

- tion // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O.Makarova, 2015, № 3 (31). – Pp. 108–116 (in Russian).
2. Kruglov V.V. Artificial neural networks. Theory and practice, 2002.– 323 p. (in Russian).
  3. Kohonen T. Self-Organizing Maps, 2008.– 655 p.
  4. Osovsky S. Neural networks for information processing, 2002.– 343 p. (in Russian).
  5. Lynde Y., Buzo A., Gray R. An algorithm for vector quantizer design // IEEE Trans. Comm., 1980.– Vol. 28.– Pp. 84-95.
  6. Studenikin D.E. Estimation of vessel's movement with the aid of fuzzy logic based hierarchy systems (in english) [tekst] / D.E. Studenikin, E.V. Khekert, M.A. Modina // Morskoe intellektual'nye tekhnologii. 2018. T. 1. № 1 (39). S. 205-208.
  7. Karakaev A.B., Lukanin A.V., Hekert E.V. Razrabotka metodologii, metodov i modelej analiza vliyaniya razlichnyh variantov postroeniya struktury i rezhimov podderzhaniya i vosstanovleniya rabotosposobnosti sudovyh elektroenergeticheskikh sistem (chast' 1). Eksploatatsiya morskogo transporta. 2016. № 3(80). S.54-60.

УДК 62-822, 626.02  
DOI: 10.34046/aumsuomt92/22

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМОЖНОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО УЩЕРБА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОГРУЖНЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ

*А.В. Куницкий, кандидат технических наук  
М.Н. Чура, кандидат технических наук*

В статье рассмотрены вопросы экологической безопасности погружных гидроприводов подводных донных и плавающих машин, в которых используются рабочие жидкости на органической и синтетической основе. Такие рабочие жидкости относятся к загрязнителям моря по критериям, определяемым положениями Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов 1973 г., измененной протоколом 1978 г. к ней. Утечки этих жидкостей при эксплуатации подводных гидроприводов приводят к загрязнению окружающей среды. Рассчитаны объемы возможных установившихся утечек и залповых выбросов, на примере погружного гидропривода мощностью 10 кВт и определены возможные убытки на устранение последствий аварий и покрытие ущерба, нанесенного окружающей среде от рассчитанных объемов выбрасываемой жидкости. Рассмотрена возможность полного устранения указанных убытков за счет применения экологически чистых биodeградирующих водосодержащих рабочих жидкостей класса HFC. Применение рабочих жидкостей подобного класса упрощает конструкцию погружного гидропривода за счет исключения дополнительных уплотнительных устройств. Установлена целесообразность разработки рекомендаций методов проектирования погружного экологически безопасного гидропривода использующего рабочие жидкости класса HFC с учетом фактического состояния элементной базы гидропривода.

**Ключевые слова:** погружной гидропривод, рабочая жидкость, аварийные выбросы, рукава высокого давления, экологический ущерб, биodeградирующая жидкость

The article is dedicated to the issues of ecological safety while using submersible hydraulic drives and floating machines which consume organic-base and synthetic-base hydraulic fluids. Such hydraulic fluids are marine pollutants in compliance with the criteria defined by the provisions of MARPOL 73/78 (International Convention for the prevention of Pollution from Ships). The leakages of the above mentioned fluids during submersible hydraulic drives operation cause the environmental pollution. By the example of the submersible hydraulic drive with the capacity of 10 kw the volumes of possible leakages and burst releases were identified as well as the possible expenses to respond the consequences of emergency situations which affected the environment by the exhaust of the definite amount of fluid. The opportunity of the full elimination of the mentioned expenses by the application of nature friendly biodegradable water-base fluids of HFC class has been considered. The use of such class hydraulic fluids facilitates the design of submersible hydraulic drive by the elimination of sealing devices. There is a certain practicability to develop methodological recommendations for submersible ecological safe hydraulic drive with the consumption of HFC class hydraulic fluids considering the actual condition of hydraulic drive elements base.

**Keywords:** submersible hydraulic drive, hydraulic fluid, emergency releases, high-pressure hose, ecological damage, biodegradable fluid

Современные работы по гражданскому строительству в прибрежных зонах, примером которых является возведение морских сооружений и портов, прокладка трубопроводов и кабелей проводятся на морских акваториях на достаточно

больших глубинах. На практике, как правило, встречается небольшое число площадок, удовлетворяющих всем требованиям. Возникающие проблемы решаются путем проведения предварительных работ с применением специальных видов

подводного оборудования. Укрупнено можно выделить несколько областей использования подводных донных машин [1]

Характерным для современного подводного оборудования является применение гидропривода с надводным (глубины 25-100 м) или подводным (глубины более 100 м) размещением насосной установки на шасси машин, такая компоновка применяется для работ небольших глубинах, как показано в табл. 1.

Зарубежные фирмы «Stanley», «Potter», «Ackly» (США), «Hydrochief» (Англия), «Phosmogin Equipment» (Франция) выпускают несколько моделей гидропривода для обеспечения работы водолазного инструмента. Типовая схема гидравлических систем указанных приводов представлена на рис. 1.

Таблица 1 – Подводное оборудование с гидроприводом, используемое на различных глубинах моря

до 25–30 м	Земснаряды, машины для бурения скважин (платформа голландской фирмы «I.N.C.Holland», используется до 25 м), водолазные работы
до 60 – 80 м	Подводные машины для земляных работ, МНП (до 80 м). (подводный бульдозер компании «Komatsu» используется до глубины 60 м., земснаряд фирмы «Sub Sea oil Services»)
до 1000 м	Привязные и автономные необитаемые и обитаемые подводные аппараты, грейферные устройства, автономные земснаряды с погружным гидро- электроприводом рабочих устройств и двигателей. «SKANMARDRING»
более 1000м	Привязные и автономные необитаемые аппараты, траншекопатели, автономные земснаряды (разработан подводный траншекопатель, предназначенный для работ на глубине до 4800). «SMD-Hidrovision»



Рисунок 1 – Типовая схема гидравлических систем привода водолазного инструмента

Гидроприводы для подводных машин для глубин более 100 м имеют схему компоновки, с подачей электроэнергии по кабелю с судна-носителя (рис. 2).

Фирмами «SMD-Hidrovision» и «Perry Slynsgby» выпускается гамма унифицированных донных машин с гидроприводами различной мощности (рис. 3) [2].

Гидравлический привод морских технических средств представляет собой комплекс

устройств, обеспечивающих выполнение требуемых силовых операций за счет преобразования энергии потока рабочей жидкости, создаваемого чаще насосом в механическую работу гидравлических механизмов исполнительных органов и регулирование выходных параметров исполнительных элементов в режимах дистанционного полуавтоматического и автоматического управления.

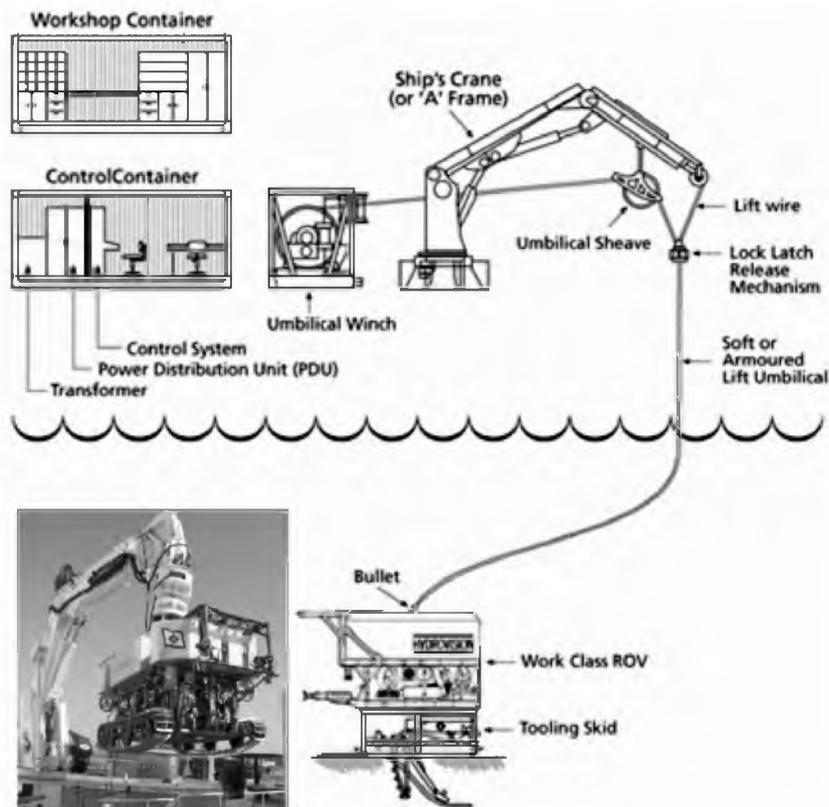


Рисунок 2 – Компоновочная схема подводных машин



Рисунок 3 – Подводные инженерные машины «SMD-Hidrovision»

Отличительными особенностями гидравлического привода современных донных инженерных машин являются: большое число автоматически или дистанционно управляемых оператором гидродвигателей, значительная мощность, широкий диапазон изменения нагрузок, стесненные условия компоновки, требования к обеспечению высокого КПД гидропривода при совмещении работы нескольких гидродвигателей, в некоторых случаях поддержание скорости исполнительных органов, независимо от нагрузки.

Одним из условий, обеспечивающим безотказную работу гидропривода морских технических средств является правильный выбор рабочей жидкости. От свойств жидкости зависят такие показатели гидросистем, как: эксплуатационная надежность в широком интервале изменения температур и давлений окружающей среды, рабочее давление, общий КПД гидропривода, срок службы уплотнений, экологическая безопасность.

На характеристики погружных гидроприводов влияет окружающая среда, т.к. вязкие и упругие свойства рабочих жидкостей, являющихся рабочим телом гидроприводов, изменяются с ростом гидростатического давления и понижением температуры. Применяемые в гидроприводах минеральные и синтетические масла, обеспечивают хорошие эксплуатационные характеристики и обеспечивают достаточно высокой вязкостно-температурной и вязкостно-барической стабильностью.

Однако, указанные жидкости не отвечают одному существенному требованию, предъявляемому к современным морским техническим средствам, а именно - экологической безопасности.

По данным Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA) ежегодно в океан попадает около 2,5 млн. литров нефтепродуктов, в том числе и рабочих жидкостей.

Минеральные гидравлические жидкости содержат присадки, в состав которых входят металлы - цинк и кальций. Эти элементы являются токсичными для микроорганизмов. Минеральная или синтетическая основы гидравлических жидкостей оказывает вредное воздействие на экосистему. Кроме того, минеральные базовые масла содержат ароматические углеводороды, образующие радужную пленку на водных поверхностях [3].

Растительные масла обладают рядом преимуществ по сравнению с минеральными маслами: низкая испаряемость, высокий индекс вязкости, хорошие смазывающие свойства в условиях граничной смазки, хорошие противоизносные свойства. Однако возможность применения природных растительных масел (рапсовое, соевое) ограничена из-за низкой термоокислительной и гидролитической стабильности и недостаточной низкотемпературной текучести. В случае их применения возможно негативное влияние на уплотнения систем. Таким образом, применение растительных масел в гидроприводах нецелесообразно, так как для данного применения окислительная стабильность масла в присутствии воды является одним из ключевых показателей, влияющих на надежность работы [3].

Опыт эксплуатации гидропривода, применяемого в оборудовании, подводной технике показал, что 42% отказов гидрооборудования обусловлено внешней негерметичностью.

Причем на долю, определяющую отказ уплотнений в указанном объеме отказов приходится 44% (из них 55% случаев относится к подвижным уплотнениям, 25% - к полуподвижным и 20% - к неподвижным) [4].

Анализ причин негативных последствий разгерметизации гидропривода инженерных машин показал, что элементами, определяющими вероятность возникновения аварийной разгерметизации гидросистемы, являются рукава высокого давления (РВД).

Подавляющее большинство отказов РВД носит усталостный характер, а наибольшее их число приходится на напорные участки, где РВД в большей мере подвержены воздействию динамических нагрузок от колебаний, пульсаций давления и от механических вибраций.

Основными видами отказов напорных РВД являются разрыв стенки рукава (53%) и вырыв концевой арматуры (35%), это объясняется тем, что режим работы гидропривода подводных машин характеризуется, по аналогии с подобным наземным оборудованием, как тяжелый, т.к. ему свойственны: высокая цикличность выполнения технологических операций при значительном числе включений управляющей гидроаппаратуры, приближение коэффициента использования рабочего давления к 1. Значение коэффициента продолжительности работы, под нагрузкой, составляют 0,7 ... 1,0.

Помимо этого необходимо отметить и значительное снижение коэффициента упругости шлангов, вызываемое ростом внешнего гидростатического давления.

Протяженность гидравлических магистралей и изменение емкости гидросистемы, обусловленное действием гидростатического давления, в комбинации с изменением пространственного положения рабочего оборудования, приводит к протеканию в гидроприводе переходных процессов. При этом скорость нарастания и максимальное перерегулирование по давлению могут значительно превосходить их предельные значения.

Перечисленные факторы, по мнению многих исследователей и являются причинами отказов РВД.

Отсутствие контроля герметичности гидрочертовых линий, значительные заправочные емкости гидросистем подводных горных и инженерных машин (до 600дм<sup>3</sup>) при высоких параметрах гидроприводов (номинальное давление 16 ... 32 МПа, суммарная подача насосов до 300 дм<sup>3</sup>/мин) приводит при разрушении РВД к выбросу большого количества рабочей жидкости из гидросистемы.

В результате потери рабочей жидкости в течение срока эксплуатации могут в несколько раз превышать объем гидробака. Выбросы рабочей

жидкости в результате разгерметизации гидропривода морских технических средств снижают его экономичность и экологическую безопасность.

По принятой классификации указанные потери рабочей жидкости характеризуются как сбросы, причем выделяют следующие основные виды сбросов: установившийся сброс, вызванный утечкой рабочей жидкости по неподвижным соединениям и уплотнениям валов и штоков исполнительных механизмов; залповый сброс, вызванный потерями рабочей жидкости, вследствие отказов рукавов высокого давления и аварийной раз-

герметизации баков с рабочей жидкостью; комбинированный, т.е. сочетающий два вышеуказанных вида.

Неизбежные утечки рабочей жидкости в процессе эксплуатации, а так же возможные выбросы рабочей жидкости в случае аварийной разгерметизации гидросистемы приводят к загрязнению окружающей среды, с необратимыми для нее последствиями.

На графике (рис. 4) представлены величины затрат на устранение последствий аварий и компенсации ущерба, нанесенного окружающей среде (тыс. долларов США) от объема выбрасываемой рабочей жидкости.



Рисунок 4 – затраты на устранение последствий аварий и компенсации ущерба

Оценочный анализ возможного ущерба от загрязнения окружающей среды и устранения его последствий, при комбинированном выбросе, на примере опытного образца погружного гидропривода мощностью 10 кВт, основывался на методике, предложенной в работе О.Н. Дубровского «Гидроэнергетические расчеты судовых силовых гидравлических приводов и систем» [4].

Потери рабочей жидкости по уплотнениям валов и штокам исполнительных гидромоторов и гидроцилиндров невелики, однако к концу ресурса уплотнений могут достигать 10-50 см<sup>3</sup>/час.

Эксплуатационные утечки жидкости оцениваются по зависимости:

$$\sum \Delta Q = \Delta Q_{mp} + \Delta Q_e$$

где:  $\Delta Q$  – эксплуатационные утечки;  $\Delta Q_{тр}$  – потери через неплотности в соединениях;  $\Delta Q_b$  – потери через уплотнения исполнительных механизмов. При оценке установившегося сброса

рассматривались утечки возникающие по соединениям трубопроводов и по уплотнениям вала гидромотора, в течение 2000 час. возможной эксплуатации.

Количество утечек по валу зависит так же и от его диаметра. Для общего случая рекомендуется следующая зависимость для определения утечек по валу:

$$\Delta Q_e = 0,25d_e$$

где  $d_b$  – диаметр вала мотора или штока силового цилиндра, см.

Для расчета утечек по трубным соединениям  $Q_{тр}$  применяется зависимость:

$$\Delta Q_{mp} = K'_v \times \frac{dp_{cp}}{v}$$

где:  $K_v$  – обобщенный коэффициент утечек,  $d$  – диаметр трубопровода, мм;  $v$  – кинематическая вязкость, сСт;  $P$  – среднее значение рабочего давления, кгс/см<sup>2</sup>.

Для расчетного случая принималось, что при протяженности трубопроводов гидросистемы 20 м, в среднем одно соединение приходится на 2,5 м, тогда число соединений  $i_c = 8$ .  $K_v = 5 \times 10^3$ . При рабочем давлении  $P = 16$  МПа, диаметр трубопровода  $d = 16$  мм, для принятого в системе масла АМГ-10, значение  $v$  при  $P = 60$  МПа и  $t = 2^\circ\text{C}$  составит 40сСт, тогда объем утечки по соединениям за 2000 часов эксплуатации составит:

$$Q = 17900 \text{ см}^3$$

В расчетном случае, для 6 исполнительных механизмов  $i=6$  при диаметре валов 6 см, и эксплуатации 2000 часов:

$$Q_v = 0,25 \times 6 \times 2000 = 3000 \text{ см}^3$$

Общий объем утечки составит:

$$Q = 3000 \text{ см}^3 + 17900 \text{ см}^3 = 20900 \text{ см}^3$$

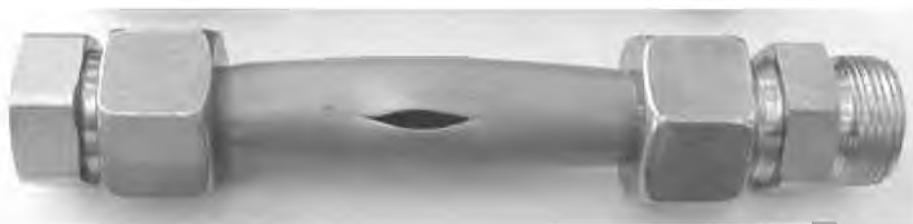


Рисунок 5 - Характер разрушения РВД

Однако, необходимо отметить, что в случае механического повреждения бака с рабочей жидкостью подводной машины, возникает вероятность выброса всего объема рабочей жидкости, что приводит, практически, к удвоению величины убытка.

Поскольку, требования экологических законодательств постоянно ужесточаются, а штрафы за загрязнение окружающей среды нефтепродуктами постоянно растут, становится экономически целесообразно применять экологически безопасные рабочие жидкости, так как их применение позволяет существенно сократить затраты на устранение последствий попадания их в окружающую среду, что позволяет избежать крупных штрафов. Помимо этого биоразлагаемые жидкости не содержат ароматических углеводородов и не образуют пленку.

Следовательно, наряду с мерами, исключающими возможность потери рабочей жидкости через уплотнения, разорвавшиеся РВД и обеспечивающими защиту системы (дополнительные запирающие уплотнения, противовыбросные устройства), необходимо предусматривать возможность применения экологически безопасных рабочих жидкостей.

Поэтому проблема разработки экологически чистого погружного гидравлического привода, прежде всего, связана с определением типа

Что и определяет значение убытка в 6,11 тыс. долларов США.

При залповом выбросе принималась во внимание вероятность выброса рабочей жидкости из системы через РВД (характер разрушения РВД показан на рис. 5) при условии установки в ней противовыбросного устройства. Подобные системы применяются для борьбы с аварийными выбросами рабочей жидкости, изолируя поврежденный участок гидролинии от насоса, при разрушении напорных РВД. Указанные устройства предотвращая полный выброс рабочей жидкости из бака, тем не менее, с момента возникновения негерметичности до локализации утечек, пропускают объем жидкости в пределах 150 ... 500 дм<sup>3</sup>. Объем убытка может колебаться в пределах 23,5 - 44,7 тыс. долларов США соответственно.

рабочей жидкости, которая, помимо требований, определяемых спецификой эксплуатации, отвечала бы и необходимым требованиям экологии.

Перспектива использования морской воды как рабочего тела погружных гидроприводов является с точки зрения экологии идеальным вариантом. Морская вода, имеет стабильную вязкость и высокий модуль объемной упругости. Однако, применение морской воды в погружных гидроприводах сопряжено со сложностями, вызванными проблемами плохой смазывающей способности, низкой вязкости к химической активностью морской воды. Коррозионная активность морской воды ограничивает выбор материалов. Малые зазоры в комбинации с низкой вязкостью и плохой смазывающей способностью увеличивают энергетические потери вследствие трения, приводит к сокращению сроков эксплуатации. Необходимо отметить, что это направление требует еще и долгосрочных программ исследования со значительными объемами финансирования [5].

Следовательно, целесообразна, разработка экологически чистого гидропривода, на основе водосодержащих биodeградирующих жидкостей класса HFC по классификации ISO 6743/4.

Учитывая отсутствие достаточного опыта по разработке гидроприводов глубоководной техники, эксплуатируемой на жидкостях класса HFC целесообразно проведение работ, связанных как с

анализом работоспособности элементной базы, применяемой в подводных гидроприводах, так и с экспериментальным исследованием образцов элементной базы, при эксплуатации на жидкостях типа НФС в условиях действия гидростатического давления.

#### Выводы

1. Создание погружного привода морских технических средств требует комплексного рассмотрения взаимосвязанных проблем: технических, экономических и экологических, решение которых позволит определить структуру гидравлического привода и рабочую жидкость, используемую в нем, оптимально соответствующую эксплуатационным требованиям

2. Гидроприводы подводных морских технических средств, использующие рабочие жидкости на основе минеральных и синтетических масел, не удовлетворяет требованиям экологической безопасности, т.к. загрязняют окружающую среду потерями рабочей жидкости в следствие установившихся утечек и выбросами при аварийной разгерметизации гидросистемы. При этом объем убытка может колебаться в пределах 23,5-44,7 тыс. долларов США соответственно.

3. Применение специальных противобросных систем не исключает возможность потери рабочей жидкости, а усложняют конструкцию гидропривода.

4. Проблема разработки экологически чистого погружного гидравлического привода, в большей степени, связана с определением типа рабочей жидкости, отвечающей требованиям экологии. Перспективным, с точки зрения сроков разработки и затрат на производство, является вариант гидропривода, эксплуатируемого на водосодержащих биодegradирующих жидкостях категории НФС, характеристики которых в большей степени соответствуют требованиям, предъявляемым к рабочим жидкостям погружных гидроприводов.

5. Т.к. вопросы применения жидкостей класса НФС в погружных гидроприводах, как в отечественной, так и зарубежной практике мало исследованы, целесообразна разработка рекомендаций и методов проектирования погружного экологически безопасного гидропривода, с учетом фактического состояния его элементной базы.

#### Литература

1. Seabed Mining: A technical review Erry, B., Johnston. Greenpeace Research Laboratories Technical Note 24/2000
2. Perry Slingsby Systems (PSS), Geotechnical & Seabed Systems, www.perryslingsbysystems.com, 07. 2017
3. Hayler M.G., Hampson D.F.G. Selection of hydraulic fluids. «Chartered Mech. Eng.», 1978, № 3, 56-57, 59.
4. Дубровский, О. Н. Гидроэнергетические расчеты судовых силовых гидравлических приводов и систем. - Л.: Судостроение, 1974.
5. Куницкий, А. В. Опыт применения биодegradирующей водосодержащей рабочей жидкости в экспериментальных образцах гидравлических приводов морских технических средств: Тезисы докладов научно-технической конференции «Гидравлика и гидропривод машин, автоматов и промышленных роботов в машиностроении». – Киев, 1990.
6. Кондратьев С.И. Теоретические основы управления крупнотоннажными судами по критериям безопасности и энергосбережения: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук.– Новороссийск, 2004.
7. Кондратьев С.И. Синтез программных траекторий методом динамического программирования// Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки.– 2003.– № S6.– С. 41-43.

#### References

1. Seabed Mining: A technical review Erry, B., Johnston. Greenpeace Research Laboratories Technical Note 24/2000
2. Perry Slingsby Systems (PSS), Geotechnical & Seabed Systems, www.perryslingsbysystems.com, 07. 2017
3. Hayler M.G., Hampson D.F.G. Selection of hydraulic fluids. «Chartered Mech. Eng.», 1978, № 3, 56-57, 59.
4. Dubrovskij, O. N. Hidroenergeticheskie raschety sudovyh silovyh gidravlicheskih privodov i sistem. - L.: Sudostroenie, 1974.
5. Kunickij, A. V. Opyt primeneniya biodegradiruyushchej vodosoderzhashchej rabochej zhidkosti v eksperimental'nyh obrazcah gidravlicheskih privodov morskikh tekhnicheskikh sredstv. Tezisy dokladov nauchno-tekhnicheskoy konferencii «Gidravlika i gidroprivod mashin, avtomatov i promyshlennyh robotov v mashinostroenii» - Kiev,1990.
6. Kondrat'ev S.I. Teoreticheskie osnovy upravleniya krupnotonnazhnymi sudami po kriteriyam bezopasnosti i energosberezheniya. Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk / Novorossijsk, 2004.
7. Kondrat'ev S.I. Sintez programmyh traektorij metodom dinamicheskogo programmirovaniya. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Seriya: Tekhnicheskije nauki. 2003. № S6. S. 41-43.