

the Wroclaw University of Economics / Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wroclawiu . 2017, Issue 470, p62-74.

#### REFERENCES

1. Reshnyak V.I., Sistema upravleniya ekologicheskoy bezopasnost'yu pri ekspluatatsii sudov na vnutrennih vodnyh putyakh, monografiya, SPb, Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2017, 140 str.
2. Reshnyak V.I., Predotvrashchenie zagryazneniya vodoemov neftesoderzhashchej podslanevoj vodoj pri ekspluatatsii sudov i sudovyh energeticheskikh ustanovok, monografiya, SPb, SPbGUVK, 2011. — 207 s.
3. Etin V.L., CHEban E.YU., Ivanov V.M., Vas'kin S.V., Lukina E.A., Sosonkov F.S., Organizaciya bor'by s razlivami nefli na vnutrennih vodnyh putyakh, Nizhnij Novgorod Izdatel'stvo FGBOU VO «VGUVT» 2015, 284 str.
4. Al'himenko, A. I. Avarijnye razlivy nefli v more i bor'ba s nimi / A. I. Al'himenko. — SPb.: OM-Press, 2005.— 237 s.
5. Kurnikov, A. S. Konceptiya povysheniya ekologicheskoy bezopasnosti sudna / A. S. Kurnikov. — N. Novgorod: Izd-vo VGAVT, 2002. — 80 s.
6. Plastinin A.E., Nauchnye osnovy prognozirovaniya m analiza ekologicheskikh posledstvij razlivov nefli na vnutrennih vodnyh putyakh, dis. ... doktora. tekhn. nauk., Nizhn. Novgorod, 2016 g.
7. Reshnyak V.I., Opyt organizacii i ispol'zovaniya tekhnicheskikh sredstv dlya likvidacii avarijnykh razlivov nefli / V. I. Reshnyak // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova. — 2018. — T. 10. — № 2. — S.
8. Reshnyak V.I., YUzvyak Z., SHCHurov A.G., Regulirovanie ekspluatacionnogo i avarijnogo zagryazneniya okruzhayushchej sredy na ob"ektah vodnogo transporta, ZHurnal uni-versiteta vodnyh kom-munikacij, №17, 2013 g. S. 85-90.
9. Turkin V.A. Ekologicheskaya bezopasnost' i ee mera - risk: aspekty teorii i praktiki / Turkin V.A., CHura N.N., zh-l Bezopasnost' v tekhnosfere, 2007, № 2. S. 11-16.
10. Domnina O.L., Zaharov V.N., Otdelkin N.S., Plastinin A.E. Ocenka ekologicheskogo riska transportnykh proisshestvij na vodnyh ob"ektah// Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. № 4(42). T.2. S. 79-86.
11. Tihomirov N.P., Metody analiza i upravleniya ekologo-ekonomicheskimi riskami, Uchebnoe posobie. M.: YUNITI-DANA, 2003. - 350 s.
12. Kozar L. Zarządzanie ryzykiem środowiskowym w przedsiębiorstwie jako kierunek wspierania budowy zielonej gospodarki, Research Papers of the Wroclaw University of Economics / Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wroclawiu . 2017, Issue 470, p62-74.

УДК 621.436

DOI: 10.34046/aumsuomt97/14

## КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СУДОВОГО МАЛОБОРОТНОГО ДИЗЕЛЯ

*А. Ю. Самойленко, доктор технических наук, доцент*

Для выяснения причин аварий - задигов цилиндно-поршневой группы судового дизеля 8RND90, была разработана и установлена на главный двигатель т/х "Маршал Говоров" полномасштабная система централизованного контроля (СЦКТ) температуры, контролирующая температуры поршней всех 8 цилиндров двигателя. Датчики температуры были подключены к расположенному на поршне электронному подвижному блоку. При подходе к нижней мертвой точке подвижный блок вступал во взаимодействие с расположенным в подпоршневом пространстве неподвижным блоком. При этом бесконтактным способом информационный сигнал передавался к неподвижному блоку, а питание подавалось на подвижный блок.

Использование СЦКТ в период опытной эксплуатации позволило установить непосредственную причину задигов цилиндно-поршневой группы – мощный прорыв газов из камеры сгорания через совмещенные замки поршневых колец. Опыт применения СЦКТ показал высокую информативность контроля теплового состояния поршней двигателя, возможность предотвращения с его помощью аварий цилиндно-поршневой группы, диагностирования технического состояния поршней, поршневых колец и втулок цилиндров. Опытный экземпляр СЦКТ в течение нескольких лет эксплуатировался на двигателе, при этом наработка ряда блоков СЦКТ составила десятки тысяч часов.

Параллельно с контролем температур поршней была реализована система мониторинга температуры крейцкопфных подшипников одного из цилиндров. Испытания показали ее работоспособность и высокую надежность.

Успешные результаты испытаний средств температурного контроля подвижных узлов дизеля позволили задолго до появления иностранных аналогов обосновать необходимость и сформулировать требования к техническому составу комплексной системы оценки технического состояния судового малооборотного дизеля.

Она использует высокотемпературные датчики (термопары) и обеспечивает возможность температурного мониторинга поршней, втулок, крышек, цилиндров, всех подшипников кривошипно-шатунного механизма и ряда других параметров.

Для специалистов в области автоматики и диагностики судовых дизелей.

**Ключевые слова:** дизель судовой, поршень, контроль температуры, система мониторинга технического состояния

## INTEGRATED SYSTEM FOR MONITORING THE TECHNICAL CONDITION OF THE SHIP'S LOW-SPEED DIESEL ENGINE

*A. Samoilenko*

To clarify the causes of accidents- seizure cylinder-piston group marine diesel 8RND90, was developed and installed on the main engine t/x "Marshal Govorov" full-scale centralized control system (SCCT) temperature, controlling the temperature of the pistons of all 8 cylinders of the engine. The temperature sensors were connected to an electronic movable unit mounted on the piston. When approaching the lower dead center, the movable block interacted with the stationary block located in the subsurface space. In this case, the information signal was transmitted to the stationary unit by a contactless method, and power was supplied to the mobile unit.

The use of SCCT during trial operation allowed us to establish the direct cause of seizure cylinder-piston group - a powerful breakthrough of gases from the combustion chamber through the matched locks of the piston rings. The experience of SCCT application has shown high informativeness of engine piston thermal condition monitoring, possibility to prevent accidents of cylinder-piston group with its help, diagnostics of technical condition of pistons, piston rings and cylinder bushings. The prototype of the SCCT was operated on the engine for several years, while the operating time of a number of SCCT units amounted to tens of thousands of hours.

In parallel with the temperature control of the pistons, a system for monitoring the temperature of the crosshead bearings of one of the cylinders was implemented. Tests have shown its performance and high reliability.

Successful results of tests of means of temperature control of mobile knots of the diesel engine allowed to justify long before appearance of foreign analogs need and to formulate requirements to technical structure of complex system of an assessment of a technical condition of the ship low-speed diesel engine.

It uses high-temperature sensors (thermocouples) and provides the possibility of temperature monitoring of pistons, bushings, caps, cylinders, all bearings of the crank mechanism and a number of other parameters.

For specialists in the field of automation and diagnostics of marine diesel engines.

**Keywords:** marine diesel, piston, temperature control, technical condition monitoring system

### Актуальность проблемы

В настоящее время отчетливо проявляется тенденция все более тщательного мониторинга работы судовых дизелей, особенно малооборотных. Так фирма *MAN DIESEL TURBO* уже более 10 лет оснащает свои мощные малооборотные дизели системой мониторинга подшипников кривошипно-шатунного механизма [11]. Первое упоминание о ней появилось на сайте фирмы в 2006 г. В перечень основных контролируемых данной системой параметров входит температура втулки цилиндра, температура рамового, мотылевого и крейцкопфных подшипников. Кроме того измеряется температура выпускных газов, содержание воды в смазочном масле подшипников, суммарный износ подшипников.

В этой связи уместно отметить, что данная задача в своей аппаратной части практически была решена учеными НВИМУ, с участием автора, задолго до этой даты, в середине 80-х годов. Побудительным мотивом для решения данной задачи стала проблема, возникшая при эксплуатации главных судовых двигателей *8RND90*, постройки Цегельский Зульцер (Польша). Они устанавливались в 70-х годах на нефтерудовозах типа "Маршал Буденный" Новороссийского морского

пароходства. Это были мощнейшие по тем временам судовые дизели и опыт их эксплуатации отсутствовал. Суда эти выполняли фактически стратегические перевозки, находившиеся под пристальным контролем советского руководства - из Новороссийска они везли на Кубу нефть, а затем из Канады везли в Союз зерно.

Однако, в первые же годы эксплуатации этих двигателей возникла специфическая проблема – задиры цилиндра-поршневой группы. Опыта эксплуатации таких мощных двигателей не было, причины возникновения аварий были неизвестными. Каждая авария вызывала примерно суточный простой судна и десятки тысяч долларов для замены цилиндра-поршневой группы – поршня и цилиндрической втулки и десятки тысяч долларов упущенной выгоды.

### Метод решения проблемы

Для выяснения причин таких аварий естественно было реализовать температурный контроль деталей цилиндра-поршневой группы (ЦПГ), поскольку аварии сопровождалась существенным ростом температуры узлов ЦПГ. Первая пробная попытка какого контроля была реализована в 1979 году на одном из цилиндров главного двигателя т/х "Маршал Жуков" и состояла в

установке электронного датчика, контролирующего температуру нижней части поршня – его тронка. Информация о температуре снималась с поршня бесконтактным способом, что обеспечивало весьма высокую надежность аппаратуры [8]. Применение этого пробного образца устройства контроля показало высокую информативность данного температурного параметра как с позиции отображения режима работы двигателя, так и с позиции диагностирования технического состояния поршня.

Однако однозначно установить причину возникновения задиrow поршней на основе температурного контроля тронка только одного поршня не представлялось возможным. Поэтому, было принято решение разработать и установить на двигатель полномасштабную систему централизованного контроля температуры (СЦКТ) всех 8 поршней двигателя, с контролем не только температуры тронка  $t_{тр}$ , но и головки поршня  $t_{п}$  (смотри рисунок 1). Датчики (термисторы) были подключены к расположенному на поршне электронному подвижному блоку (ПБ). При подходе к нижней мертвой точке подвижный блок вступал во взаимодействие с расположенным в подпоршневом пространстве неподвижным блоком (НБ). При этом бесконтактным способом информационный сигнал передавался к неподвижному блоку, а питание подавалось на подвижный блок

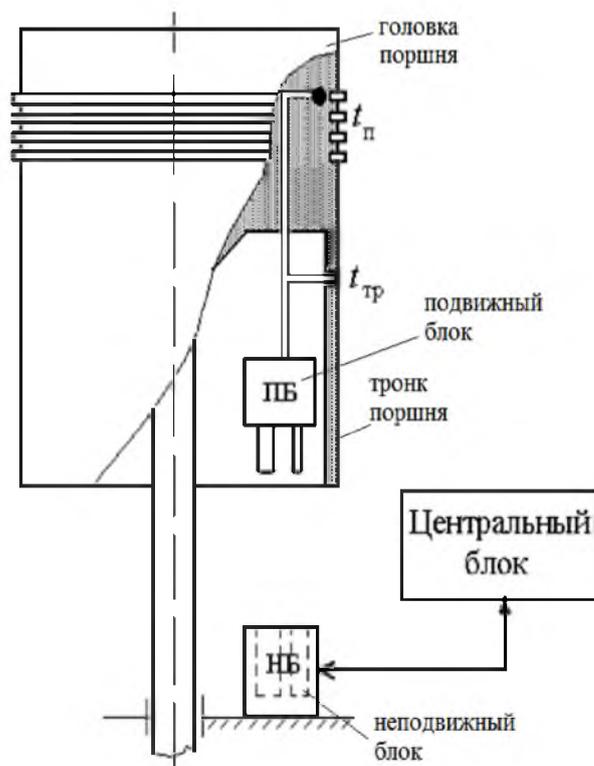


Рисунок 1 – Размещение блоков СЦКТ в двигателе.

Такая система была разработана на основе принципов бесконтактной передачи информации с поршня, отработанных на опытном образце, и в 1987 году смонтирована на всех 8 цилиндрах главного двигателя т/х "Маршал Говоров". Система имела аварийно-предупредительную сигнализацию, текущие значения температур регистрировались самописцем [6].

Эти работы выполнялись по заказу Новороссийского морского пароходства, причем монтаж выполнялся без вывода судна из эксплуатации. При монтаже потребовалось решить ряд весьма сложных технологических задач как по подготовке поршней к установке датчиков, так и по регулировке пространственного положения блоков системы.

#### Результаты испытаний системы мониторинга температуры поршней

СЦКТ поршней при непосредственном участии автора проходила испытания в эксплуатационном рейсе в 1987 году. В начальный период испытаний осуществлялась настройка СЦКТ, накапливался опыт ее эксплуатации. Двигатель, прошедший до этого ремонт, эксплуатировался в режиме обкатки. Полученные в этот период термограммы отличались высоким уровнем и нестабильностью температур поршней, с отдельными их повышениями до 240...300°C по головкам и до 96°C по тронкам (рисунок 2).

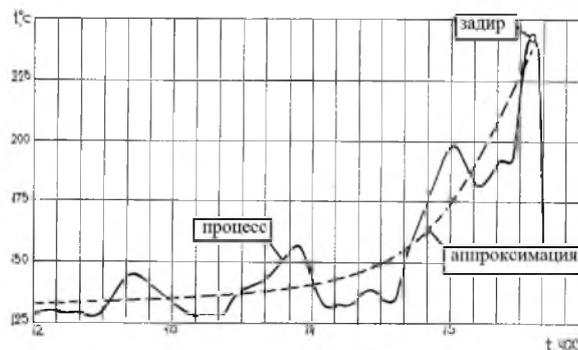


Рисунок 2 – Термограмма головки поршня цилиндра №5 перед задиром цилиндра

Поскольку до этого во время заводского ремонта была произведена ревизия всех цилиндров двигателя, такой характер термограмм первоначально воспринимался как нормальный. Отсутствие опыта эксплуатации СЦКТ и неясность причин нестабильности температур на начальном этапе породили недоверие судового экипажа к результатам термометрирования поршней, что впоследствии привело к тяжелым последствиям.

Однако произошедшие в последующем три аварии цилиндро-поршневой группы показали, что от СЦКТ поступает достоверная информация

и анализ термограммы позволяет за несколько часов до аварии прогнозировать ее приближение. На рисунке 2 показана характерная диаграмма, предшествовавшая задиру цилиндра.

Использование СЦКТ на ГД т/х "Маршал Говоров" позволило установить непосредственную причину имевших место аварий ЦПГ – мощный прорыв газов из камеры сгорания через совмещенные замки поршневых колец [1, 3]. Это стало возможным, поскольку в практике эксплуатации таких двигателей замки колец запиливались (скруглялись) с целью избежать их поломки, на длине окружности кольца до 100 мм при глубине запиливания порядка 2 мм. Естественно, что такая запиловка приводила к многократному увеличению проходного сечения для прорыва газов из камеры сгорания. Прорыв газов резко увеличивался при совмещении замков всех поршневых колец в узком пространственном угле. В имевших место трех случаях задилов этот угол характеризовался значением порядка 400 мм по окружности (в среднем  $+30^\circ$  поворота коленчатого вала по окружности). Такое совмещение замков имеет место из-за эллиптической деформации цилиндрической втулки в результате ее неравномерной температурной деформации [2]. Для двигателя Зульцер 8RND 90, имеющего контурную систему продувки, эллиптичность втулки характеризуется расположением большой оси эллипса в направлении с борта на борт. При этом, наиболее устойчивым является такое положение кольца, когда его замок располагается вдоль большой оси эллипса, что и показала ревизия поврежденных при аварии

поршней. Поэтому на рисунке 2 фактически отображена ситуация постепенного сближения замков поршневых колец на стороне выхлопа. Прорыв газов через совмещенные замки колец вызывал локальный перегрев втулки и она трескалась. Через трещину на поршень попадала вода из системы охлаждения втулки, что вызывало в свою очередь повреждение поршня.

Следует отметить, что во всех случаях аварий срабатывала аварийно-предупредительная сигнализация СЦКТ, однако вахтенный персонал не придавал этому значения, считая сигнализацию ложной. И лишь убедившись (после анализа аварий) в достоверности информации от СЦКТ ее показания стали в полной мере учитываться.

Выполненные работы по замене поршневых колец на незапиленные, позволили стабилизировать уровни температур поршней. На рисунке 3 показаны термограммы двух поршней двигателя, характерные для его нормального технического состояния и качественно отличающиеся от термограмм рисунка 2.

Из термограмм следует, что на фоне в целом стабильных и низких уровней температур имеются ее кратковременные подъемы, вызванные прохождением замков поршневых колец в районе расположения датчиков. Кратковременность всплесков температуры головки поршня свидетельствует о подвижности поршневых колец, а низкий средний уровень температуры – об отсутствии совмещения замков колец.

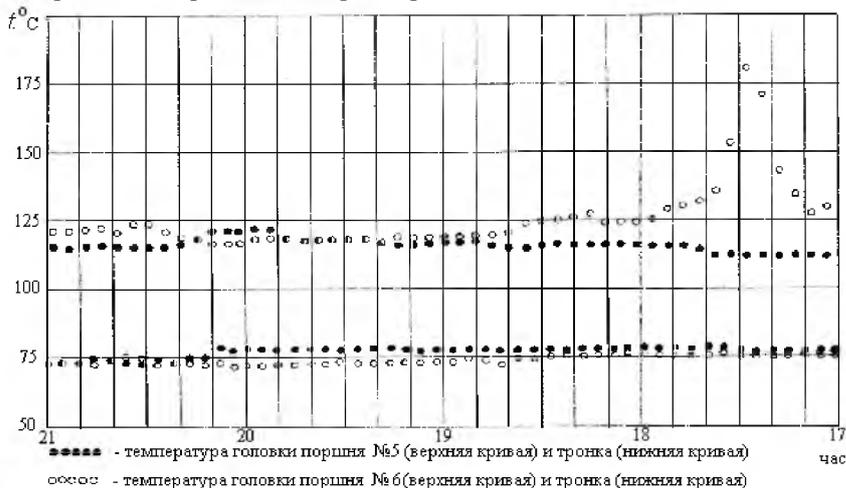


Рисунок 3 – Термограммы поршней цилиндров №5, №6, от 07.10.87 г

Опыт применения СЦКТ на т/х "Маршал Говоров" показал высокую информативность контроля теплового состояния поршней двигателя, возможность предотвращения с его помо-

щью аварий ЦПГ, диагностирования технического состояния поршней, поршневых колец и втулок цилиндров. Опытный экземпляр СЦКТ в течение нескольких лет эксплуатировался на т/х "Маршал Говоров". Нарботка ряда ПБ и НБ

СЦКТ составила десятки тысяч часов, при десятках миллионов циклов знакопеременных нагрузок интенсивностью (10...12) *g*.

Система централизованного контроля температуры крейцкопфных подшипников в одноцилиндровом варианте (на цилиндре №7) также была установлена на главном двигателе 8RND90 т/х "Маршал Говоров" и в течение нескольких месяцев проходила испытания. Отказов и сбоев в работе системы не наблюдалось - система надежно работала во всем диапазоне рабочих режимов двигателя. Значения температур подшипников изменялись от 45°C до 56°C, в зависимости от условий работы двигателя. Испытания показали ее работоспособность и высокую надежность во всем диапазоне режимов работы.

**Система мониторинга технического состояния судового дизеля**

Успешные результаты испытаний средств температурного контроля подвижных узлов двигателя и их дальнейшее совершенствование [3, 4], а также параллельно проведенные испытания имеющих на тот период электронных средств индикации, позволили уже к концу 80-х годов сформулировать требования к техническому составу комплексной системы мониторинга технического состояния судового малооборотного дизеля. Представленная на рисунке 4 структура такой системы по времени значительно опередила аналогичные разработки зарубежных производителей фирм.

В ней температурные измерения как подвижных, так и неподвижных узлов дизеля реализованы на базе унифицированного решения - многоканальной СЦКТ, являющейся существенно модифицированным вариантом, использовавшимся при испытаниях на т/х "Маршал Говоров" [4,5]. Главной отличительной особенностью многоканальной СЦКТ является использование высокотемпературных датчиков (термопар) с возможностью подключения их к одному подвижному блоку в количестве до 6 штук и обеспечение погрешности измерения на уровне десятых долей процента. Эти параметры и сейчас являются недостижимыми для аналогичных зарубежных разработок [4, 5, 10, 11].

В предлагаемой системе мониторинга используется несколько пар преобразователей сигналов – ПБ и НБ. Каждая пара обслуживает до 6 датчиков температуры, как подвижных, так и неподвижных узлов дизеля. На схеме рисунка 4 показаны датчики температуры поршня  $t_{п1}... t_{п3}$  (3 шт), температуры крейцкопфного  $t_k$ , мотылевого  $t_m$  и рамового  $t_p$  подшипников, температуры

цилиндровой втулки  $t_{вт}$ , продувочного воздуха  $t_{пр}$  и выпускных газов  $t_c$ . Датчик давления газов в цилиндре  $p_{цил}$  и угла поворота УП используются для индикации дизеля.

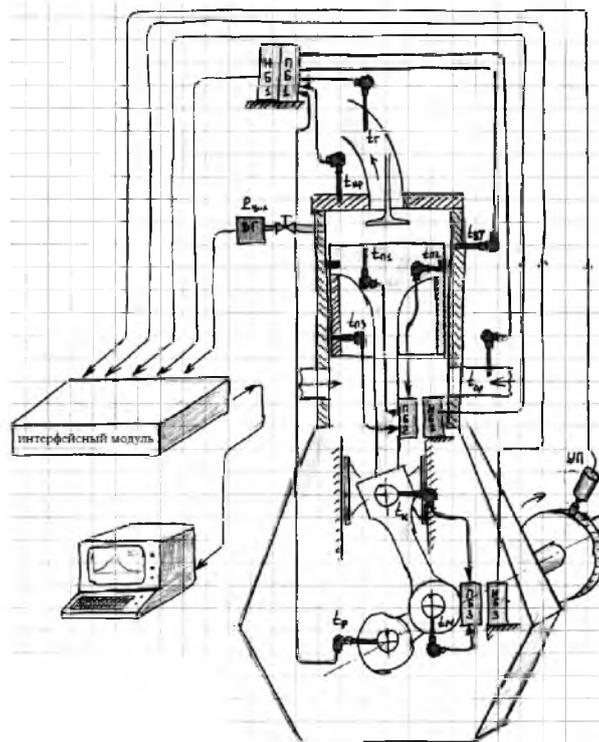


Рисунок 4 – Комплексная система мониторинга технического состояния судового малооборотного дизеля

Сигналы с НБ, датчика давления газов и угла поворота поступают в интерфейсный модуль и далее – в компьютер.

Наличие нескольких точек контроля температуры поршня на первый взгляд может показаться избыточным. Однако если взглянуть в перспективу, то это далеко не так. Значения параметров рабочего процесса в цилиндре дизеля (максимальное давление, среднее индикаторное давление и др.), несомненно, будут повышаться. А вслед за ними будет расти и тепловая напряженность деталей цилиндра-поршневой группы поршня, что потребует их более тщательного температурного мониторинга. Поэтому важным направлением повышения надёжности и эффективности технической эксплуатации судовых дизелей является разработка и внедрение информационных систем, которые позволят эффективно использовать результаты мониторинга и автоматизировать процедуры решения задач топливоиспользования. В частности – при использовании водотопливных эмульсий, как одного из способов снижения вредных выбросов и повышения экономичности судовых дизелей

Разработки автора настоящей статьи в области анализа и организации рабочего процесса дизеля [7] при их реализации также потребуют более тщательного анализа уровня тепловой напряженности дизеля, в том числе его подвижных узлов.

#### Заключение

В конце 80-х годов, значительно раньше зарубежных аналогов, была разработана и в своей основе практически апробирована отечественная комплексная система мониторинга цилиндропоршневой группы и кривошипно-шатунного механизма судового малооборотного дизеля. Однако плановая экономика СССР была невосприимчива к таким разработкам. А последующий переход страны к рыночной экономике радикально изменил условия разработки и внедрения аналогичных разработок, практически исключив в то время возможность их реализации.

В настоящее время необходимость технической реализации предлагаемой системы мониторинга стала безусловно актуальной. Это делает возможной и перспективной ее реализацию, в частности - на базе описанных выше отечественных разработок, в высокой степени конкурентоспособных с аналогичными зарубежными системами мониторинга.

#### Литература

1. Обеспечение промышленного внедрения задела по технической диагностике и проведение исследований в области создания перспективных микропроцессорных комплексов судовой автоматизации [Текст]: отчет о НИР (промежуточный): №01.86.00.42740/ В.А. Шишкин, А.Ю. Самойленко.- Новороссийск: НВИМУ, 1987.- 84 с.- Инв. №018800170065.
2. Овсянников, М.К. Эксплуатационные качества судовых дизелей/ М.К.Овсянников, В.А. Петухов – Л.: Судостроение. - 1982. – 208 с.
3. Полковников, А.К. Анализ отказов цилиндропоршневой группы главного судового двигателя/ А.К. Полковников, А.Ю. Самойленко, Н.А. Полковникова// Эксплуатация морского транспорта.– 2017.– №2(83).– С.128-142.
4. Самойленко, А.Ю. Многоканальное устройство для измерения температуры поршня двигателя/А.Ю. Самойленко// Авт. Свидет. СССР № 1354926, МКИ-3 G01K13/06. Оpubл. 1987.- бюлл.№2.
5. Самойленко, А.Ю. Перспективные средства контроля температуры деталей движения судовых дизелей /А.Ю.Самойленко// Изв. Вузов. Сев.-Кавк. Регион. Техн. Науки. –2003. Спецвыпуск.– С.87-91.
6. Самойленко, А.Ю. Система автоматического эксплуатационного контроля температуры поршней судовых дизелей/А.Ю. Самойленко, Н.Б. Исаков, Д.К. Пулиево: В кн.: Технические средства и системы автоматического управления судовыми энергетическими установками. – М.: В/О «Мортехинформреклама».- 1986. – С.31-37.
7. Самойленко, А.Ю. Частотный анализ индикаторных диаграмм судовых дизелей: монография /А.Ю. Самойленко, Г.И. Бжитов, Н.С. Шатворян.– Новороссийск: РИО ГМУ им. адм. Ф.Ф.Ушакова, 2016.–172 с.
8. Самойленко, А.Ю. Устройство для измерения температуры подвижного объекта/А.Ю. Самойленко, В.А. Шишкин//Авт. Свидет. СССР № 998875, МКИ-3 G01K13/04. Оpubл. 23.02.83.- бюлл. № 7.
9. Service Experience of MAN B&W Low Speed Diesel Engines. - 2010. - MAN Diesel & Turbo Teglholmsgade 41.2450 Copenhagen SV, Denmark.- www.mandieselturbo.com
10. Temperature monitoring system GB-10/KONGSBERG MARITIME AS NO-7005 Trondheim, Norway.- www.kongsberg.com
11. Temperature monitoring system SENTRY GB-100/ KONGSBERG MARITIME AS NO-7005 Trondheim, Norway. www.kongsberg.com

#### References

1. Obespechenie promyshlennogo vnedrenija zadela po tehnicheckoj diagnostike i provedenie issledovanij v oblasti sozdaniya perspektivnyh mikroprocessornyh kompleksov sudovoj avtomatizacii [Tekst]: otchet o NIR (pro-mezhutochnyj): №01.86.00.42740/ V.A. Shishkin, A.Ju.Samojlenko.- Novorossijsk: NVIMU, 1987.- 84 s.- Inv. №018800170065.
2. Ovsjannikov, M.K. Jekspluatacionnye kachestva sudovyh dizelej/ M.K.Ovsjannikov, V.A. Petuhov – L.: Su-dostroenie. - 1982. – 208 s.
3. Polkovnikov, A.K.Analiz otkazov cilindroporshnevoj gruppy glavnogo sudovogo dvigatelja/ A.K.Polkovnikov, A.Ju.Samojlenko, N.A.Polkovnikova// Jekspluatacija morskogo transporta.- 2017.-№2(83).-S.128-142.
4. Samojlenko,A.Ju. Mnogokanal'noe ustrojstvo dlja izmerenija temperatury porshnja dvigatelja/A.Ju.Samojlenko// Avt. Svidet. SSSR № 1354926, MKI-3 G01K13/06. Opubl. 1987.-bjull.№2.
5. Samojlenko, A.Ju. Perspektivnye sredstva kontrolja temperatury detalej dvizhenija sudovyh dizelej /A.Ju.Samojlenko// Izv. Vuzov. Sev.-Kavk. Region. Tehn. Nauki. -2003. Specvypusk.- S.87-91.
6. Samojlenko, A.Ju. Sistema avtomaticheskogo jekspluatacionnogo kontrolja temperatury porshnej sudovyh dizelej/A.Ju. Samojlenko, N.B.Isakov, D.K. Puliezo// V kn.: Tehniceskie sredstva i sistemy avtomaticheskogo upravlenija sudovymi jenergeticeskimi ustanovkami. – M.: V/O «Mortehinformreklama».- 1986. – S.31–37.

7. Samojlenko, A. Ju. Chastotnyj analiz indikatornyh diagramm sudovyh dizelej: monografija /A. Ju. Samojlenko, G. I. Bzhitov, N. S. Shatvorjan.- Novorossijsk: RIO GMU im. adm. F. F. Ushakova, 2016.-172 s.
8. Samojlenko, A. Ju. Ustrojstvo dlja izmerenija temperatury podvizhnogo ob#ekta/A. Ju. Samojlenko, V. A. Shishkin//Avt. Svidet. SSSR № 998875, MKI-3 G01K13/04. Opubl. 23.02.83.- bjull. № 7.
9. Service Experience of MAN B&W Low Speed Diesel Engines. - 2010. - MAN Diesel & Turbo
- Teglholmegade 41.2450 Copenhagen SV, Denmark.- www.mandieselturbo.com
10. Temperature monitoring system GB-10/KONGSBERG MARITIME AS NO-7005 Trondheim, Norway.- www.kongsberg.com
11. Temperature monitoring system SENTRY GB-100/KONGSBERG MARITIME AS NO-7005 Trondheim, Norway. www.kongsberg.com.

УДК 629.123.

DOI: 10.34046/aumsuomt97/15

### АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ТЕХНОЛОГИИ РЕКУПЕРАЦИИ НЕФТЯНОГО ГАЗА В ЦЕНТРОБЕЖНОМ СЕПАРАТОРЕ

*В. П. Бушланов, доктор физико-математических наук*

*И. В. Бушланов, кандидат физико-математических наук*

*В. Г. Новиков, аспирант.*

Разработан алгоритм решения системы уравнений технологии рекуперации нефтяного газа в центробежном сепараторе итерационным методом. Показано как задать неизвестное заранее безразмерное число Рейнольдса, начальное распределение параметров в сепараторе и далее предложен алгоритм численного итерационного процесса, в котором на каждой итерации рассчитывается новое более точное значение числа Рейнольдса. Процесс итерации продолжается до тех пор, пока указанное безразмерное число Рейнольдса перестает изменяться.

**Ключевые слова:** нефтяной газ, центробежная сепарация, уравнения Навье-Стокса, фазовая диаграмма.

### ALGORITHM FOR SOLVING THE SYSTEM OF EQUATIONS OF OIL GAS RECOVERY TECHNOLOGY IN A CENTRIFUGAL SEPARATOR

*V. P. Bushlanov, I. V. Bushlanov, V. G. Novikov*

An algorithm for solving the system of equations for the technology of oil gas recovery in a centrifugal separator by the iterative method has been developed. It is shown how to set an unknown beforehand dimensionless Reynolds number, the initial distribution of parameters in the separator, and then an algorithm for a numerical iterative process is proposed, in which a new more accurate value of the Reynolds number is calculated at each iteration. The iteration process continues until the specified dimensionless Reynolds number stops changing.

**Keywords:** petroleum gas, centrifugal separation, Navier-Stokes equations, phase diagram.

**Введение.** В качестве топлива для двигателей Mitsui-MANB&WME-GIE могут использоваться летучие органические соединения (ЛОС), выделяющиеся при погрузке и хранении сырой нефти. Пары, выделяющиеся при погрузке нефтеналивных судов, могут быть сконденсированы, причём конденсат содержит как высококипящие, так и низкокипящие компоненты нефти, соотношение которых в конденсате зависит от времени нахождения нефти в танке, частоты вентилирования танка, температуры и давления (см. в [1] табл.1.1 Компонентный состав выделяющихся при погрузке углеводородов по данным [2]). В диссертации С.П. Баскакова [2] объём эмиссии ЛОС за счет испарения в процессе его перевалки оценивается на основе литературных экспериментальных данных в 0,28 % от общего объёма нефти, перевозимой морем. В целях экологии и

экономики целесообразно не выбрасывать пары нефти в атмосферу, а рекуперировать для дальнейшего использования. Одним из методов рекуперации может являться центробежная сепарация, при которой происходит расслоение паров нефти различных молекулярных весов в центробежном поле сил центрифуги. В [3] получены уравнения модели центробежной сепарации паров нефти, когда из-за вращения около внешней стенки сепаратора повышается давление и достигаются условия конденсации паров. Давление и температура конденсации, определяются из фазовой диаграммы. Алгоритм решения указанных уравнений не является очевидным, что следует из того факта, что не при всех угловых скоростях вращения на внешней стенке сепаратора достигаются условия конденсации тяжелой фракции