нанести на поверхность танка теплоизоляционный слой из пеноуретана.

Решая аналогичную задачу по оценке теплообмена между грузом и внешней средой при наличии изоляционного слоя, толщиной 200 мм установили, что температура груза во всем объеме практически остается начальной. Изменения наблюдаются только вблизи пограничного пристеночного слоя. Динамика теплового потока в этом случае представлена в таблице 2.

*Таблица 2 – Динамика теплового потока*

<i>Изменение теплового потока передаваемого в перевозимый груз во времени при наличии изоляционного слоя</i>			
Время теплообмена, с	Тепловой поток, Вт	Время теплообмена, с	Тепловой поток, Вт
1000	774	9000	30.6
2000	180	10000	30.6
3000	60		
4000	36		
5000	31	26000	30.6
6000	30.9	27000	30.6
7000	30.7	28000	30.6
8000	30.6	29000	30.6

Графически, характер изменения тепловых потоков для двух представленных случаев приведен на рисунке 3.

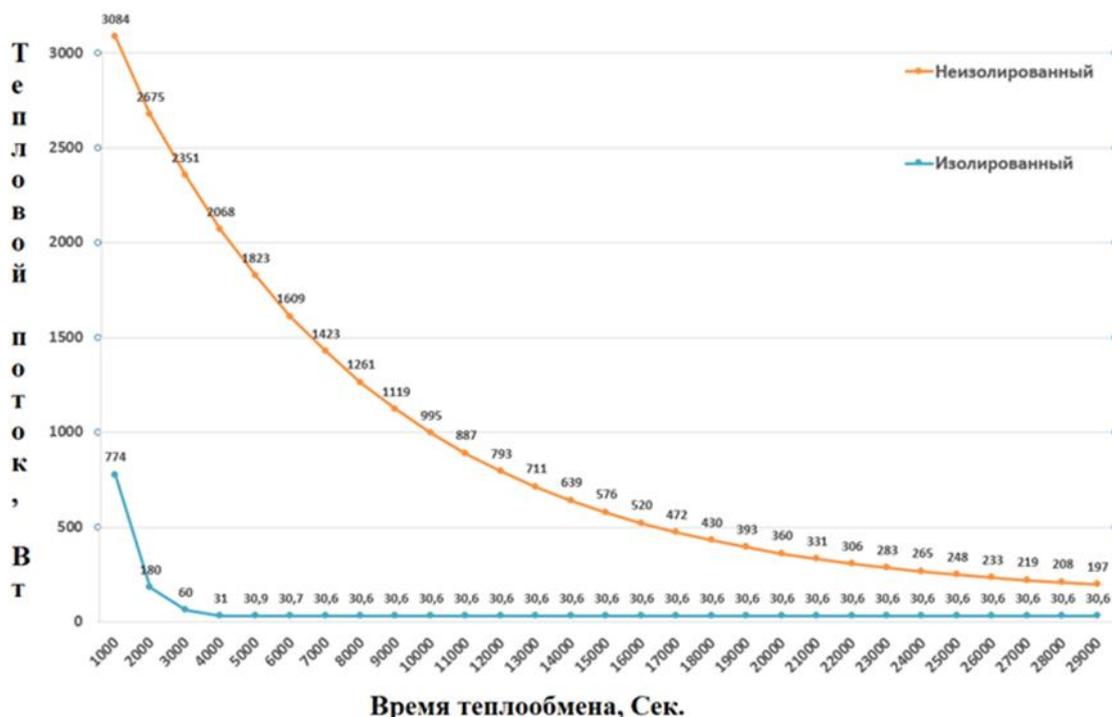


Рисунок 3 – Изменение теплового потока, передаваемого от окружающей среды в перевозимый груз при наличии изоляции на поверхности танка и при ее отсутствии

При нанесении изоляции испаряемость груза снизилась более чем на порядок.

Для судов, которые эксплуатируются в относительно умеренных климатических условиях, достаточно на поверхности танков нанести теплозащитное покрытие. Это позволит убрать дыхательные клапаны и исключить потери перевозимого груза.

Для судов, которые эксплуатируются в климатических зонах с более высокими температурами, можно дополнительно предложить вместо дыхательных клапанов установить дополнительный набольших размеров грузовой отсек, отличающийся от основных танков более прочным корпусом. При повышении давления в основных танках из-за испаряемости груза, образующийся пар перекачивать компрессором в этот танк. В ночное время, когда теплообмен будет обратным, и груз будет охлаждаться и, соответственно, будет падать давление, через редукционный клапан пар можно возвращать обратно в основные танки.

В заключении можно отметить следующее:

- 1) установлена на основании опытных исследований и численного эксперимента основная причина испаряемости груза – теплообмен;
- 2) предложен способ полного исключения потерь бензина (и любых нефтепродуктов, содержащих в себе легкоиспаряющиеся фракции) путем теплоизоляции грузовых отсеков;
- 3) предложен способ перекачивания испаряющегося груза в свободный более прочный танк при подводе теплоты и обратный возврат при охлаждении танка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1.Никольский Б.П. Справочник химика (Москва-Ленинград: Госхимиздат)., 1968  
 2. Бобыр В. А. Судовая эргатическая функция сокращения потерь нефти от испарения Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. -№4(26). Санкт-Петербург с. 115-120, 2014  
 3. Кириллов Н.Г. Новая технология хранения нефтепродуктов Энергетика и промышленность России, 2003: Электронный журнал.–URL: <https://www.eprussia.ru/epr/30/2000.htm/>.

REFERENCES

1. Nikolsky B.P. Handbook of chemists (Moscow-Leningrad: Goshimizdat), 1968  
 2. Bobyry V. A. Ship ergatic function of reducing oil losses from evaporation Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S. O. Makarov. -№4(26). St. Petersburg with. 115-120, 2014  
 3. Kirillov N.G. New technology for storage of petroleum products Energy and industry of Russia, 2003: Electronic journal.–URL: <https://www.eprussia.ru/epr/30/2000.htm/>.  
 4. Berezina I. S. Analysis of methods for calculating the process of evaporation of light oil products during transportation, storage and loading and unloading operations. Bulletin of ASTU. Astrakhan.: - 2008, No. 6 (47) p. 188-191.

4. Берёзина И. С. Анализ методик расчета процесса испарения светлых нефтепродуктов при перевозке, хранении и сливно-наливных операций. Вестник АГТУ. Астрахань. – 2008, №6(47) с.188-191.

5. Дьяконов, К.В., Ливитин Р.Е., Земенков Ю.Д. Сверхнормативные потери топлива от испарения при хранении в резервуарах Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) – 2014, № S4 Москва: «Горная книга» с.164-190.

5. Dyakonov, K.V., Livitin R.E., Zemenkov Yu.D. Excess fuel losses from evaporation during storage in tanks Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal) - 2014, No. S4 Moscow: "Mining Book" p.164-190.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:**

*штулка цилиндра, кавитация, кумулятивная струя, разрушение поверхности, износ.*

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

*Пичурин Александр Михайлович, канд.техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»*

**ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:**

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

---

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДУКТОВ ИСПАРЕНИЯ БЕНЗИНА

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

**А.И. Голомянов, С.В. Викулов**

### INVESTIGATION OF GASOLINE EVAPORATION PRODUCTS

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

**Alexander I. Golomyanov** (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)

**Stanislav V. Vikulov** (D. of Engineering Sciences, Prof. of SSUWT)

**ABSTRACT:** A large amount of valuable petroleum products is lost during transportation and storage due to evaporation. One of the effective ways to combat losses of low-boiling petroleum products is the collection and condensation of vapors in a special device - a multi-tube condenser. To calculate the device, data on the quantitative and qualitative composition of vapors are required.

**Keywords:** *fractional composition, chromatographic analysis, gasoline, sample, evaporation*

Большое количество ценных нефтепродуктов теряется при перевозке и хранении за счет испарения. Одним из эффективных способов борьбы с потерями легкокипящих нефтепродуктов является сбор и конденсация паров в специальном устройстве – многотрубном конденсаторе. Для расчета устройства требуются данные о количественном и качественном составе паров.

В настоящее время в литературе отсутствуют количественные данные о составе паров легкокипящих нефтепродуктов, испаряющихся при транспортировке и хранении, что не позволяет дать обоснованные рекомендации по утилизации продуктов испарения [1-4]. Ввиду этого возникла необходимость проведения хроматографического анализа легкокипящего нефтепродукта (бензин) и паровоздушной смеси, содержащейся в газовом пространстве резервуара. Для газохроматографического анализа исследуемого бензина А-80 и продуктов его испарения в процессе эксперимента осуществлялся периодический отбор проб жидкого бензина через краны, расположенные на боковой поверхности экспериментальной емкости, в стеклянные колбы с пробками, а паровоздушных проб - в аспираторы (приборы для отбора и хранения проб газа). Аспираторы при этом соединялись с газоотводной системой дыхательного клапана.

Анализ проб жидкого бензина проводился на хроматографе ЛХМ-8МД. Для анализа использовалась медная колонка размерами 6000x3 мм, заполненная смесью из сферохрома, масла и олеиновой кислоты. В качестве газа – носителя использовался гелий. Расход гелия составлял 50 см<sup>3</sup> в минуту. Детектором служил катетометр. Введение жидкой пробы осуществлялось шприцем. Время анализа одной пробы составляло 1,5 ч.

Анализ паровоздушных проб проводился с помощью прибора «Газохром 21,2», в медной колонке размером 6000x3 мм, которая была заполнена смесью из сферохрома и цетана. Газом-носителем служил гелий. Расход газа составлял 20 см<sup>3</sup>/ч. Детектором являлся катарометр. Время анализа одной пробы равнялось 0,8 ч.

Газохроматографический анализ позволил установить влияние колебаний температуры крышки емкости при «малых дыханиях», то есть при испарении, на изменение фракционного состава паровоздушной смеси.

В качестве примера в таблицах 1 и 2 приведены результаты хроматографического анализа проб жидкого бензина и продуктов его испарения для различных режимов нагрева экспериментальной емкости. На основе хроматографии определен компонентный состав

паровоздушной смеси.

Можно проследить изменение массовых концентраций отдельных компонентов продуктов испарения в зависимости от времени для различных температур нагрева крышки экспериментальной емкости. По мере прогревания верхних слоев бензина в емкости процентное содержание тяжелых углеводородов в газовом пространстве возрастает тем быстрее, чем сильнее осуществляется нагрев. Так, для температуры крышки емкости, равной 55 0С, содержание в смеси паров н-пентана и изопентана возросло почти в два раза.

Следует отметить, что в результате сравнения проб, взятых в один и тот же момент времени из кранов, расположенных на разной высоте от поверхности испарения, не было обнаружено значительного расхождения в значениях массовых концентраций компонентов по высоте газового пространства. Это дает основание полагать, что в газовом пространстве происходит постоянное выравнивание массовых концентраций, а значит и парциальных давлений компонентов за счет конвективных потоков, перемешивающих продукты испарения. Причиной возникновения конвекции в газовом пространстве является неизотермичность процесса испарения. Градиент массовой концентрации имеет место только в пограничном диффузионном слое над поверхностью раздела фаз.

Таблица 1 – Результаты хроматографического анализа исследуемого бензина. Массовая концентрация компонентов, % масс.

Компонент	Содержание в пробе	Компонент	Содержание в пробе
Пропан С3Н8	0,18	Триметилпентан i-C8H18	4,62
Изобутан i-C4H10	0,47	Н-октан n-C8H18	1,29
Н-бутан n-C4H10	4,34	И-нонан i-C9H20	4,60
И-пентан i-C5H12	8,80	И-нонан i-C9H20	1,92
Н-пентан n-C-5H12	11,40	Н-нонан n-C9H20	1,64
И-гексан i-C6H14	11,36	Толуол (метилбензол)	5,05
Н-гексан n-C6H14	11,60	И-декан i-C10H22	0,80
И-гептан	3,11	Н-декан n-C10H22	1,18
И-гептан i-C7H16	3,49	Ксилолы m,p	4,75
И-гептан i-C7H16	7,79	О-ксиллол	1,85
Н-гептан n-C7H16	3,56	Этилтолуол	2,32
И-октан i-C8H18	2,79	Псевдокумол	1,11

И-парафиновые и циклопарафиновые – 49,73% масс., н-парафиновые – 35,19% масс., ароматические – 15,08% масс.

Можно проследить изменение массовых концентраций отдельных компонентов продуктов испарения в зависимости от времени для различных температур нагрева крышки экспериментальной емкости. По мере прогревания верхних слоев бензина в емкости процентное содержание тяжелых углеводородов в газовом пространстве возрастает тем быстрее, чем сильнее осуществляется нагрев. Так, для температуры крышки емкости, равной 55 0С, содержание в смеси паров н-пентана и изопентана возросло почти в два раза.

Следует отметить, что в результате сравнения проб, взятых в один и тот же момент времени из кранов, расположенных на разной высоте от поверхности испарения, не было обнаружено значительного расхождения в значениях массовых концентраций компонентов по высоте газового пространства. Это дает основание полагать, что в газовом пространстве происходит постоянное выравнивание массовых концентраций, а значит и парциальных давлений компонентов за счет конвективных потоков, перемешивающих продукты испарения. Причиной возникновения конвекции в газовом пространстве является неизотермичность процесса испарения. Градиент массовой концентрации имеет место только в пограничном диффузионном слое над поверхностью раздела фаз.

*Таблица 2 – Результаты хроматографического анализа проб паровоздушной смеси для режима нагрева  $t = 55$  °С. Массовая концентрация компонентов, %*

Вещество	Время отбора проб от начала эксперимента, ч		
	2,3 ч	5,3 ч	8,3 ч
Воздух	41,80	29,90	12,57
Метан	0,11	0,12	0,09
Этилен	0,55	0,54	0,40
Этан	2,52	2,60	2,30
Пропен	1,33	1,60	1,76
Пропан	11,29	13,10	14,38
Изобутан	7,98	9,70	12,10
Н+изобутены	0,52	0,60	0,74
Н-бутан	16,80	20,67	26,13
Изопентан	9,86	11,52	16,10
Н-пентан	7,24	9,65	13,43

Результаты хроматографического анализа дали возможность сделать оценку изменения физических свойств продуктов испарения исследуемого бензина в зависимости от различных режимов нагрева крышки экспериментальной емкости. При расчетах принималось допущение о том, что продукты испарения бензина подчиняются уравнению состояния идеальных газов и закону Дальтона для смеси паров.

Полученные экспериментальные данные прямых измерений фракционного состава жидкого бензина и продуктов его испарения в замкнутом объеме могут быть использованы для практических расчетов промышленных теплообменных аппаратов и устройств по ликвидации потерь от испарения легкокипящих многокомпонентных углеводородных смесей при их транспортировке и хранении.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Константинов Н.Н. Потери нефти и нефтепродуктов. М.: Недра, 1991 – 260 с.
2. Сальников А. В. Потери нефти и нефтепродуктов. – Ухта, УГТУ. 2012. – 108 с.
3. Обельницкий А.М., Егорушкин Е.А., Чернявский Ю.Н. Топливо, смазочные материалы и охлаждающие жидкости. М.: ИПО «Полигран». 1997. – 256 с.
4. Дубовкин Н.Ф. Справочник по углеводородным топливам и их продуктам сгорания. – М., Л.: Госэнергоиздат. 1982. – 288 с.

**REFERENCES**

1. Konstantinov N.N. Losses of oil and oil products. M.: Nedra, 1991 - 260 p.
2. Salnikov A. V. Loss of oil and oil products. - Wow, USTU. 2012. - 108 p.
3. Obelnitsky A.M., Egorushkin E.A., Chernyavsky Yu.N. Fuel, lubricants and coolants. M.: IPO "Polygran". 1997. - 256 p.
4. Dubovkin N.F. Handbook of hydrocarbon fuels and their combustion products. – M., L.: Gosenergoizdat. 1982. - 288 p.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:**  
**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

**ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:**

*фракционный состав, хроматографический анализ, бензин, проба, испарение  
Голомянов Александр Иванович, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»  
Викулов Станислав Викторович, д-р техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «СГУВТ»  
630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»*

## СВЯЗИ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ ЯВНОПОЛЮСНОЙ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

Ю.П. Филюшов, Б.В. Палагушкин, А.А. Селезнев

### RELATIONSHIPS OF THE BASIC PROPERTIES OF A GREAT-POLE SYNCHRONOUS MACHINE WITH PERMANENT MAGNETS

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

Yuriy P. Filiushov (D. of Engineering Sciences, Prof. of SSUWT)

Boris V. Palagushkin (D. of Engineering Sciences, Prof. of SSUWT)

Aleksandr A. Seleznev (Postgraduate of SSUWT)

**ABSTRACT:** The relevance of the work is due to the desire to improve the energy efficiency of a salient-pole synchronous machine with permanent magnets, providing high dynamic characteristics of the electric drive. The well-known solution for the formation of an electromagnetic moment by a current along the transverse axis is characterized by a significant increase in reactive power with an increase in load and speed, which determines the growth of losses in steel, limits the maximum speed and does not provide a minimum of heat losses. Efficient use of differences in the magnetic conductivity of the longitudinal and transverse axes makes it possible to improve the energy characteristics of a salient-pole synchronous machine, allowing more power to be transferred to the actuator. The aim of the work is to find solutions for a salient-pole synchronous machine with permanent magnets, the use of which in the control algorithm will improve energy efficiency and ensure its most complete use by increasing the electromagnetic torque and speed when operating under conditions of current and voltage limitation supplied to the motor windings. The paper considers solutions that allow increasing energy efficiency and ensuring the most complete use of a salient-pole synchronous machine with permanent magnets when operating under conditions of current and voltage limitation supplied to the motor windings. The use of energy state functions to study the operation of an electric machine made it possible to identify the most efficient modes.

**Keywords:** Electric drive, salient-pole synchronous machine, energy properties, minimum losses, reactive power

Актуальность работы обусловлена стремлением улучшить энергетическую эффективность работы явнополюсной синхронной машины с постоянными магнитами, обеспечивая высокие динамические характеристики электропривода. Известное решение формирования электромагнитного момента током по поперечной оси характеризуется значительным ростом реактивной мощности при увеличении нагрузки и скорости, что определяет рост потерь в стали, ограничивает максимальную скорость и не обеспечивает минимум тепловых потерь. Эффективное использование различий магнитной проводимости продольной и поперечной оси дает возможность улучшить энергетические характеристики явнополюсной синхронной машины, позволяя передать исполнительному механизму большую мощность. Целью работы ставится задача поиска решений для явнополюсной синхронной машины с постоянными магнитами использование которых в алгоритме управления позволит повысить энергетическую эффективность и обеспечить наиболее полное ее использование за счет увеличения электромагнитного момента и скорости при работе в условиях ограничения тока и напряжения, подводимого к обмоткам двигателя. Для решения поставленной задачи использовались элементы теории электромеханического преобразования энергии, теории электрических машин и электропривода. В работе рассмотрены решения позволяющие повысить энергетическую эффективность и обеспечить наиболее полное использование явнополюсной синхронной машины с постоянными магнитами при работе в условиях ограничения тока и напряжения, подводимого к обмоткам двигателя. Применение функций энергетического состояния для исследования работы электрической машины позволило выделить наиболее эффективные режимы.

Появление дешевых высококоэрцитивных магнитов, создающих сильные магнитные поля в малых габаритах, обеспечивает широкое распространение синхронных машин с постоянными магнитами (СДПМ) в технологических процессах водного и железнодорожного транспорта [1]. Такие машины успешно применяются в электромобилях и тяговом электроприводе подвижного состава. Не имея скользящих контактов и не расходуя энергию на возбуждение, СДПМ выгодно отличается от других электрических машин.

Первые конструкции синхронной машины с датчиком положения получили название вентильного двигателя [2], или бесколлекторного двигателя постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов. В такой конструкции коммутация ключей преобразователя частоты жестко связана с положением ротора. Поэтому напряжение, прикладываемое к фазам двигателя, имеет трапецеидальную форму. Рассматриваемому способу управления присущи значительные пульсации электромагнитного момента, что снижает его потребительские свойства. Не симметрия ЭДС вращения порождает значительные искажения тока, что в ко-

нечном счете ведет к электромагнитным помехам и снижению энергетической эффективности. Применяя векторные методы формирования напряжения, можно получить близкое к синусоидальной форме распределения магнитного потока статора [3]. В настоящее время электромагнитный момент синхронной машины с постоянными магнитами формируют током по поперечной оси [4], зарубежные аналоги системы МТРА (Maximum Torque per Ampere), рассматривая двигатель в пространстве системы вращающихся координат [5]. Такое решение определено простой связью электромагнитного момента и управляющих воздействий, исключая образование реактивного момента. Обеспечивая линейную зависимость электромагнитного момента от задания, управление током по поперечной оси оказывается достаточно простым. Несмотря на несомненные достоинства в таких системах наблюдается значительный рост реактивной мощности при увеличении нагрузки и скорости, ограничивается диапазон регулирования в области больших скоростей, увеличиваются потери в стали и снижается эффективность управляющих воздействий [6]. Управление током по поперечной оси не отвечает требованиям минимума тепловых потерь в явнополюсной синхронной машине.

Особенностью СДПМ с высококоэрцитивными магнитами является значительная магнитная проводимость поперечного потока по сравнению с проводимостью продольного потока при совпадении осей полюсов ротора и фазных обмоток статора [7], что значительно усложняет решение задач управления, но позволит улучшить потребительские свойства электропривода. Для эффективного управления следует регулировать энергетические показатели электропривода [8, 9], обеспечивая линейную зависимость выходных величин от задания.

Ставится задача поиска решений для явнополюсной синхронной машины с постоянными магнитами реализация которых в алгоритмах управления повысит энергетическую эффективность и обеспечит наиболее полное использование электрического двигателя за счет увеличения электромагнитного момента и скорости при ограничении тока и напряжения, подводимого к обмоткам двигателя.

Решение поставленной задачи рассматривается на примере СДПМ, представленного в фазовом пространстве [10,11] системы вращающихся координат  $d, q$ :

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_d}{dt} &= -r i_d + p\omega\Psi_q + U_d \\ \frac{d\Psi_q}{dt} &= -r i_q - p\omega\Psi_d + U_q \end{aligned} \quad (1)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = m - m_c \quad (2)$$

$$m = p \frac{3}{2} (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) = p \frac{3}{2} \psi i \cos(\varphi); \quad i = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \quad (3)$$

$$Q = p\omega \frac{3}{2} (\Psi_d i_d + \Psi_q i_q) = p\omega \frac{3}{2} \psi i \sin(\varphi); \quad \Psi = \sqrt{\Psi_d^2 + \Psi_q^2} \quad (4)$$

где  $\Psi_d, \Psi_q, i_d, i_q, U_d, U_q$  – проекции вектора потокосцепления, тока и напряжения, подводимого к обмоткам двигателя;

$R$  – активное сопротивление обмоток статора;

$\Psi_0$  – приведенное к обмоткам статора значение потока постоянных магнитов;

$J$  – приведенный к валу двигателя момент инерции;

$m_c$  – момент статического сопротивления,  $\omega$  - скорость вращения ротора,  $p$  - число пар полюсов;

$m$  – электромагнитный момент;

$Q$  – реактивная мощность (4);

$\varphi$  – угол, определяет положение вектора тока относительно ЭДС от потокосцепления статора.

При некотором допущении  $\cos(\varphi)$  не отличается от стандартной оценки, обусловленной фазовым сдвигом основной гармоники напряжения питающей сети относительно синусоидального тока статора. Поскольку потокосцепление в воздушном зазоре электрической машины с постоянными магнитами изменяется не значительно, нелинейностью характеристики намагничивания можно пренебречь. Принятые допущения освобождают от изложения более строгой математической модели СДПМ, которая не столько помогает решению поставленных задач, сколько затрудняет ее.

Так как управление СДПМ возможно путем регулирования проекций вектора тока, анализ состояния явнополюсной синхронной машины сделан в зависимости от угла  $\mu$ , определяющего положение вектора тока. Интерес представляет работа трехфазной синхронной машины с постоянными магнитами при полной нагрузке. В таблице 1 приведены параметры двигателя рудничного электровоза в часовом режиме работы S2 при управлении током по поперечной оси.

Таблица 1 – Параметры явнополюсной синхронной машины рудничного электровоза

$P_n$ [Вт]	$m$ [Нм]	$\omega$ [rad/c]	$I_\phi$ [А]	$\Psi_0$ [Вб]	$r$ [Ом]	$L_q$ [мГн]	$L_d$ [мГн]	$\cos(\varphi)$	$U_\phi$ [В]	$\eta$	$p$
10000	63	164	175	0.0213	0.00282	0.0905	0.0426	0.7	29	0.931	8

Задавая положение вектора тока статора  $\mu$  относительно потока постоянных магнитов  $\Psi_0$ , состояние электрической машины и ее свойства, при ограничении тока и напряжения, определены уравнениями в следующей последовательности:

$$I = \sqrt{2} \cdot 175 = 247.50[A]; U = \sqrt{2} \cdot 29 = 41[B]; S = \frac{3}{2} UI = 1522[ВА]$$

$$i_d = I \sin(\mu); i_q = I \cos(\mu); I = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \quad (5)$$

$$\Psi_d = L_d i_d + \Psi_0; \Psi_q = L_q i_q; \Psi = \sqrt{\Psi_d^2 + \Psi_q^2} \quad (6)$$

$$m = \frac{3}{2} p (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d); U^2 = \frac{2}{3} \Delta P + r \frac{4}{3} m \omega + p^2 \omega^2 \Psi^2 \quad (7)$$

$$0 = \left( \frac{2}{3} \Delta P - U^2 \right) + r \frac{4}{3} m \omega + p^2 \Psi^2 \omega^2 \quad (8)$$

$$\omega = \frac{\sqrt{\left( r \frac{4}{3} m \right)^2 - 4 p^2 \Psi^2 \left( \frac{2}{3} \Delta P - U^2 \right)} - r \frac{4}{3} m}{2 p^2 \Psi^2} \quad (9)$$

$$P = m \omega; \frac{Q}{\omega} = p \frac{3}{2} (\Psi_d i_d + \Psi_q i_q). \quad (10)$$

Полная мощность  $S$ , являющаяся произведение модуля векторов напряжения и тока, при ограничении напряжения и тока, является постоянной величиной. Состояние явнополюсной синхронной машины, при ограничении полной мощности, подводимой к обмоткам двигателя, зависит от положения вектора тока [12-14] относительно потока постоянных магнитов. Проекция вектора тока и потокосцепления статора определены уравнениями (5 - 6). В зависимости от положения вектора тока изменяется величина электромагнитного момента. Уравнение для квадрата напряжения  $U$  получено путем преобразования системы уравнений (1) в установившемся режиме. При неизменном значении модуля вектора тока, в силу снижения потокосцепления при увеличении угла  $\mu$ , наблюдается значительный рост  $\omega$  угловой скорости. Значения скорости (9), при ограничении тока и напряжения определено путем решения квадратного уравнения (8) для каждого значения электромагнитного момента. На основании полученных выражений определена реактивная мощность и мощность, отдаваемая исполнительному механизму.

В результате анализа работы двигателя, при ограничении напряжения и тока, получены предельные функции  $m$ ,  $\Psi$ ,  $\omega$  и  $Q$  от угла  $\mu$ , представленные на рисунке 1. Экстремум элек-

тромагнитного момента (3), при изменении положения вектора тока, достигается не при угле  $\pi/2$ , что характерно для неявнополюсного двигателя, а за счет разности магнитного сопротивления продольной и поперечной оси достигается в функции тока при других углах. Отмечается снижение модуля потокосцепления статора  $\Psi$  при увеличении угла  $\mu$ , характеризующего положение вектора тока относительно потока  $\Psi_0$  постоянных магнитов. Снижение потокосцепления, в силу размагничивающего действия тока статора, обуславливает снижение потерь в стали и увеличение максимальной скорости  $\omega$  двигателя.

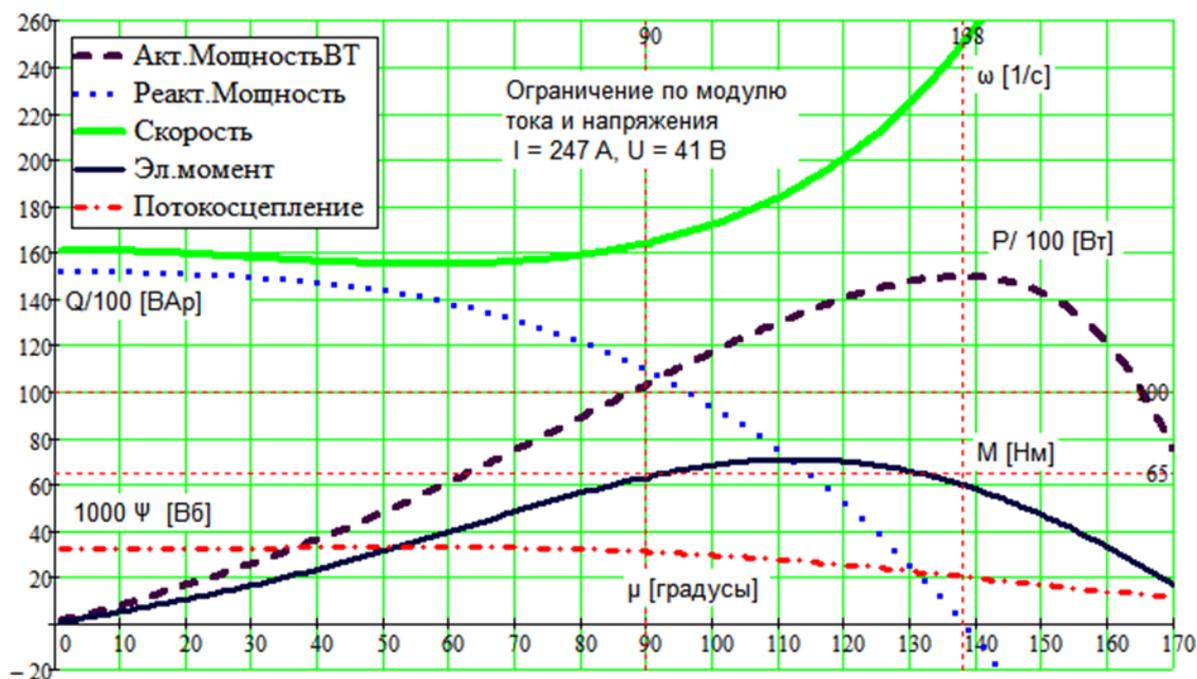


Рисунок 1 – Предельные функции  $\Psi$ ,  $m$ ,  $\omega$ ,  $\cos(\varphi)$  и мощности  $m\omega$ , отдаваемой исполнительному механизму, в зависимости от положения вектора тока при ограничении по модулю тока и напряжения

Улучшение показателя энергетической эффективности  $\cos(\varphi)$  позволяет увеличить мощность, отдаваемую исполнительному механизму. Наблюдается экстремум электромагнитного момента  $m$  при ограничении тока. Максимум мощности, отдаваемой исполнительному механизму, при ограничении тока и напряжения, достигается при минимизации реактивной мощности.

Положение  $\mu$  вектора тока доставляющее максимальный электромагнитный момент (3) определено путем минимизации функции энергетического состояния  $F(\mu)$

[15,16], связывающей силовые и энергетические характеристики двигателя. В качестве энергетических характеристик рассматривается квадрат тока, в качестве силовых характеристик выступает электромагнитный момент (5). На основании (12) определено положение тока в зависимости от его модуля (13), доставляющее экстремум электромагнитному моменту. Минимизация функции (11) увеличивает оценку  $\eta$  энергетической эффективности (14) не зависимо от скорости двигателя:

$$F(\mu) = \frac{3 r i^2}{2 m} \tag{11}$$

$$\frac{\partial F(\mu)}{\partial \mu} = 0; \frac{(L_d - L_q) i}{[\Psi_0 + (L_d - L_q) i \cos(\mu)]} = \frac{1}{\tan(\mu) \sin(\mu)} \tag{12}$$

$$\mu_{opt1} = \pi \pm \arccos \left[ \frac{\Psi_0 - \sqrt{8(L_d - L_q)^2 i^2 + \Psi_0^2}}{4(L_d - L_q) i} \right] \tag{13}$$

$$\frac{i_q}{i_d} = \tan(\mu_{opt1}); \eta = \frac{m\omega}{m\omega + \frac{3}{2}r_i^2} = \frac{\omega}{\omega + F(\mu)}, \quad (14)$$

$$UI = \sqrt{P^2 + Q^2}; Q = 0 \quad (15)$$

$$\mu = \arctg \frac{i_q}{i_d}; \varphi = 0 \quad (16)$$

$$\mu_{opt2} = \arccos \left[ \frac{\sqrt{\Psi_0^2 - 4L_q(L_d - L_q) i^2 - \Psi_0}}{3(L_d - L_q)i} \right] \quad (17)$$

Угол  $\mu_{opt1}$  характеризует положение вектора тока в функции его модуля, доставляющее минимум потерь в явнополюсной синхронной машине при различной нагрузке. В этих условиях ограничение тока на уровне 247 [А] соответствует электромагнитный момент 71 [Нм]. Эта величина на 12 % превышает электромагнитный момент системы управления током по поперечной оси. Важным фактором процесса электромеханического преобразования энергии является передача исполнительному механизму максимальной мощности, при ограничении тока и напряжения, подводимого к обмоткам двигателя. Эти условия могут быть достигнуты при минимизации реактивной мощности (4), величина которой зависит от угла  $\varphi$  между вектором тока и ЭДС от потокосцепления статора. Для реализации алгоритма управления, обеспечивающего передачу исполнительному механизму максимальной мощности (15), при выполнении условий (16) определено положение  $\mu_{opt2}$  вектора тока (17), при котором реактивная мощность минимальна. В этих условиях, при ограничении напряжения на уровне 41 [В], мощность, отдаваемая исполнительному механизму, увеличена на 45 %, максимальная скорость двигателя увеличена на 15% относительно показателей системы управления током по поперечной оси. Решения задач управления при регулировании энергетических свойств рассмотрены в работах [17-19]. В работе [20] представлено формирование управляющих воздействий. В работе [21] рассматривается синтез управления методом обратной модели с линеаризацией по выходу.

В работе рассмотрены решения позволяющие повысить энергетическую эффективность и обеспечить наиболее полное использование явнополюсной синхронной машины с постоянными магнитами при работе в условиях ограничения тока и напряжения, подводимого к обмоткам двигателя. Для аналитического исследования электрической машины применение функции энергетического состояния позволило выделить условия наиболее эффективной работы.

На примере рудничного электровоза с явнополюсной синхронной машиной показана возможность увеличения электромагнитного момента на 12 % относительно системы управления током по поперечной оси за счет эффективного использования различий магнитной проводимости продольной и поперечной оси. При минимизации реактивной мощности, в условиях ограничения модуля вектора напряжения на уровне 41 [В] и тока на уровне 247 [А], мощность, отдаваемую исполнительному механизму, можно увеличить на 45 %, а максимальную скорости двигателя увеличить на 15% относительно показателей системы управления током по поперечной оси.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

- 1 Weinger, A.M. On the possibility of an adjustable electric drive with a synchronous motor / A.M. Weinger, A. S. Gusev, Yu. S. Tartakovsky // *Electricity*. - 1971. - № 9. - p. 60-64.
- 2 Дартау В. А. Теоретические основы построения частотных электроприводов с векторным управлением. Автоматизированный электропривод / В.А. Дартау, Ю.А. П. Павлов, В. В. Рудаков. - М.: Энергия, 1980. - п. 93-101
- 3 Симаков Г.М., Филюшов Ю.П., Филюшов В.Ю. Комбинированное управление асинхронной машиной с короткозамкнутым ротором, 13-я Международная научно-техническая конференция по актуальным проблемам электронного приборостроения (АПЭПП), 2016 г., Новосибирск, Россия, 2016 г., стр. 175. -179, doi: 10.1109/APEIE.2016.7807048.
- 4 Терещев И. И. Электромеханические процессы в машинах переменного тока. - Л.: Энергия, 1980.5 Архипов А., Григорьев Е., Сеницын М. Север-

- 1 Weinger, A.M. On the possibility of an adjustable electric drive with a synchronous motor / A.M. Weinger, A. S. Gusev, Yu. S. Tartakovsky // *Electricity*. - 1971. - № 9. - p. 60-64.
- 2 Dartau, V. A. Theoretical bases of construction of frequency electric drives with vector control. Automated electric drive / V. A. Dartau, Yu. P. Pavlov, V. V. Rudakov. - M.: Energiya, 1980. - p. 93-101 .
- 3 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.
- 4 Treshchev, I. I. Electromechanical processes in alternating current machines. - L.: Energiya, 1980.
- 5 Filushov, Yu. P. The Rule of electric drive multi criteria optimization solutions choice // Yu. P. Filushov, G. M. Simakov, B. V. Palagushkin / 2018, 14th international scientifictechnical conference on actual problems of electronic instrument engineering. Power electronics and mechatronics control systems and automatic devices economic aspects of high technology industries developmen (APEIE – 2018) 44894 pro-

ный морской путь: ретроспектива, стратегические решения и перспективы развития // 2020. E3S Web of Conferences Volume 164, 5 May 2020, Номер статьи 11020 DOI : 10.1051/e3sconf/202016411020

5. Филюшов, Ю. Р. Правило выбора многокритериальных оптимизационных решений электропривода // Ю.В. Р. Филюшов, Г.М. Симаков, Б.В. Палагушкин / 2018, 14-я международная научно-техническая конференция по актуальным проблемам электронного приборостроения. Системы управления силовой электроникой и мехатроникой и устройства автоматики экономические аспекты развития наукоемких производств (АФЭИЭ – 2018) 44894 материалов. Том 1, часть 6, стр. 71 – 75

6 Симаков Г.М., Филюшов В.Ю., Филюшов Ю.П. «Управление асинхронным электроприводом без предварительного намагничивания», 18-я Международная конференция по микро/нанотехнологиям и электронным устройствам, 2017, 2017, стр. 525-528, doi: 10.1109 / EDM.2017.7981810.

7 Смирнов А. Ю. Особенности проектирования и анализа быстроходных синхронных машин с постоянными магнитами на роторе. Известия Нижегородского государственного технического университета имени Р. Е. Алексеева - 2013 г. - № 4 (101). – pp. 231-235.

8 Востриков А.С. Многокритериальный синтез многомерного управления электроприводом переменного тока / А.С. Востриков, Ю.С. П. Филюшов, Е. В. Прохоренко // Научный вестник НГТУ Научный вестник НГТУ вып. 70, № 1. - 2018, стр. 39 – 50

9 Усынин, Ю. С. Параметрическая оптимизация частотно-регулируемых электроприводов / М. А. Григорьев, А. Н. Шихов, С. П. Лохов, А. М. Журавлев / Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. - 2012. - № 37. - С. 30 - 33.

10 Глазырин, А. С. Методика определения параметров асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором / А. С. Глазырин, Е. В. Боловин / Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2013. – № 8 (79). – pp. 178 - 185.

11 Филюшов Ю.П., Филюшов В.Ю. Управление синхронной машиной при минимизации тепловых потерь в условиях минимальной реактивной мощности / Российская электротехника. 2013. Т. 84. № 12. С. 712-717.

12 Симаков Г.М., Филюшов Ю.П., Филюшов В.Ю. Регулирование энергетических характеристик работы асинхронного привода переменного тока. 13-я Международная научно-техническая конференция по актуальным проблемам электронного приборостроения, 2016. С. 1-1, doi: 10.1109/АПЭИЭ.2016.7806968.

13 Филюшов, Ю. П. Оптимизация электромагнитных процессов в синхронной машине / Ю. П. Филюшов, В.Ю. Филюшов / Электричество. 2011. — № 8. — с. 57-62.

14 Ю.П. Филюшов, Г.М. Симаков, М.А. Павлова, "Эффективная работа синхронной машины с различной магнитной проводимостью при возбуждении постоянными магнитами", Международная Уральская конференция по электроэнергетике (УралКон), 2020 г., Челябинск, Россия, 2020 г., стр. 205 – 208, , doi: 10.1109 / UralCon49858.2020.9216242

15 Симаков Г.М., Филюшов Ю.П., Филюшов В.Ю. Формирование энергоэффективного управления высокоскоростным электроприводом переменного тока. : 10.1109/ИФОСТ.2016.7884205.

16 Владимир В. Панкратов, Елена Александровна Зима. Новый метод автономной идентификации параметров асинхронных двигателей // Сибирско-русские семинары и учебные пособия по электронным приборам и материалам ЭДО 2002: Материалы семинара, 2002. Т.2. – Новосибирск, Россия: НГТУ, 2002. – С. 85 – 87.

17. Филюшов Ю.П., Симаков Г.М., Павлова М.А. Эффективная работа синхронной машины с различной магнитной проводимостью при возбуждении от постоянных магнитов. Международная Уральская

ceedings. Volume 1, Part 6, pp. 71 – 75

6 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.

7 Smirnov A. Yu, Features of designing and analyzing high-speed synchronous machines with permanent magnets on the rotor . Proceedings of the Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev - 2013 -№ 4 (101). – pp. 231-235.

8 Vostrikov A. S. Multi-criteria synthesis of multidimensional control of an alternating current electric drive / A. S. Vostrikov, Yu. P. Filyushov, E. V. Prokhorenko // Scientific Bulletin of the NSTU Science Bulletin of the NSTU vol. 70, № 1. - 2018, pp. 39 - 50.

9 Usynin, Yu. S. Parametric optimization of frequency - controlled electric drives / M. A. Grigoriev, A. N., Shishkov, S. P. Lokhov, A. M. Zhuravlev / Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering. - 2012. - № 37. - pp. 30 - 33.

10 Glazyrin, A. S. Method of identification of parameters of asynchronous electric motors with a short-circuited rotor / A. S. Glazyrin, E. V. Bolovin / Bulletin of the Irkutsk State Technical University. – 2013. – № 8 (79). – pp. 178 - 185.

11 Filyushov Y.P., Filyushov V.Yu. Control of a synchronous machine while minimizing heat losses under conditions of minimum reactive power / Russian Electrical Engineering. 2013. Т. 84. № 12. С. 712-717.

12 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, pp. 1-1, doi: 10.1109/APEIE.2016.7806968.

13 Filyushov, Yu. P. Optimization of electromagnetic processes in a synchronous machine / Yu. P. Filyushov, V. Yu. Filyushov / Electricity. 2011. - № 8. - p. 57-62.

14 Y. P. Filushov, G. M. Simakov and M. A. Pavlova, "Effective Work of a Synchron Machine with Different Magnetic Conductivity on Permanent Magnets Excitation," 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Chelyabinsk, Russia, 2020, pp. 205 - 208, doi: 10.1109 / UralCon49858.2020.9216242

15 G. M. Simakov, U. P. Filushov and V. U. Filushov, "The formation of energy-efficient control of a high-speed AC electric drive," 2016 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST), 2016, pp. 118 - 120, doi: 10.1109 / IFOST.2016.7884205.

16 Vladimir V. Pankratov, Yelena A. Zima. New off-line identification method of induction motor parameters// Siberian Russian Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM 2002: Workshop Proceedings, 2002. Vol.2. – Novosibirsk, Russia: NSTU, 2002. – pp. 85 – 87

17 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 Uergy / IEEE Catalog Number 261685 - 2020 .

18 Simakov G.M., Filyushov Y.P. Comparative evaluations of the energy properties of an asynchronous electric drive in transient processes / Russian Electrical Engineering. 2017. Т. 88. № 5. pp. 296 - 302.

19 Kim, D. P. Automatic Control. Theory Nonlinear and Multi-variable System. – Seol: Harnol, 2000. – 558 p. T2.

20 Jingzhen Yu, Youtong Zhang, Qiang Ai / High-speed control strategy for permanent magnet synchronous machines in electric vehicles drives: Analysis of dynamic torque response and instantaneous current compensation / doi.org /10.1016 /j.egy.2020.08.016. Volume 6, November 2020, Pages 2324-233.

21 Filyushov, V. Yu. Linearization of a nonlinear three - channel dynamic object by feedback / V. Yu. Filyushov / Nauchny vestnik NSTU. - 2017. - vol. 66. - № 1. pp. 43 - 49.

конференция по Grin Uenergy / IEEE Каталогный номер 261685-2020.

18. Симаков Г.М., Филюшов Ю.П. Сравнительные оценки энергетических свойств асинхронного электропривода в переходных процессах / Российская электротехника. 2017. Т. 88. № 5. С. 296 - 302.

19. Kim, D. P. Automatic Control. Theory Non-linear and Multivariable Sys-tem. – Seol: Hamol, 2000. – 558 p. T2.

20. Jingzhen Yu, Youtong Zhang, Qiang Ai / High-speed control strategy for permanent magnet synchronous machines in electric vehicles drives: Analysis of dynamic torque response and instantaneous current compensation / doi.org /10.1016/j.egy.2020.08.016. Volume 6, November 2020, Pages 2324-2333.

21. Филюшов В.Ю. Линеаризация нелинейного трехканального динамического объекта по обратной связи / В.Ю. Филюшов / Научный вестник НГТУ. - 2017. - вып. 66. - № 1. с. 43 - 49.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *Электропривод, явнополюсная синхронная машина, энергетические свойства, минимум потерь, реактивная мощность.*

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:** *Филюшов Юрий Петрович, д-р техн.наук, профессор ФГБОУ ВО «СГУВТ»  
Палагушкин Борис Владимирович, д-р техн.наук, профессор ФГБОУ ВО «СГУВТ»  
Селезнев Александр Александрович, аспирант ФГБОУ ВО «СГУВТ»*

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

---

## СОДЕРЖАНИЕ

### ПУТЬ. ПУТЕВОЕ ХОЗЯЙСТВО

<b>Бучельников М.А., Кофеева В.Н., Кофеев В.Н.</b> О ВЛИЯНИИ ВСТРЕЧНОЙ ШПОРЫ НА ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ УЧАСТКА РЕКИ В ПРОТОКЕ ВАРТОВСКАЯ ОБЬ РЕКИ ОБЬ.....	5
---	---

### TRANSPORT OPERATION AND ECONOMICS

<b>M.I. Buchelnikov, V.N. Kofeeva, V.N. Kofeev</b> ON THE INFLUENCE OF A METERING SPUR ON THE HY- DROLOGICAL CONDITIONS OF THE RIVER SECTION IN THE VARTOVSKAYA OB BODY OF THE OB RIVER.....	5
--	---

### СУДОВОЖДЕНИЕ

<b>Сичкарев В.И., Палагушкин Б.В., Умрихин В.П.</b> ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ФИЛЬТРАЦИИ РАС- ЧЁТНЫХ ВЫСОТ ВОЛН ПО РАДИОЛОКАЦИ- ОННОМУ ИЗОБРАЖЕНИЮ ВОЛНОВО-ГО ПОЛЯ .....	11
<b>Сичкарев В.И., В.П. Умрихин</b> ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЗАПИСЕЙ КАЧКИ СУДНА В ЭКСПЛУАТАЦИ- ОННОМ РЕЙСЕ.....	15

### MANAGEMENT AND MAINTENANCE OF MEANS OF TRANSPORT

<b>V.I. Sichkarev, B.V. Palagushkin, V.P. Umrikhin</b> APPLICATION OF THE METHOD OF FILTER- ING THE CALCULATED WAVE HEIGHTS FROM THE RADAR IMAGE OF THE WAVE FIELD .....	11
<b>V.I. Sichkarev, V.P. Umrikhin</b> HARMONIC ANALYSIS OF SHIP ROLL RE- CORDINGS DURING THE OPERATIONAL VOY- AGE.....	15

### ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

<b>Мукасеев А.В., Лебедев Б.О., Лебедев О.Б.</b> ВЛИЯНИЕ ИЗНОСА ПОРШНЕЙ НА ЭКОНО- МИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДИЗЕЛЯ .....	26
<b>Коноводов В.В., Агафонова Е.В., Хрянин В.Н., Губин Е.С.</b> СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ СОЕДИНЕНИЙ ТВЕРДОГО СПЛАВА И СТАЛИ, ПАЯНЫХ ЖЕ- ЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫМ ПРИПОЕМ (НА ПРИ- МЕРЕ ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА) .....	31
<b>Пинясов С.В., Юр Г.С.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ КАВИТАЦИОННОГО РАЗ- РУШЕНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ СТЕНКИ ЦИЛИНДРА ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТ- РЕННЕГО СГОРАНИЯ .....	37
<b>Пичурин А.М.</b> ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСКЛЮЧЕНИЯ ПОТЕРЬ НЕФТЕПРОДУКТОВ ПРИ ИХ ИСПАРЕНИИ В ПРО- ЦЕССЕ ТРАНСПОРТИРОВКИ ТАНКЕРАМИ.....	42
<b>Голомянов А.И., Викулов С.В.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДУКТОВ ИСПАРЕНИЯ БЕНЗИНА. ....	47

### HEAT POWER INDUSTRY

<b>A.V. Mukaseev, B.O. Lebedev, O.B. Lebedev</b> INFLUENCE OF PISTON WEAR ON DIESEL ECONOMIC INDICATORS .....	26
<b>V.V. Konovodov, E.V. Agafonova, V.N. Khryanin, E.S. Gubin</b> STRUCTURE FORMATION OF HARD ALLOY AND STEEL JOINTS BRAZED WITH IRON- CARBON SOLDER (ON THE EXAMPLE OF A CAR-BIDE TOOL) .....	31
<b>S.V. Pinyasov, G.S. Yur</b> INVESTIGATION OF CAVITATION DESTRUC- TION OF THE INTERNAL SURFACE OF THE CYLINDER WALL OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES .....	37
<b>A.M. Pichurin</b> EVALUATION OF THE POSSIBILITY OF ELIMI- NATING THE LOSS OF OIL PRODUCTS DUR- ING THEIR EVAPORATION DURING TRANS- PORTATION BY TANKERS.....	42
<b>A.I. Golomyanov, S.V. Vikulov</b> INVESTIGATION OF GASOLINE EVAPORA- TION PRODUCTS .....	47

### ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

<b>Филишов Ю.П., Палагушкин Б.В., Селезнев А.А.</b> СВЯЗИ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ ЯВНОПО- ЛЮСНОЙ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ С ПО- СТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ.....	50
---	----

### ELECTRIC POWER INDUSTRY

<b>Y.P. Filiushov, B.V. Palagushkin, A.A. Seleznev</b> RELATIONSHIPS OF THE BASIC PROPERTIES OF A GREAT-POLE SYNCHRONOUS MA- CHINE WITH PERMANENT MAGNETS .....	50
--	----

## PROCEDURE FOR RECEIVING MATERIALS

### 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  
№3-4 за 2020 год

Главный редактор – Палагушкин Б.В.

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

Подписано в печать 24.06.2020 г. с оригинал-макета  
Бумага офсетная №1, формат 60x84 1/8, печать трафаретная – Riso.  
Усл. печ. л. 37,3; тираж 500 экз. Заказ №109  
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