



ОАО «Пролетарский завод»
192029, Санкт-Петербург, ул. Дудко, 3
тел.: (812) 567-17-56, факс: (812) 567-37-33
www.proletarsky.ru
E-mail: proletarskyzavod@peterlink.ru

Открытое акционерное общество «Пролетарский завод» (в прошлом Александровский завод, основан по приказу императора Александра I) одно из старейших машиностроительных предприятий Санкт-Петербурга. С момента пуска в 1826 г. как литейного заведения его профиль неоднократно менялся от декоративно-монументального литья и чеканки до парового судостроения и специализированного станкостроения. Неслучайно завод вошел в историю «живителем российских мануфактур». Начав с выпуска первого отечественного паровоза в 1845 г., завод более века выпускал подвижной состав для развивающейся сети российских железных дорог.

Последние 40 лет предприятие, преобразованное в 70-е гг. в научно-производственное объединение с включением в него ЦНИИ судового машиностроения и завода «Экономайзер», специализируется в основном на судовом и энергетическом машиностроении. На нем созданы многочисленные образцы корабельных механизмов, систем и комплексов, в ряде случаев не имеющие аналогов в отечественной практике. Можно без преувеличения сказать, что нет практически ни одного военного корабля или гражданского судна от тяжелого авианесущего крейсера, атомного подводного ракетносца и супертанкера до ракетного и прогулочного катера, где бы не эксплуатировалась продукция объединения. Значителен вклад предприятия в развитие большой энергетики.

Фирма обеспечивает монтаж, наладку, сервисное обслуживание и необходимый ремонт наиболее сложных изделий поставляемой техники.

Основными проектами выпускаемых изделий являются СКБ ЭМ, входящие в состав завода, и ЗАО «ЦНИИ СМ», что способствует успешному выполнения всего цикла создания новой техники от НИКОР до производства и обеспечения эксплуатации.

Внешнеэкономическую деятельность ОАО «Пролетарский завод» обеспечивает ЗАО ВТФ «Судмаш».

Деловое научно-техническое сотрудничество связывает предприятие со многими зарубежными фирмами, оно является неприменным участником российских и зарубежных выставок (в т.ч. МВМС-2003 в Санкт-Петербурге).

Придавая большое значение качеству экспортной продукции, для ее сертификации привлечены зарубежные инспекционные общества, в результате большинство экспортных изделий получили одобрение и сертифицированы Английским и Германским Ллойдом и норвежским Дет Норске Веритас. В 2002 г. фирмой получен сертификат соответствия системы управления качеством предприятия требованиям стандартов серии ИСО 9000, а также необходимые лицензии на производство различных видов техники.

В работе исследуются задачи управления (стабилизации, слежения) нелинейными стационарными объектами, процессы которых описывают нелинейные явления в сложных судовых, физико-химических, медико-технических, экологических системах. В качестве объектов управления выбраны хаотические модели Ресслера, Кукушкина–Осипова, Тьюринга [1–4]. Показано, что при помощи малого управления для этих систем возможна стабилизация выходной координаты на требуемом уровне. Все рассмотренные модели относятся к нелинейным объектам со структурой Гаммерштейна–Винера, поэтому выбрана и соответствующая структура регулятора – модальное ПИД-регулирование (modal PID-control) и линеаризация обратной связью (feedback linearization).

В последние три десятилетия для более точного описания процессов нерегулярных колебаний в различных системах используют хаотические модели, которые являются мощным инструментом для описания процессов в системах, ранее описываемых стохастическими моделями.

При исследовании динамики химических [1, 2, 5], технических [6, 4], экологических систем [4] часто наблюдается “странное”, хаотическое поведение. Хаотические модели объясняют причину “странных” нерегулярных колебаний не только внешними, случайными факторами, но и внутренними свойствами исследуемого объекта. С появлением таких моделей появились и задачи управления хаосом. В качестве примеров приведены задачи управления хаотическими моделями Ресслера, Кукушкина–Осипова и Тьюринга, рассмотренные ранее, например, в работах Фрадкова и Андриевского [1, 2, 7].

Известно [8], что если нелинейный объект можно представить в виде последовательного соединения нелинейного, линейного и нелинейного (Н-Л-Н) звеньев, то объект имеет структуру Гаммерштейна–Винера. Все рассмотренные модели также относятся к объектам со структурой Гаммерштейна–Винера (ГВ). Обобщенная структура объекта ГВ показана на рис.1.

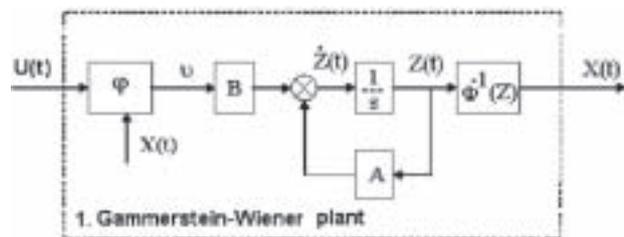


Рис.1. Структура модели ГВ [1]

Для объектов ГВ предложено использовать соответствующую структуру регулятора – линеаризация обратной связью (ЛОС) и модальное ПИД-регулирование. Эти методы описаны в зарубежной и отечественной литературе [3, 9, 10] последних лет, но изложены раздельно друг от друга.

В данной работе внимание уделено методу линеаризации обратной связью (feedback linearization) [3, 10]. Метод относится к задачам неполного управления и измерения, поэтому представляет особый интерес. Целесообразно

СИНТЕЗ АСТАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ МНОГОСВЯЗНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ, ЛИНЕАРИЗУЕМЫХ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

В.Ф. Сулов, канд. техн. наук,

генеральный директор ОАО «Пролетарский завод»

М.С. Катков, д-р техн. наук., проф.,

Государственный университет авиационного приборостроения

О.В. Надеждин, аспирант,

Государственный университет авиационного приборостроения

использовать ЛОС в тех случаях, когда объект является существенно нелинейным.

Суть метода ЛОС в следующем [3]. Рассмотрим этот метод для аффинных по управлению систем

$$\dot{X} = f(X) + g(X) \cdot u; \quad X \in \mathbb{R}^n; \quad U \in \mathbb{R}^m. \quad (1)$$

Система (1) называется линеаризуемой обратной связью в области $\Omega \in \mathbb{R}^n$, если существует гладкая обратимая замена координат и гладкое преобразование обратной связи имеет вид

$$u = \alpha(X) + \beta(X) \cdot v, \quad (2)$$

где $v \in \mathbb{R}^m$ – новое управление, что замкнутая система линейна, т.е. ее уравнение в линейных координатах можно записать в виде

$$\dot{Z} = A \cdot Z + B \cdot v \quad (3)$$

для некоторых постоянных матриц A и B.

Критерий линеаризуемости обратной связью имеет простой вид для систем с одним входом ($m = 1$). Именно, система (1) линеаризуема обратной связью в окрестности некоторой точки $X_0 \in \mathbb{R}^n$ тогда и только тогда, когда существует гладкая скалярная функция $h(X)$, такая, что система имеет в точке x_0 относительную степень n по отношению к выходу $y = h(X)$. Напомним, что относительная степень равна r , если последовательное дифференцирование выходной функции $y = h(X)$ в силу системы (1) дает выражение, содержащее вход точно на r -м шаге:

$$L_g L_f^k h(x) = 0, \quad k = 0, 1, \dots, r-2, \quad L_g L_f^{r-1} h(x) \neq 0, \quad (4)$$

где через $L_\Psi \Phi(x) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \cdot \Psi_i(x)$.

Если критерий линеаризуемости выполняется, то система может быть приведена к так называемой канонической форме Бруновского (цепи интеграторов) следующими преобразованиями:

$$Z = \Phi(X) = \text{col}(h(x), L_f h(x), \dots, L_f^{n-1} h(x)). \quad (5)$$

В работах [9, 11, 12] подробно изложен алгоритм син-

теза модального ПИД-регулятора для многомерного объекта управления. Применим рассмотренный алгоритм для одномерного случая.

Для синтеза управления разделим управление на два канала.

$$v = v_1 + v_2 \quad (6)$$

В качестве закона управления v_1 выберем ПИД-регулятор с двойным интегратором – для обеспечения астатизма 2-го порядка:

$$\begin{cases} v_1 = k_{i2} \cdot \int_0^t \int_0^t \varepsilon_r dt dt + k_{i1} \cdot \int_0^t \varepsilon_r dt + k_p \cdot \varepsilon_r + k_d \cdot \dot{\varepsilon}_r; \\ \varepsilon_r = Z_{rH} - Z_r. \end{cases} \quad (7)$$

Сделаем замену

$$v_z = v_1 - k_d \cdot \dot{\varepsilon}_r. \quad (8)$$

Продифференцировав по времени первое уравнение системы (7), получаем

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_r = X_{rH} - X_r; \\ \dot{v}_z = k_{i2} \cdot \int_0^t \varepsilon_r dt + k_i \cdot \varepsilon_r + k_p \cdot \dot{\varepsilon}_r; \\ v_1 = v_z + k_d \cdot \dot{\varepsilon}_r. \end{cases} \quad (9)$$

Таким образом, представлен 1-й этап проектирования многомерного комбинированного модального PID-регулятора, заключающийся в синтезе 1-го канала управления (7).

Представим ОУ (3) в следующем виде:

$$\begin{cases} \dot{Z}_r = A_{rr} Z_r + A_{r\bar{r}} Z_{\bar{r}} + B_r v + \mu_r; \\ \dot{Z}_{\bar{r}} = A_{\bar{r}r} Z_r + A_{\bar{r}\bar{r}} Z_{\bar{r}} + B_{\bar{r}} v + \mu_{\bar{r}}; \\ A_b = \begin{bmatrix} A_{rr} & A_{r\bar{r}} \\ A_{\bar{r}r} & A_{\bar{r}\bar{r}} \end{bmatrix}; B_b = \begin{bmatrix} B_r \\ B_{\bar{r}} \end{bmatrix}; \mu_b = \begin{bmatrix} \mu_r \\ \mu_{\bar{r}} \end{bmatrix}; X_b = \begin{bmatrix} Z_r \\ Z_{\bar{r}} \end{bmatrix}; \\ r = \text{rank}(B); \\ \bar{r} = n - r; \\ X = \{nx1\}. \end{cases} \quad (10)$$

Учитывая (3), (7), (9), (10), получаем параметры структуры расширенного объекта

$$\dot{Z}_\varepsilon = A_\varepsilon \cdot Z_\varepsilon + B_\varepsilon \cdot v_\varepsilon + \mu_\varepsilon, \quad (11)$$

где $Z_\varepsilon = \left[\int_0^t \varepsilon_r dt; \varepsilon_r; z_2; z_3; v_z \right]; A_\varepsilon - \{5x5\};$

$B_\varepsilon - \{5x1\}; \mu_\varepsilon - \{5x1\}; Z_\varepsilon - \{5x1\}.$

Здесь размерности векторов соответствуют случаю трехмерного исходного объекта с двойным интегратором-регулятором. Для корректирования динамики ОУ (рис.2) под желаемую динамику используем модальный регулятор

$$U_\varepsilon = -K_{mc} \cdot X_\varepsilon. \quad (12)$$

Матрица выбирается, исходя из желаемых корней ха-

рактеристического полинома

$$\varphi_g(s) = s^5 + \gamma_1 \cdot s^4 + \gamma_2 \cdot s^3 + \gamma_3 \cdot s^2 + \gamma_4 \cdot s + \gamma_5. \quad (13)$$

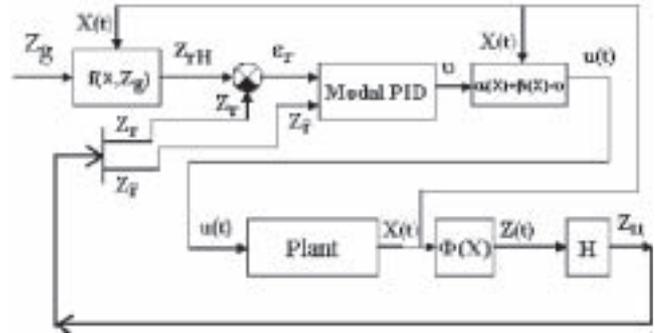


Рис.2. Структура комбинированной системы управления (feedback linearization + modal PID-control)

Рассмотрим ОУ:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -y - z; \\ \frac{dy}{dt} = x + a \cdot y; \quad a > 0; \\ \frac{dz}{dt} = b \cdot x - (c_0 + c(t)) \cdot z + x \cdot z; \quad b > 0. \end{cases} \quad (14)$$

Данный объект представляет собой хаотическую модель Ресслера. Нерегулярные колебания в данной системе наблюдаются, например, при следующих условиях:

$$\begin{aligned} x(0) = 1; \quad y(0) = 0; \quad z(0) = 0; \\ a = 0.38; \quad b = 0.3; \quad c_0 = 4.5. \end{aligned} \quad (15)$$

Необходимо синтезировать астатический регулятор координатой y с астатизмом 2-го порядка и требуемым условием качества при помощи управляющего воздействия $c(t)$ – см. рис.3.

Система (14) линеаризуема обратной связью [поскольку выполняется условие (4)], координаты системы в фор-

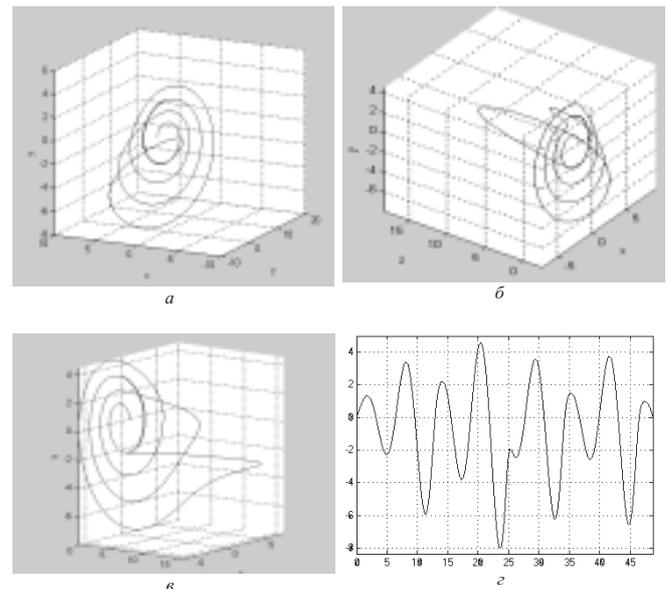


Рис.3. Фазовые портреты системы (а-в) Ресслера при начальных условиях (15); г – реализация во времени координаты $y(t)$ при начальных условиях (15)

ме Бруновского выражаются через координаты системы (14) следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = y; \\ \dot{z}_2 = z_1 = x + a \cdot y; \\ \dots \\ \dot{z}_3 = z_1 = a \cdot x + (a^2 - 1) \cdot y - z_2. \end{cases} \quad (16)$$

В итоге получаем линейную систему

$$\dot{Z} = A \cdot Z + B \cdot v;$$

где

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ b \cdot a - c_0 & a \cdot c_0 - b - 1 & a - c_0 \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \quad Z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 \\ \cdot \\ z_1 \\ \cdot \\ z_1 \end{bmatrix}; \quad (17)$$

$v = (a \cdot z_2 - z_1 - z_3) \cdot (c(t) - z_2 + a \cdot z_1)$ – новое управляющее воздействие (рис.4). (18)

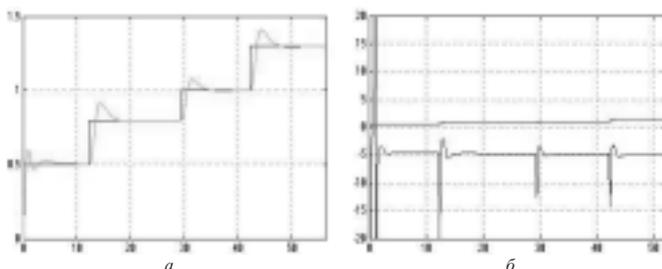


Рис.4. Процессы настройки координаты y : **а** – управляемый процесс при начальных условиях (15); **б** – управляющий и управляемый процессы при начальных условиях (15)

Результаты численного моделирования показали работоспособность рассматриваемой структуры регулятора. Следует заметить, что не все нелинейные объекты представимы в форме ГВ, но замечательно, что известные системы Ресслера, Лоренца, Тьюринга, Кукушкина–Осипова [1–4] относятся к моделям ГВ, и все они являются линеаризуемыми обратной связью.

Показана возможность стабилизации выходной координаты на требуемом уровне при помощи рассмотренной структуры. Результаты эксперимента показали также, что при отключении регулятора система стремится к одному из устойчивых состояний, либо к предельному циклу, либо к нерегулярным колебаниям. Все три исхода свойственны хаотическим системам.

Следует отметить, что на практике возникают следующие проблемы:

- редко аргументированы все параметры модели (1);
- невозможность измерить весь вектор состояния X .

Первая проблема решается включением в контур управления параметрического идентификатора; вторая – включением в контур управления идентификатора состояния (Калмана, Льюэнбергера и др.). Структура системы управления с включением идентификаторов показана на рис.5.

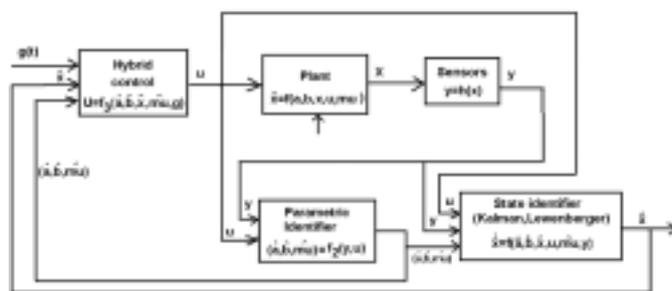


Рис.5. Гибридная система адаптивного управления непрямого действия нелинейным объектом

В работах [1–3] рассматривалось адаптивное управление непрямого типа объектами Ресслера, Кукушкина–Осипова, Тьюринга. В данной работе рассматривается гибридное управление теми же объектами, в предположении, что задачи параметрической и координатной идентификации уже решены.

Задача параметрической идентификации нелинейных объектов (в том числе типа Гаммерштейна и Винера) рассмотрена в работах [9, 5], Ивахненко [13], Иванова [14], Каткова [8], зарубежных авторов Льюнга, Эйкхоффа [15] и др.

Задача координатной идентификации (состояния) рассмотрена, например, в работах [7–9,15]. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Фрадков А.Л.. Кибернетическая физика: принципы и примеры. – СПб.: Наука, 2003. – 208 с.
2. Гузенко П.Ю., Кукушкин С.А, Осипов А.В., Фрадков А.Л.. ЖТФ. – 1997. – Т.69. – №9. – С. 47–51.
3. Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Управление хаосом: Методы и приложения. – Ч.1. Методы. М.: АИТ. – 2004. – Т.2.
4. Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Управление хаосом: Методы и приложения. – Ч.2. Приложения. М.: АИТ. – 2004. – Т.1.
5. Мирзаджанзаде А.Х., Хасанов М.М., Бахтизин Р.Н.. Этюды о моделировании сложных систем нефтедобычи. Нелинейность. Неравновесность. Неоднородность. – Уфа: Гилем, 1999. – 464 с.
6. Надеждин О.В. Дипломная работа на тему “Система управления нелинейным нестационарным непрерывным объектом управления” / Под рук. проф., д-р техн. наук М.С. Каткова. – СПб.: ГУАП, 2004.
7. Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л.. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB. – СПб.: Наука, 2000. – 475 с.
8. Катков М.С. Непрерывные системы адаптивного управления с идентификаторами. – М.: МПИ Мир книги, 1992.
9. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского – М.: 1987.
10. Голубев А.Е., Крищенко А.П, Ткачев С.Б. Принцип разделения для аффинных систем.
11. Катков М.С., Надеждин О.В. Модальное управление нелинейным нестационарным объектом. – Тр. Международного симпозиума по аэрокосмическим технологиям и приборостроению. – СПб.: ГУАП, 2004.
12. Nadezhdin O.V. Modal PID-controller syntheses of multi-input system. ВОАС’2004 preprints, SpbITMO, 2004.
13. Ивахненко А.Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. – Киев: Наукова думка, 1981 – 296 с.
14. Иванов А.И. Быстрая идентификация нелинейных динамических объектов. – Пенза, 1995.
15. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. – М.: Мир, 1975. ■

Представлена современная, эффективная (высоко производительная) технология монтажа судовых машин и устройств с применением специально разработанных для этой цели полимерных материалов. Приведены сравнительная оценка и анализ традиционной и современной технологии монтажа судовых машин и устройств, на основании технических, экономических и эксплуатационных критериев. Освещены вопросы, связанные с использованием полимерных материалов, а также основные их свойства и преимущества (технические, экономические, эксплуатационные). Приведены примеры, иллюстрирующие широкие возможности практического применения полимерных материалов при монтаже судовых машин и устройств.

ВВЕДЕНИЕ

Монтаж машин и устройств на судах – важная и неотъемлемая часть процесса их строительства, а также ремонта. Он имеет существенное влияние на издержки производства конечного продукта (судна), а также на качество функционирования, надежность и стойкость устанавливаемых машин и устройств. В полной оценке метода монтажа машин и устройств должны учитываться технические, экономические и эксплуатационные аспекты. В технико-экономической оценке нужно учитывать: издержки материалов и инструментов (необходимых при монтаже), сложность монтажа устройств, время и издержки выполнения монтажных работ, качество подгонки соединяемых элементов и узлов, состояние напряжений и монтажных деформаций. В ходе эксплуатации существенное значение имеют качество работы устройств, надежность и стойкость соединений, частота и сложность обслуживающих действий, снижение уровня вибрации механизмов и шума.

Развитие химии и технологии материалов, которое произошло в конце минувшего века, позволило разработать специальные материалы и технологии, предназначенные для строго определенных целей, применение которых на практике способствует получению технических, экономических и эксплуатационных преимуществ. Примером являются специальные полимерные материалы, разработанные для фундаментных подкладок судовых машин и устройств, а также эффективные технологии монтажа при использовании этих полимерных материалов, которые полностью выдержали практический экзамен и стали в настоящее время стандартом в монтаже машин и устройств на судах. Новая технология монтажа при применении фундамент-

СОВРЕМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ МОНТАЖА СУДОВЫХ МАШИН И УСТРОЙСТВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СПЕЦИАЛЬНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Карол Грудзиньски (Karol Grudzicki),

д-р техн. наук, проф.,

Щецинский политехнический университет, Щецин, Польша,

Веслав Ярошевич (Wieslaw Jaroszewicz),

д-р техн. наук,

владелец фирмы «Marine Service Jaroszewicz», Щецин, Польша,

Тарас Липкан,

генеральный директор ООО «Морской Сервис Ярошевич-СПб»,

Санкт-Петербург

ных подкладок, отливаемых из полимерного материала, оказалась особенно полезной в установке двигателя и передачи главного привода судна, где требования и затраты на монтаж особенно высоки.

Многие достоинства разработанных материалов и технологий монтажа способствовали их практическому использованию не только в судостроении и судоремонте, но также во многих других отраслях промышленности и строительства [1].

Целью этой статьи является представление основных технико-экономических и эксплуатационных преимуществ современной технологии монтажа машин и устройств при использовании специальных полимерных материалов, а также демонстрация широких возможностей их практического применения при строительстве и ремонте различных судов.

ХАРАКТЕРИСТИКА МОНТАЖА МАШИН И УСТРОЙСТВ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОДКЛАДКАХ И ПОДКЛАДКАХ, ЛИТЫХ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Монтаж тяжелых машин и судовых устройств, например главных двигателей выполняется не непосредственно на опорные поверхности фун-

дамента, а с применением специальных выравнивающих подкладок. Они используются для пригонки больших опорных поверхностей фундаментов и оснований монтируемых объектов, а также для обеспечения точной установки связанных между собой машин и устройств. Применение фундаментных подкладок приводит к замещению непрерывного подкрепления (поверхностного) подкреплением как бы «дискретным», в определенном числе «точек». Когда количество опорных «точек» больше трех, система превращается в статически неопределенную. В этом случае возникают трудности в пригонке фундаментных подкладок и определении сил взаимодействия машины и фундамента в опорных местах. При установке судовых двигателей и механизмов количество фундаментных подкладок, как правило, не менее четырех, зачистую их может быть десять и более.

Традиционный метод монтажа машин и устройств на фундаменте с применением металлических выравнивающих подкладок (рис.1,а), обладает рядом недостатков, к которым относятся:

- необходимость точной механической обработки опорной поверхности фундамента;
- обременительная и трудоемкая индивидуальная пригонка металличе-

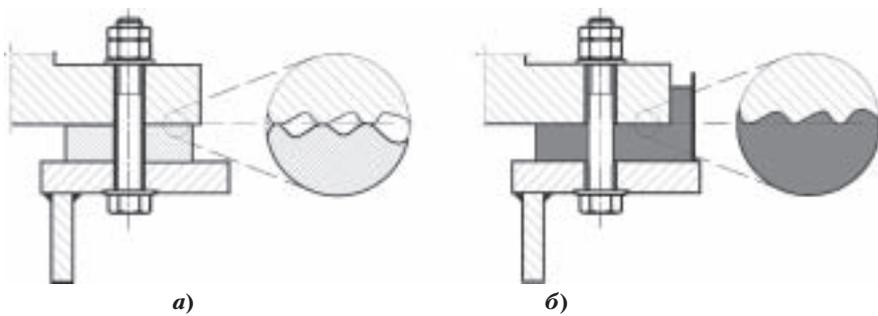


Рис. 1. Схема фундаментного болтового соединения: а – при применении металлических подкладок; б – при применении подкладок, отлитых из полимерного материала

- ких подкладок к опорным поверхностям фундамента и машины путем механической обработки;
- большая жесткость металлических подкладок, которая вызывает даже при малых неточностях при их пригонке большие напряжения;
- малая поверхность стыка подкладки с фундаментом и основанием машины [фактически она составляет малый процент номинальной поверхности стыка (рис.1,а)];
- длительное время монтажа и его высокие издержки;
- малое гашение и слабая изоляция механических и акустических колебаний во время эксплуатации.

Новая технология монтажа машин и устройств на фундаменте с использованием полимерного материала, заключается в точной установке объекта (например, двигателя, рис.1,б) на фундаменте с помощью специальных отжимных болтов или клиньев; изготовлением между фундаментом и основанием машины соответствующих заливных форм из полиуретановой пенки и стальной жести (рис.1,б) и дальнейшего заливания форм жидкой (надлежаще смешанной с отвердителем) композицией.

После отверждения этой композиции в соответствующих термических условиях получают готовые фундаментные подкладки. Затем устраняются отжимные болты или клинья и окончательно затягиваются прежде свободно вставленные фундаментные болты.

Использование полимерного материала для фундаментных подкладок и литье их «на готово», непосредственно на фундаменте под машиной, установленной в эксплуатационном положении, упрощает многие работы, связанные с монтажом, и значительно сокращает время его реализации.

Подкладки литые «на готово» точно соприкасаются с опорными поверхностями фундамента и машины и заполняют все неровности этих поверхностей. Это гарантирует лучшее распределение истинных нормальных давлений на контактные поверхности соединяемых элементов, а также по-

вышает эффективный коэффициент трения (близкий единице или больше единицы).

Хорошее соприкосновение отлитой из полимерного материала подкладки на большой поверхности стыка имеет большой коэффициент эффективного трения, что говорит о качестве и надежности монтажа, при этом не образуются коррозия трения и другие формы износа контактных поверхностей.

Положительные результаты при нормальных и касательных нагрузках контактного соединения металлических поверхностей со слоем полимерного материала между ними иллюстрируют натурные испытания (рис. 2 и 3). В случае контактного соединения металлических поверхностей без слоя полимерного материала нормальная контактная деформация имеет относительно большую величину, нелинейные течения и упругопластический характер (рис.2, кривая d_a) [1]. В результате действия динамических нагрузок во время эксплуатации машин в микропространствах истинного контакта возникают значительные пластические деформации, результатом которых являются так называемое

«оседание» соединенных элементов и зазорность болтовых соединений, а также «выбивка» опорных поверхностей фундамента, подкладки и основания машины, срыв фундаментных болтов, нестабильность работы машины, аварии и т.п.

При контактном соединении металлических поверхностей со слоем пластмассы возникают относительно малые величины контактной деформации, с линейным течением и упругим характером (рис. 2, кривая d_b). Это гарантирует надежность таких соединений, как при нагрузках статических, так и динамических.

В непосредственном контактном соединении (сталь-сталь) уже при относительно малых касательных напряжениях образуются микроскольжения (рис.3,б, кривая 1, рис.3,г, кривая d_1); если эти напряжения изменяются циклически, то они вызывают эффект коррозии трения. Присутствие пластмассы в контактном соединении элиминирует возникновение микроскольжений и гарантирует линейно-упругий характер контактных касательных деформаций, при значительных величинах касательных напряжений как статических (рис.3,б, кривая 2), так и динамических (рис.3,г, кривая d_1). В этих условиях не проявляются эффекты коррозии трения и другие формы износа контактных поверхностей.

МАТЕРИАЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ МОНТАЖЕ СУДОВЫХ МАШИН И УСТРОЙСТВ

При монтаже машин и устройств используются полимерные материалы, разработанные специально для этих целей. К ним предъявляются очень высокие и множественные требования

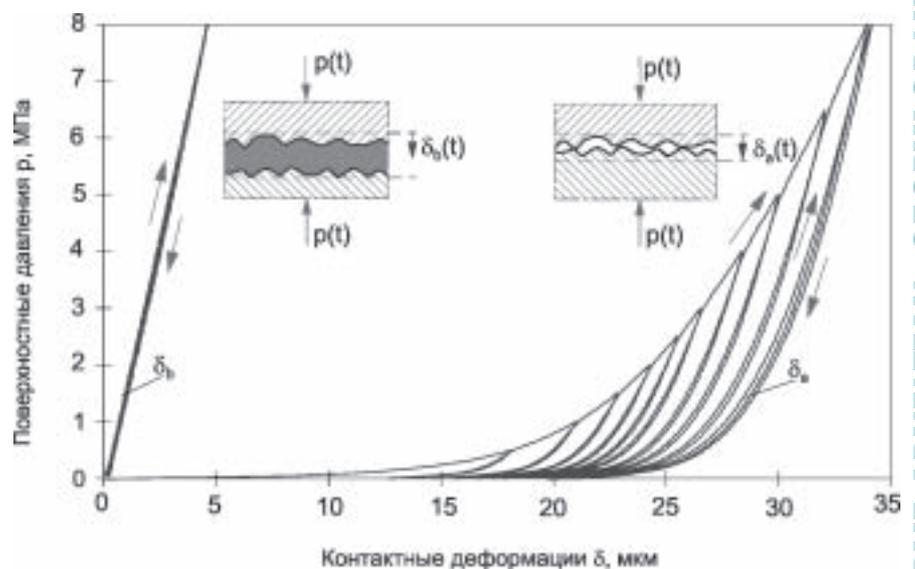


Рис. 2. Зависимость нормальных контактных деформаций от поверхностных давлений для контактного соединения металлических поверхностей без слоя пластмассы (кривая d_a) и с тонким слоем пластмассы (кривая d_b)

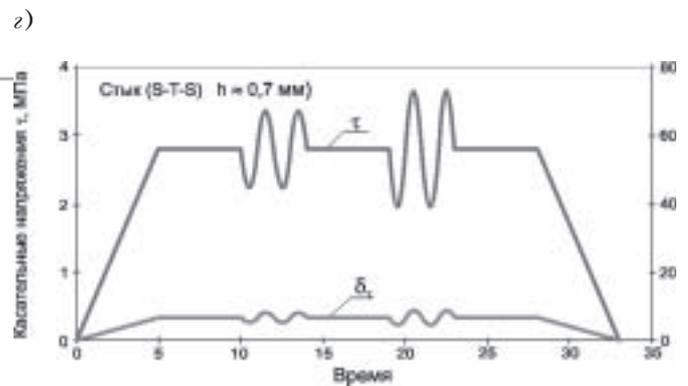
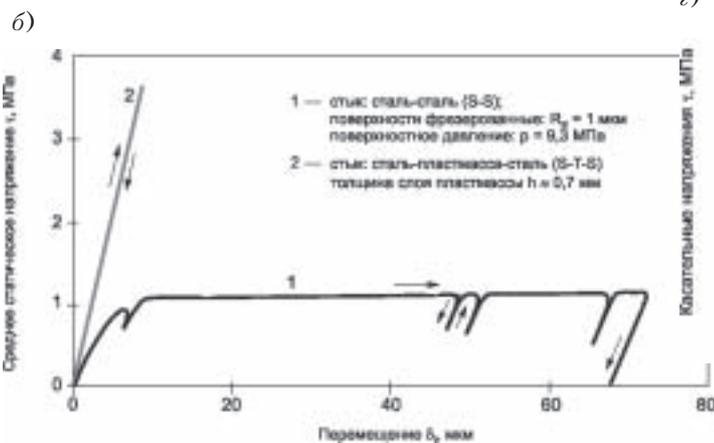
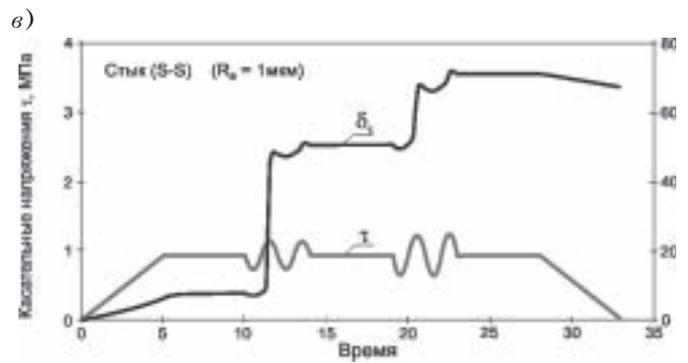
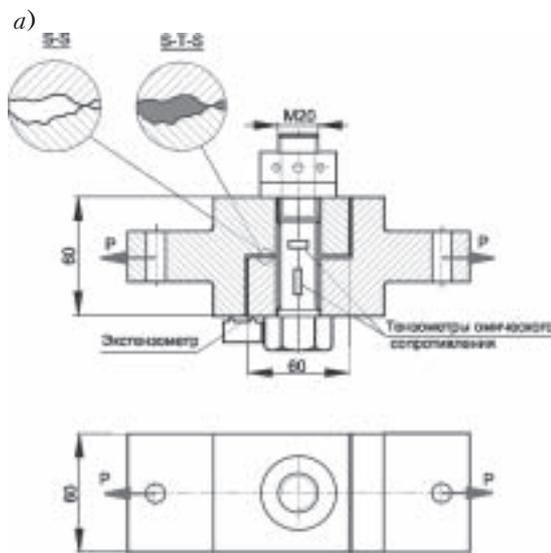


Рис. 3. Схема болтового (а) соединения (сталь-сталь) и с тонким слоем пластмассы (сталь-пластмасса-сталь), а также его характеристики контактных касательных деформаций при нагрузках статических (б) и динамических (в, г)

[1, 2, 3]. Они касаются как свойств технологических, прочностных, так и эксплуатационных. Наиболее известными в мире являются три типа полимерных материалов, которые получили все необходимые для использования в судовом строительстве разрешения и сертификаты. Это специальные полимерные пластмассы «Chockfast» (американского производства), «Eprocast» (немецкого производства) и «EPU» (польского производства). Основные свойства этих пластмасс характеризует рис.4.

Эти пластмассы появились в результате многолетних исследований, проводимых в тесном сотрудничестве с судостроительной отраслью, а также с классификационными обществами, осуществляющими техническое наблюдение за постройкой, эксплуатацией и ремонтом судов. Они имеют свидетельства одобрения мировых изготовителей судовых двигателей («Wärtsilä-NSD», «MAN-B&W», «Sulzer»), а также классификационных обществ (LR, GLRS, RMRS, ABS, BV, DnV, PRS...).

Производители этих пластмасс имеют сертификаты соответствия систем менеджмента качества требованиями ИСО 9001:2000.

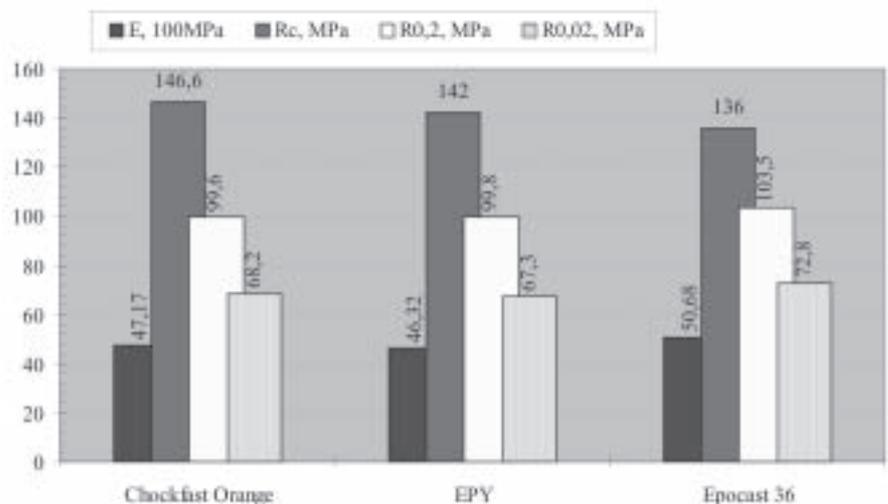


Рис. 4. Основные свойства пластмасс, используемых для фундаментных подкладок судовых машин и устройств

1 – стык «сталь-сталь» (S-S); поверхности фрезерованные, $R_a = 1$ мкм; поверхностное давление $P = 9,3$ МПа; 2 – стык «сталь-пластмасса-сталь» (S-T-S) толщина слоя пластмассы $h \approx 0,7$ мм; 3 – стык S-S, $R_a = 1$ мкм; 4 – стык S-T-S, $h \approx 0,7$ мм.

ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕРЫ МОНТАЖА

Впервые фундаментные подкладки, литые из полимерных пластмасс,

использовались при установке судовых машин и устройств в середине 60-х гг. [4].

В Польше (Щецинский политехнический университет) испытательные исследования начали проводиться на систематической основе с 1970 г.,

где продолжают по сей день. Разработанные пластмассы с определенными свойствами, совершенствовавшиеся со временем [1], оказались материалом идеальным при установке машин на фундаментные подкладки. Об целесообразности их применения на практике говорят прежде всего следующие факты:

- возможность подготовки композиции для отливки фундаментных подкладок непосредственно на месте их применения;
- очень хорошее соприкосновение заливаемой пластмассы на протяжении всей поверхности стыка с металлом (без дополнительной обработки);
- хорошие сопротивляющие свойства отвердевшей пластмассы;
- хорошие упругогасительные свойства пластмассы и большая величина эффективного коэффициента трения;
- малая усадка литья и малая ползучесть;
- значительное сокращение времени и снижение затрат монтажа машин и устройств;
- улучшенные показатели гашения колебаний и изоляции прохождения, так называемых материальных звуков (рис. 5).

Подкладки из полимерной пластмассы предназначены прежде всего для монтажа новых устройств, а также ремонтных работ, проводимых в отдалении от ремонтного цеха. Кроме черновой очистки и обезжиривания поверхности фундамента, не требуется никакой специальной ее подготовки. Выступающие неровности, коррозионные язвы и непараллельные поверхности, затрудняющие или прямо исключают применение традиционных металлических подкладок, не представляют никаких сложностей при использовании подкладок из пластмассы.

На протяжении более 30 лет практического применения польских полимерных пластмасс (усовершенствованных со временем) [1] выполнен монтаж на 8048 различных объектах, в том числе 6938 судовых машин и устройств (из них – 1661 главных двигателей).

Полимерные пластмассы для фундаментных подкладок разработаны прежде всего с целью упрощения и сокращения времени монтажа судовых двигателей и передач, требования к которому особенно высоки. Применение подкладок из пластмасс, литых «на готово», под установленным двигателем значительно сократило время (с одной-трех недель до двух дней) и снизило затраты связанные с монтажом. Главным двигателем, установленным на фундаментные подкладки из

пластмассы «EPY», показан на рис.6. Этот двигатель установлен на 20 подкладках (размером 500 x 400 x 50 мм). Схема расположения приведена на рис.5,б.

мер дейдвудных труб, рис.7), при употреблении пластмассы, заключается в соответствующей их центровке с помощью отжимных болтов (рис.7,б) и заливке жидкой пласт-

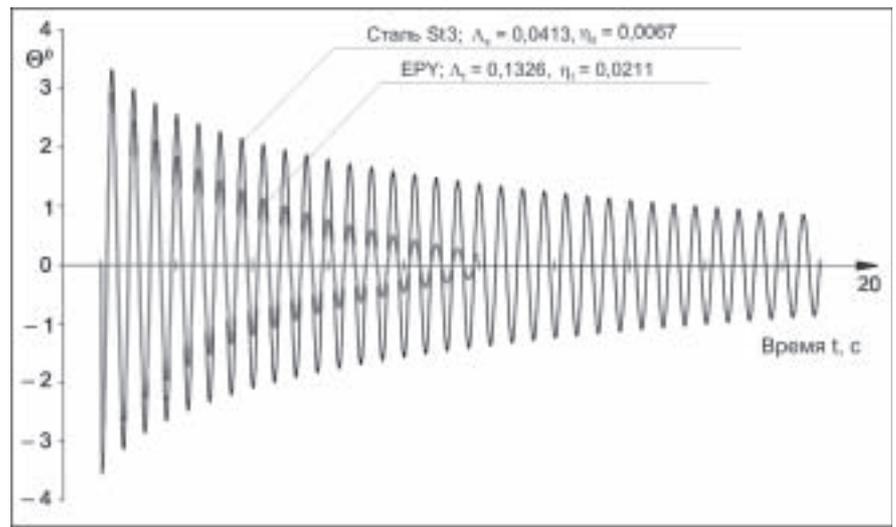


Рис.5. Амплитудно-временные характеристики для стали Ст3 и пластмассы «EPY», полученные при 20°С и частоте $f = 1,77$ Гц

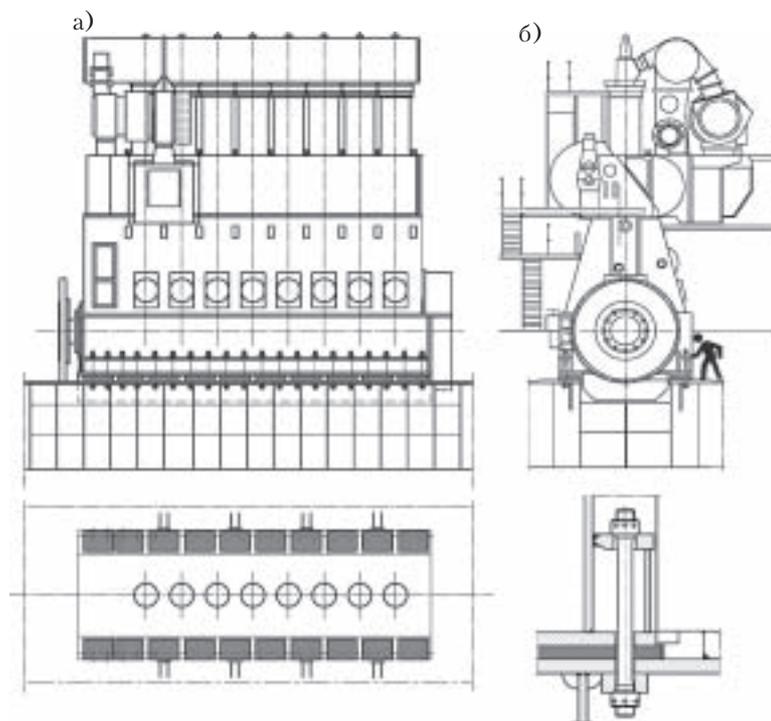


Рис.6. Двигатель «Sulzer 8RTA68T-B» главного привода судна установленный на подкладках из пластмассы EPY: а – общий вид; б – расположение фундаментных подкладок; в – сечение фундаментного болтового соединения

Полимерные пластмассы применяются также при монтаже передач главных приводов, генераторов, насосов, палубных лебедок и прочих вспомогательных устройств. Они оказались также очень полезными в монтаже больших подшипников валопроводов, рулевых втулок, рулевых штырей, нагруженными значительными поперечными и продольными силами.

Монтаж больших втулок (напри-

массой. Этот способ является очень точным и быстрым, а технология позволяет точно устанавливать втулки, без растачивания отверстий большого диаметра (около 1000 мм) в конструкции (ахтерштвени), механической обработки втулок и вдавливания их с помощью мощных сил (около 1000 кН). При этом внутренние поверхности отверстия, где должны быть монтированы втулки не требуют точной обработки.

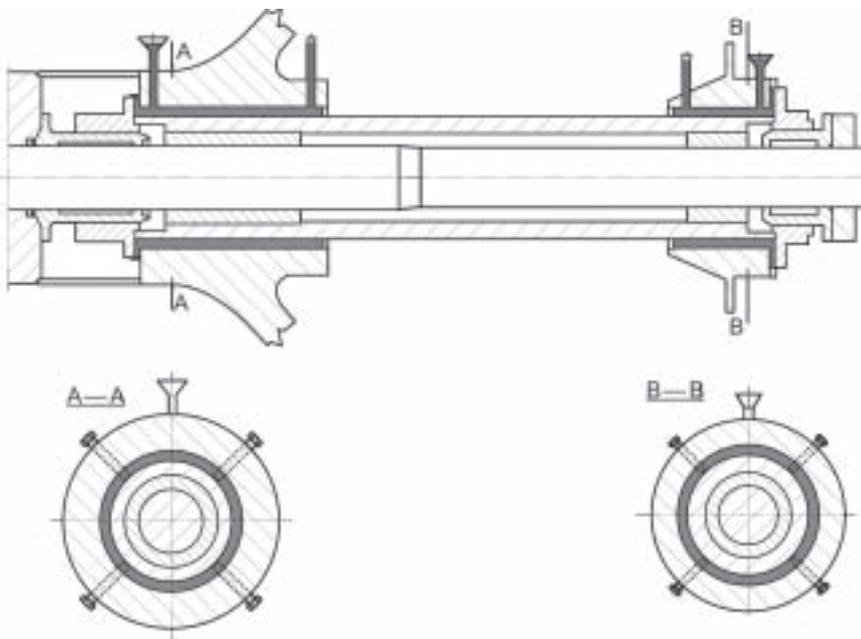


Рис. 7. Дейдвудная труба судна установленная с использованием пластмассы EPY

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Монтаж машин и устройств с использованием специальных полимерных материалов выдержал практический экзамен. В судостроении и судоремонте эта технология уже ста-

ла стандартом и дает измеримые технические, экономические и эксплуатационные выгоды.

Благодаря своим преимуществам полимерная пластмасса и новая технология монтажа машин применяются в настоящее время при монтаже

различных сухопутных машин и устройств: в машиностроительной, горной промышленности, энергетике, строительстве дорог и мостов и т. п.

Более подробную информацию о проектировании, а также технологии монтажа различных машин и устройств с применением полимерных материалов, в том числе и специфические свойства этих материалов, возможности их использования в инженерной практике, можно найти в монографии [1]. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Grudziński K., Jaroszewicz W. Posadawianie maszyn i urządzeń na podkładka fundamentowych odlewanych z tworzywa EPY. Wydawca: ZAPOL Spółka Jawna, Szczecin, 2002.
2. Smith W. Resin chocks. Paper No. 2, Session, London, Lloyd's Register Technical Association, 1984–1985.
3. Germanischer Lloyd: Richtlinien über die Zulassung und Werkstoffen (Reaktionsharze) zur Installierung und Fundamentierung von Bauteilen, Hamburg, 1992.
4. Buck K., F. Fundamentierung von Schiffsmaschinen mit Kunstharz. Marine- und Industrie-Montage GmbH, Hamburg, 1978. ■

MARINE SERVICE JAROSZEWICZ



**Официальный представитель
в России:**

ul. Bielańska 23, 70-703 Szczecin, Poland

tel: +48 91 4608624 msj@EPY.com.pl

fax: +48 91 4313075 www.EPY.com.pl




Сервис установки:

- > судовых двигателей и передач
- > машин и вспомогательных устройств
- > дейдвудных труб и втулок
- > станков, подшипников, конструкций...

Чockfast — Philadelphia Resins

Еpocast 

EPY 



Продаж смолы:



Технология обеспечивает:

- > точную и скорую установку машин
- > снижение уровня колебаний и шума
- > устойчивую и стойкую установку машин
- > снижение стоимости установки машин
- > элиминацию обработки подкладок и фундаментов

Новая ЭРА

**Новые системы распределения,
управления, регулирования
и преобразования энергии**



195248, Россия, Санкт-Петербург, ул. Партизанская, 21
Тел.: (812) 303 89 79. Факс: (812) 303 89 77
E-mail: neweradd@comset.net; <http://www.newelectro.ru>

Петербургская компания «Новая ЭРА» – первое и на сегодняшний день единственное российское предприятие, которое разрабатывает и изготавливает средневольтное электрооборудование (на 6–11 кВ) в морском исполнении и в соответствии с требованиями Российского Морского Регистра судоходства. Новое электротехническое оборудование предназначено для установки и эксплуатации на морской ледостойкой стационарной платформе (МЛСП) «Приразломная» в Баренцевом море. ОАО «Новая ЭРА» имеет богатый опыт поставок на ответственные объекты как в России, так и за рубежом. Однако по основным своим характеристикам это оборудование превосходит все то, создавалось на предприятии до сих пор.

МЛСП «Приразломная», которую начали строить в Северодвинске еще в 1995 г., предназначена для добычи нефти и газа на одном из богатейших месторождений Арктического шельфа – «Приразломное». Геологи оценивают здешние запасы нефти, как минимум, в 70 млн. т. Предполагается, что платформа сможет давать около 7 млн. т нефти в год. В финансовом эквиваленте это составляет 2–3 млрд. долл.

Аналогов строящейся в юго-восточном секторе Баренцева моря МЛСП «Приразломная» еще не было. Это первое в мире подобное сооружение. Платформа будет способна сама бурить скважины и добывать нефть и газ круглый год в экстремальных условиях Арктики, когда большую часть года море сковано льдами. Поэтому и работы по созданию МЛСП «Приразломная» являются уникальными, требующими от проектных организаций и предприятий – участников проекта – новых нестандартных инженерных решений.

Компания «Новая ЭРА» в 2004 г. выиграла тендер на изготовление и поставку средневольтной части системы энергоснабжения морской ледостойкой стационарной платформы «Приразломная». Средневольтное электрооборудование общепромышленного применения сегодня выпускают многие российские производители. Но ОАО «Новая ЭРА» стало первым в нашей стране предприятием, которое взялось за разработку и изготовление такого электрооборудования в морском исполнении, соблюдая при этом требования Российского Морского Регистра судоходства.

Помимо установки на платформе нового оборудования собственного производства, специалистам предприятия было поручено провести дефектацию, а затем реконструкцию и модернизацию уже имеющегося электрооборудования, отслужившего двадцать пять лет и фактически вырабатывавшего свой ресурс. В настоящее

ПЕРВОЕ В РОССИИ СРЕДНЕВОЛЬТНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ В МОРСКОМ ИСПОЛНЕНИИ ДЛЯ БУРОВОЙ ПЛАТФОРМЫ «ПРИРАЗЛОМНАЯ»

Г.К. Селиваненко, начальник конструкторского отдела КРУ 6–10 кВ,
М.А. Калашиников, начальник отдела испытаний,
В.Г. Балабин, начальник электротехнической лаборатории,
С.Г. Шамарин, руководитель проекта МЛСП «Приразломная»,
ОАО «Новая ЭРА»

время оно находится на платформе «Huttone», верхняя часть которой используется для строительства морской ледостойкой стационарной платформы «Приразломная».

«МЛСП «Приразломная» – не первый подобный проект для «Новой Эры», – говорит генеральный директор Александр Федотов. – Ранее наша компания поставляла электрооборудование и выполняла комплекс электромонтажных работ на буровой платформе Д-6 (заказчик – ООО «Лукойл – Калининградморнефть»), где сейчас уже ведется промышленная добыча нефти. Однако принципиальное отличие контракта по «Приразломной» в том, что это первая и для «Новой Эры», и для отрасли в целом разработка и поставка комплектов распределительных устройств (6 кВ и 11 кВ) для эксплуатации в морских условиях, за полярным кругом, на значительном удалении от берега.»

Согласно условиям договора, заключенного с ФГУП ПО «Севмаш», специалисты ОАО «Новая ЭРА» должны были разработать новое средневольтное оборудование в предельно сжатые сроки. В итоге разработку удалось осуществить за три месяца (с момента получения технического задания до начала изготовления опытных образцов продукции). Этого времени конструкторским подразделениям предприятия хватило для того, чтобы создать новые конструктивы комплексных распределительных устройств (КРУ), отвечающих условиям эксплуатации на буровой платформе. Весной 2005 г. на ОАО «Новая ЭРА» были

выпущены четыре типа КРУ для МЛСП «Приразломная»: К-308 МР НЭ, К-309 МР НЭ, К-310 МР НЭ и К-311 МР НЭ. Все КРУ двустороннего обслуживания. А К-311 МР НЭ – двухъярусное КРУ, практически тех же размеров, что и одноярусное, но вмещающее в себя две схемы главных цепей. Разработка комплектного распределительного устройства К-311 МР НЭ велась с целью уменьшения габаритов, поскольку платформа имеет ограничения по площади.

Все КРУ, как и другое оборудование для буровой платформы, имеют высокое качество исполнения. Характерно, что при производстве данного оборудования использовались исключительно импортные комплектующие (силовые выключатели АВВ, силовые трансформаторы АВВ, микропроцес-



сорные блоки защиты («Siprotec Siemens» и др.), поскольку отечественный рынок на сегодняшний день еще не может предложить комплектацию, необходимую для изготовления распределительных устройств такого класса. Кроме того, требовалось, чтобы все применяемые комплектующие изделия имели сертификаты Российского Морского Регистра судоходства.

Средневольтное оборудование, изготовленное для «Приразломной», рассчитано на работу при большой влажности. По климатике распределительные устройства соответствуют условиям МЗ. Оборудование обладает степенью защиты – IP 33 и стойкостью к токам КЗ. Ток термической стойкости К-308 и К-309 – 50 кА. По оценкам разработчиков ОАО «Новая ЭРА», последнее требование пока еще трудновыполнимо для многих российских производителей. Например, отечественные выключатели, рассчитанные на такой ток, до сих пор не выпускаются. Для сравнения: даже распределительные устройства, которые предназначались для установки на атомную электростанцию «Бушер» в Иране, были рассчитаны на ток отключения – 40 кА. До начала работы по проекту МЛСП «Приразломная» это был максимальный ток, с кото-

рым приходилось иметь дело специалистам «Новой Эры». Нечасто при изготовлении распределительных устройств отечественными производителями применяются и микропроцессорные блоки защиты «Siprotec Siemens», которые недешевы, но зато наиболее современны и обладают рядом функций, которых не имеет микропроцессорная техника других фирм.

Всего в настоящее время ОАО «Новая ЭРА» изготовлено около ста комплектных распределительных устройств для нужд МЛСП «Приразломная». Собран и прошел сертификационные высоковольтные испытания Российского Морского Регистра судоходства главный распределительный щит на 11 кВ, состоящий из 44 КРУ. Испытан и сертифицирован Морским Регистром распределительный щит на 6 кВ, скомплектованный из более чем двадцати КРУ, а также многое другое оборудование: основные распределительные щиты на 415 В, щиты питания оборудования, щиты освещения, щиты аварийного и эвакуационного освещения и др. Продукция испытыва-



лась на ОАО «Новая ЭРА», сертифицировалась на площадке Всероссийского Научно-исследовательского института высоковольтной аппаратуры. В результате все оборудование, разработанное предприятием «Новая ЭРА» для МЛСП «Приразломная», выдержало сертификационные испытания и получило одобрение Российского Морского Регистра судоходства.

Таким образом, на сегодняшний день компания «Новая ЭРА» предлагает большой выбор комплектных распределительных устройств 6-10 кВ: общепромышленного применения и для атомной промышленности, сейсмостойкого и морского исполнения. В общей сложности предприятием разработано свыше десяти видов КРУ и множество типовых и нетиповых конструктивов схем главных цепей. ■

На «Зеленодольском судостроительном заводе» сейчас завершается строительство катера пр. А-45, для которого петербургское предприятие ОАО «Новая ЭРА» изготовило и поставило двигатели безредукторные управляемые (ДБУ-100). В течение нынешней навигации (с мая по ноябрь 2005 г.) на заводе проводятся различные испытания систем строящегося судна, в том числе на новом катере в настоящее время испытывается ДБУ-100 и система управления интерцепторами.

В октябре прошлого года ОАО «Новая ЭРА» уже участвовала в приемо-сдаточных испытаниях катера пр. А-125, на который впервые поставлялась новая разработка нашего предприятия – ДБУ-100. Катер специального назначения «Валентин Чуйкин», построенный на «Морском заводе «Алмаз», был создан для проведения антитеррористических операций в акваториях и на побережье Балтийского моря и передан в распоряжение Управления ФСБ России по Северо-Западу.

Отличие от него, строящийся катер пр. А-45 предназначен для перевозок пассажиров. Он должен стать вторым в России скоростным пассажирским катером, по своим характеристикам лишь немного уступающим «Метеору» (тоже, кстати, в свое время построенному на «Зеленодольском су-

достроительном заводе»). Предполагается, что данное судно сможет развивать скорость до 75 км/ч (максимальная скорость «Метеора» – 80 км/ч), при этом водоизмещение его в полтора раза больше, чем у предшественника. Среди других достоинств нового катера: высокая маневренность, повышенная прочность корпуса, высокий уровень обеспечения непотопляемости, возможность движения в условиях мелководья и большой волны, а также повышенная внутренняя комфортность.

По оценке главного строителя «Зеленодольского судостроительного завода» Валерия Погорелова, на сегодняшний день катер пр. А-45 готов на 90%. Уже проведены монтажные работы и автономные испытания некоторых машин и механизмов. Одновременно с совместной отработкой

функционирования бортовой вычислительной машины с изделиями ДБУ-100, катер подвергают швартовым и ходовым испытаниям.

Первые совместные испытания катера судостроители со специалистами ОАО «Новая ЭРА» начали в июне. Для осуществления их с петербургского предприятия на судостроительный завод в Зеленодольск была отправлена специальная аппаратура. В проверке функционирования двигателя безредукторного управляемого и системы управления интерцепторами участвуют разработчики ДБУ-100 – сотрудники «Новой Эры»: ведущий инженер отдела НИОКР Геннадий Леонидов и инженер-программист отдела НИОКР Степан Котов. Испытания закончатся в августе – сентябре. Передать катер в эксплуатацию планируется в 2006 г. ■

ПРОВЕРКА НА НАДЕЖНОСТЬ

Ю.А. Кулагин, начальник отдела научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок,

А.В. Белозеров, начальник сектора электропривода отдела научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок, ОАО «Новая ЭРА»

В рамках Второго Международного Военно-морского салона IMDS-2005, прошедшего в Санкт-Петербурге в июле, состоялась презентация катера специального назначения пр. А-125. Как раз на этот катер ОАО «Новая ЭРА» по заказу «Морского завода «Алмаз» впервые осуществила поставку своей новой уникальной разработки – ДБУ-100 (двигатель безредукторный управляемый). В настоящее время судно передано в распоряжение Управления ФСБ по Петербургу и Ленинградской области и успешно им эксплуатируется.

Катер проекта А-125 был сдан Госкомиссии в конце прошлого года. Однако во время приемки судна заказчики ДБУ-100 (представители «Морского завода «Алмаз») предложили специалистам предприятия «Новая ЭРА» провести еще ряд исследований дополнительных возможностей и запасов ДБУ-100. Судостроители высказали пожелание увеличить частотный диапазон нагрузок при работе движущегося катера в десять и более раз (гораздо больше, чем изначально требовало техническое задание). По мнению специалистов ОАО «Морской завод «Алмаз», такие усовершенствования позволили улучшить гидродинамические свойства и мореходные качества судна.

Представляли новый катер специального назначения и демонстрировали всего его достоинства сразу несколько организаций – заказчики, проектанты, исполнители: ОАО «Морской завод «Алмаз», ООО «Агат Дизайн Бюро», ЗАО «Навис» и ОАО «Новая ЭРА».

КАТЕР КАК РЕЗУЛЬТАТ ДЕЛОВОГО СОТРУДНИЧЕСТВА

В ходе презентации катер совершал в зоне его видимости с берега различные показательные маневры. Судно осуществляло циркуляции на переднем и заднем ходу, движение лагом, набор скорости с выходом из гавани в устье реки Нева, проход на полном ходу мимо входа в гавань, вход в гавань, экстренное торможение на траверзе причала, подход к причалу, швартовку и другие операции.

Об уникальных качествах и неординарных возможностях катера проекта А-125 рассказывали генеральный директор ОАО «Морской завод «Алмаз» Владимир Середохо, главный конструктор ООО «Агат Дизайн Бюро» Сергей Породников, началь-

ник отдела НИОКР ОАО «Новая ЭРА» Юрий Кулагин. По их словам, в катере, презентуемом на Военно-морском салоне, были реализованы технические решения, применяемые сегодня в аэрокосмической отрасли – это безредукторные двигатели с микропроцессорным управлением. С помощью ДБУ, управляемых бортовым вычислительным комплексом фирмы «Навис», катеру А-125 удалось обеспечить повышенные скоростные качества за счет стабильности направления вектора тяги при снижении тормозящего влияния качки судна системой умерения качки. Совокупность качественных характеристик обеспечивает синхронным машинам с постоянными магнитами большое будущее.

Немаловажный момент отметил в своей речи Юрий Кулагин: «Представляемый катер А-125 – это успешная реализация делового сотрудничества предприятий, сложившегося в процессе совместной работы. И, может быть, это даже главный результат, с которым стоит всех поздравить». ■



Внешний вид ДБУ-100



Катер «Валентин Чуйкин» (пр. А125)



СУДОПЛАСТ СЕРВИС
SUDOPLAST SERVICE

Впервые фирма «Судопластсервис» заявила о себе в 1991 г., представив на рынке России судовые подшипники своей конструкции для винто-рулевого комплекса (ВРК) речных и морских судов.

Умелое сочетание организационного, производственного и научного потенциалов позволило фирме в короткий срок расширить рынок сбыта и ассортимент выпускаемой продукции.

ООО «Судопластсервис» является лауреатом ряда промышленных выставок России («Российский промышленник», «Нева», «Военно-Морской Салон» и др.), обладает большим опытом в области применения полимерных антифрикционных материалов в узлах трения. Судовые подшипники фирмы «Судопластсервис» защищены патентами России, Финляндии, Франции и Германии, одобрены к применению Российским Морским Регистром судоходства, Российским Речным Регистром, а также «Lloyd's Register» и «Germanischer Lloyd».

В качестве антифрикционного материала в подшипниках используется полиамид 6-блочный (капролон), ТУ 6-05-988-87, производство которого освоено фирмой «Судопластсервис» в 1993 г.

Конструктивные особенности дейдвудных подшипников (абразивоотводящие внутренние и наружные канавки, увеличенный объем рабочей зоны) обеспечивают их надежную работу на всех режимах эксплуатации судов, в т.ч. при работе на мелководье, где присутствует повышенное содержание абразива в охлаждающей воде, и на аварийных режимах при временном (до 10 мин) прекращении подачи охлаждающей воды. Подшипники выпускаются по ТУ 6446-486.01-93 «Подшипники скольжения капролоновые с наклонными спиралевидными канавками для гребных валов». Безремонтный период эксплуатации подшипников для судов, плавающих в морских и других глубоководных районах, – не менее 8 лет, во внутренних водоемах – не менее 5 лет.

В качестве альтернативы бронзовым подшипникам баллеров рулей и насадок фирмой была разработана принципиально новая конструкция (ТУ 6411-422.01-95 «Подшипники скольжения баллеров рулей с капролоновыми вкладышами»), позволяющая значительно снизить удельные нагрузки на баллер за счет увеличения площади контакта в зоне трения. Наличие компенсато-

ПОДШИПНИКИ ДЛЯ ВИНТО-РУЛЕВОГО КОМПЛЕКСА МОРСКИХ И РЕЧНЫХ СУДОВ

ров значительно уменьшило вибрационные и ударные нагрузки, возникающие на пере руля или насадке и передающиеся на корпус судна. Применение воды в качестве смазки сделало подшипники экологически чистыми при эксплуатации. Безремонтный период эксплуатации – не менее 10 лет.

Подшипники ВРК поставляются в стальных или латунных втулках с припуском по наружному и внутреннему диаметрам.

Стоимость подшипников фирмы «Судопластсервис» в несколько раз ниже стоимости аналогичных подшипников зарубежных производителей при идентичных технических характеристиках.

Для судов, работающих в загрязненных бассейнах с большим содержанием абразивных частиц, фирма разработала и внедрила дейдвудные подшипники принципиально новой конструкции. Это роликовые подшипники качения с резиновыми роликами и облегченным пластиковым сепаратором. Ролики подшипника изготовлены из специально разработанного материала, отличающегося высокой износо-, масло- и бензостойкостью. Материал и конструкция роликов позволили значительно увеличить нагрузочную способность и износостойкость подшипника. Применение данного типа подшипников позволяет экономить до 2% топлива за счет уменьшения потерь на трения при пуске и эксплуатации.

Опыт эксплуатации подшипников фирмы «Судопластсервис», установленных более чем на 150 речных и морских судах, ледоколах и буксирах показал их надежную работу.

Фирма также производит подшипники из различных конструкционных пластмасс для насосов и других вспомогательных механизмов. ■

194044, Россия, Санкт-Петербург, ул. Гельсингфорсская, д.4, корп. 1;
тел.(812) 380-07-47, 380-0746; тел./факс (812) 380-07-46;
email: sale@sudoplast/spb/ru;
http: //www.sudoplast.spb.ru

В прошлом году отечественное дизелестроение отметило знаменательную дату – 105-летие проведения испытаний первого отечественного дизеля в декабре 1899 г. на заводе Нобеля в Петербурге.

Постройке и испытанию отечественного дизеля предшествовали следующие исторические факты. В 1892 г. Рудольф Дизель запатентовал, а в 1893 г. опубликовал «Теорию и конструкции рационального топливного двигателя». Идея двигателя состояла в том, что воздух в цилиндре сжимался до 200 бар и во время верхней мертвой точки в камеру сгорания впрыскивался порошкообразный уголь, после чего он должен воспламениться и гореть по изотерме. Таким образом, цикл горения должен был осуществляться по циклу Карно. Испытания такого дизеля в 1893 г. оказались неудачными: его не удалось даже запустить. Это был двигатель без охлаждения, с камерой в поршне, с одним клапаном для впуска и выпуска и открытой форсункой. В следующем году изобретатель проводит испытания следующего двигателя, в котором уже предусмотрено воздушное охлаждение, вместо угольной пыли используется светильный газ и бензин, новые в то время виды топлива. Эти усовершенствования позволили осуществить пуск двигателя и его работу в течение минуты.

В 1895 г. Р. Дизель ставит следующую серию экспериментов. По сравнению с предыдущим в новом двигателе внесен ряд изменений:

- введено охлаждение цилиндра и крышки;
- в качестве топлива принят керосин;
- степень сжатия снижена до 13, что обеспечивало в конце сжатия давление 32–36 бар;
- керосин распылялся сжатым воздухом при давлении 38–60 бар;
- процесс сгорания протекал при постоянном давлении по изобаре.

Этот двигатель уже работал на холостом режиме; имел расход керосина 520 г/кВт·ч, механический КПД 54%. В 1896 г. проводится еще одна серия экспериментов, после которых удаётся создать промышленный дизель мощностью 56 кВт.

В феврале 1896 г. Эммануэль Нобель (сын Людвига Нобеля) после длительных переговоров покупает лицензию и комплект чертежей двигателя Дизеля мощностью 15 кВт, работающего на керосине. В течение года сотрудники завода переконструируют этот двигатель и в декабре 1899 г. проводят его испытания. Они оказались успешными, но дали несколько неожиданные результаты: русский дизель оказался не только достойным своего заграничного собрата, но даже превзо-

ТАК НАЧИНАЛОСЬ ОТЕЧЕСТВЕННОЕ СУДОВОЕ ДИЗЕЛЕСТРОЕНИЕ

В.К. Румб, проф., СПбГМТУ

шел его по экономичности – расход топлива составил 300 г/кВт·ч вместо 330 г/кВт·ч, причем топливом ему служила сырая нефть [1].

Первый русский дизель (рис. 1) был вертикальный, колонного типа, т.е. с открытым кривошипно-шатунным механизмом, крейцкопфный, компрессорный со вставной втулкой цилиндра, четырехтактный, размерностью 26/41, мощностью 16 кВт при 180 мин⁻¹. Позже была достигнута мощность 18 кВт.

Дальнейшие опыты с новыми дизельными моторами показали их неоспоримые преимущества, и приоритет по их внедрению на гражданские и военные суда стал принадлежать нашей стране.

Первый в мире теплоход – трехвинтовая нефтеналивная баржа «Вандал» (рис.2) был построен в 1903 г. Сормовским заводом. Инициатором строительства был К.П. Боклевский, а заказчиком – товарищество «Братья Нобель». Размеры теплохода: длина – 74,6 м, ширина – 9,7 м, высота борта – 2,4 м, осадка с грузом – 1,8 м, водоизмещение – 800 т. Дизельная установка «Вандала» включала в себя три двигателя 3Ч 29/43, мощность каждого 90 кВт при 240 мин⁻¹. Поскольку двигатели были неререверсивными, на судне применили электрическую передачу.

Удачная эксплуатация «Вандала» по доставке керосина в Петербург предопределила строительство еще одного теплохода «Сармат» (1904 г.). Его установка состояла из двух главных двигателей 4Ч 32/42, мощностью по 140 кВт при 240 мин⁻¹ и одного вспомогательного двигателя мощностью 8 кВт для внутреннего электроснабжения. Это были первые двигатели, которые имели систему управления для изменения частоты вращения от 72 до 240 мин⁻¹. Реверсирование осуществлялось по схеме Дель-Пропосто: переносимый ход – работа дизелей непосредственно на гребные валы, задний – электромоторами. На «Сармате» достигли фантастической по тем временам экономии топлива: суточный расход нефти не превышал 1150 кг вместо 6500 кг у аналогичного парохода. Интересно отметить, что «Сармат» эксплуатировался на Волге до 1945 г. [2].

Дизелезация военного кораблестроения началась в 1908 г., когда была построена подводная лодка «Минога» с двумя двигателями 3ЧР 27,5/30 мощностью 88 кВт при 400 мин⁻¹. Это были первые в мире реверсивные двигатели (рис.3). Ревверс на этой подводной лодке осуществлялся за 10–12 с, для чего на распределительном валу был установлен двойной комплект кулачных шайб. Удельная масса этих

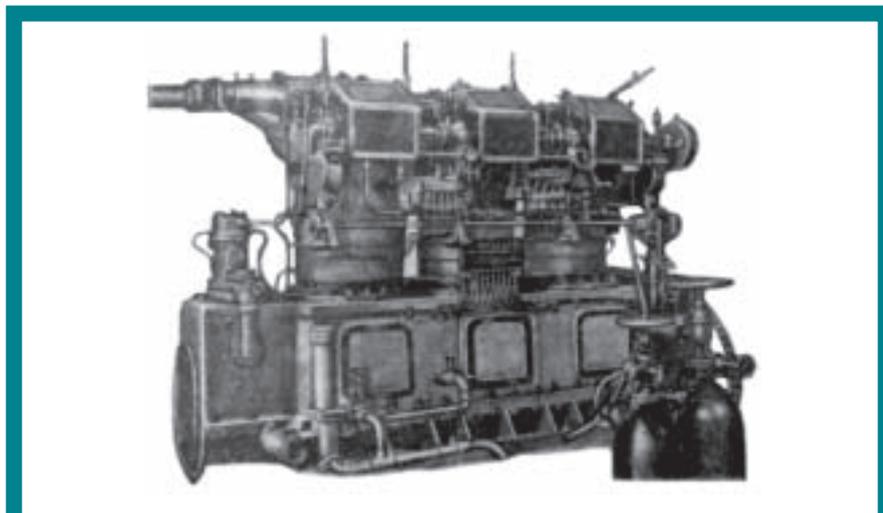


Рис. 1. Первый дизель-мотор, работавший на сырой нефти

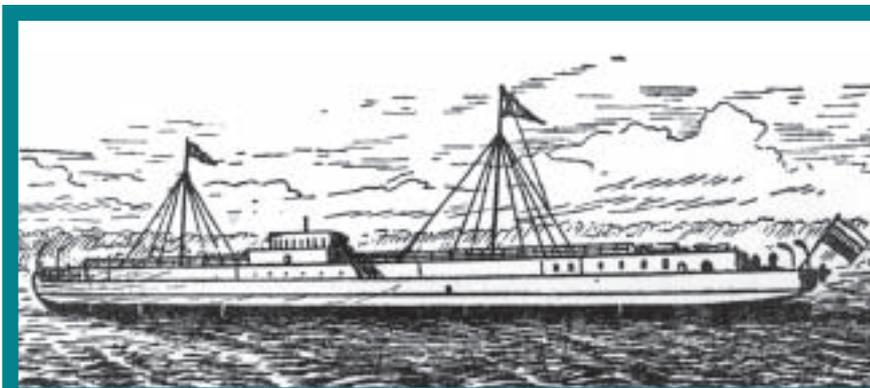


Рис. 2. Первый в мире теплоход «Вандал»

двигателей не превышала 20 кг/кВт. Основные размеры лодки: длина – 35,7 м, ширина – 2,7 м, водоизмещение – 117 т. С 1909 г. на заводе Нобеля начинается серийный выпуск судовых дизелей 4Ч 33/38 мощностью 184 кВт при 350 мин⁻¹ (рис.4). Первые четыре двигателя этой серии были установлены на канонерской лодке для Амурской флотилии «Шквал» водоизмещением 946 т, длиной 70,7 м, шириной 12,8 м и осадкой 1,2 м. Реверсирование обеспечивалось упомянутой передачей Дель-Пропосто.

Примерно в те же годы началось освоение судовых дизелей на Коломенском заводе. Первый дизель этого завода 4Ч 35/53 мощностью 20 кВт при 240 мин⁻¹ был установлен на речном буксире «Мысль» в 1908 г. Его длина – 49 м, ширина – 7,6 м, осадка – 0,61 м. Реверсирование судна осуществлялось посредством упругоневматической муфты, предложенной инженером Р.А. Корейво. В 1912 г. завод спустил на воду двухвинтовой теплоход «Бородино». Его энергетическая установка состояла из двух главных реверсивных двигателей 6Ч 41/56 мощностью 440 кВт при 250 мин⁻¹ и двух дизель-генераторов по 22 кВт для внутреннего электроснабжения.

Рассматриваемый исторический период характеризуется интенсивным внедрением дизелей на судах. По числу теплоходов Россия к 1912 г. занимала ведущее положение в мире, ею было построено 79 теплоходов, на которых установлено 176 дизелей суммарной мощностью 30,5 тыс.кВт. К 1917 г. двумя упомянутыми заводами было выпущено 1090 дизелей общей мощностью 122 тыс.кВт, из них 63% приходилось на долю завода Нобеля.

Последующие годы в ходе войны и революции не остались бесследными для кораблестроения и двигателестроения. Они, как и вся отечественная промышленность, пришли к полному упадку. Морской флот не обеспечивал нужды страны, так как большинство судов погибло, а оставшиеся морально

и физически устарели. Поэтому восстановительный период характеризуется интенсивным развитием судостроения. За годы первой пятилетки (1928–1932 гг.) было построено 216 судов и кораблей общей мощностью 142 000 кВт, на долю дизелей приходилось 89 000 кВт. Благодаря своим очевидным преимуществам дизели стали вытеснять паровые машины, а на наземном транспорте ДВС оказались вне конкуренции. За первую пятилетку было произведено моторов суммарной мощностью 339 000 кВт, т.е. в 1,5 раза больше их выпуска в России за всю историю до 1917 г.

К началу восстановительного периода судовые дизели могли поставлять только два завода: «Русский дизель» (в прошлом завод Нобеля) и Коломенский машиностроительный завод. Два других завода – «Двигатель революции» и «Красное Сормово» – ограничивались выпуском лишь запасных частей.

Возобновление работы «Русского дизеля», специалисты которого имели значительный опыт производства судовых дизелей, началось в 1923 г. [3]. Одним из первых был дизель 6ДКР 41/60 мощностью 550 кВт при 180 мин⁻¹. В нем была предусмотрена картерная конструкция с анкерными связями. Для повышения надежности была введена циркуляционная смазка подшипников коленчатого вала. Среднее эффективное давление – 4,8 бар, удельная масса составляла – 100 кг/кВт. В составе двухмашинных установок эти двигатели были установлены на танкерах «Азнефть» и «Грознефть» водоизмещением около 5000 т. При этом строители Балтийский завод и Северная верфь воспользовались корпусами недостроенных и заложенных еще в 1915 г. крейсеров «Адмирал Грейг» и «Адмирал Спиридов» [4].

В 1925 г. завод получил заказ на срочное изготовление 12 дизелей мощностью около 1500 кВт. Ввиду срочности заказа было принято решение воспользоваться чертежами двигателя, который был разработан на заводе еще

в 1915 г. Это были крейцкопфные компрессорные реверсивные двухтактные двигатели размерностью 65/86, шестцилиндровые. Они сохраняли традиционную для того времени компоновку колонного типа с открытым кривошипно-шатунным механизмом. Рамовые и шатунные подшипники были доступны для механика, он мог, не останавливая двигатель, рукой определять их температуру. Хотя эти двигатели разрабатывались относительно давно, по своим параметрам они не уступали современным моторам. Их среднее эффективное давление составляло 5 бар, средняя скорость поршня – 3,3 м/с; расход топлива – 255 г/кВтч, удельная масса – 190 кг/кВт. Первый двигатель этой серии был установлен на грузопассажирском рефрижераторе «Ян Рудзутак» водоизмещением 5600 т, построенном Северной верфью. Его скорость достигла 12 уз. Аналогичный теплоход «Алексей Рыков» сооружался на Балтийском заводе. Постройка обоих судов была завершена в 1928 г. Теплоход «Смолярный», отнотипный рассмотренным, впервые пришвартовался в лондонском порту в 1928 г. Этому событию журнал «Моторшип» посвятил обширную статью, в которой особо были отмечены на отдельные каюты для членов команды, столовая, красный уголок, прачечная и сушилка, чего на иностранных судах тогда еще не было. Главные двигатели на этих судах эксплуатировались более 45 лет.

Для комплектации судовых установок требовались вспомогательные двигатели мощностью 73–110 кВт при

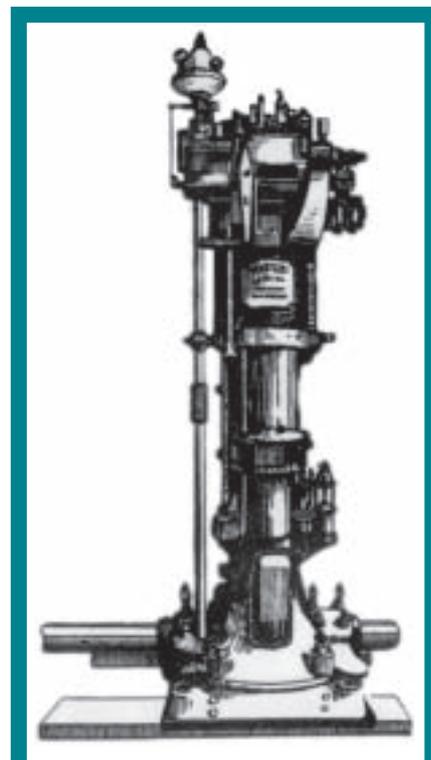


Рис. 3. Первый в мире четырехтактный реверсивный двигатель

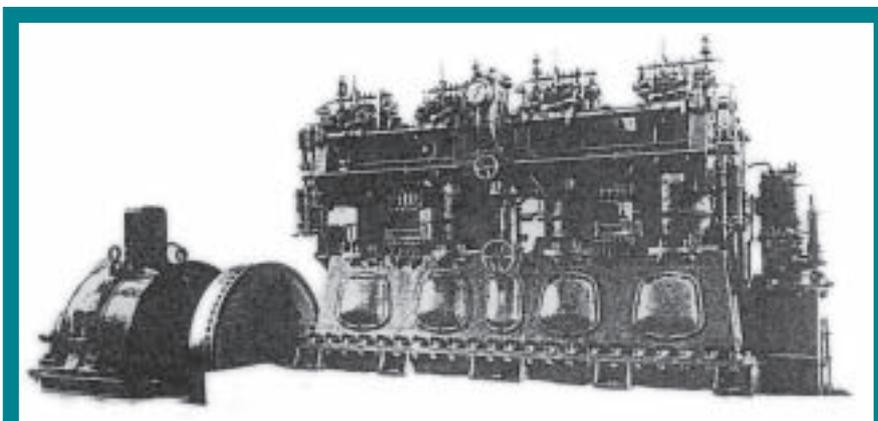


Рис.4. Дизель 1433/38 для Амурской флотилии

300 мин⁻¹. Были разработаны двигатели Д 27,5/35 с поршневым продувочным насосом. Топливные и масляные насосы приводились непосредственно от коленчатого вала, форсунка – закрытого типа. Так были созданы первые бескомпрессорные дизели с насосом высокого давления. Головной дизель испытывался 21 февраля 1925 г. Было установлено, что за счет организации механического распыливания топлива мощность двигателя возросла на 15, расход топлива снизился на 10, а масса – на 20 % [5, 6].

Несмотря на достигнутые успехи полностью удовлетворить запросы морского флота в дизелях заводам не удавалось из-за технической отсталости. Для ликвидации этой проблемы был заключен с фирмой «Зульцер» лицензионный договор на десятилетний срок. В соответствии с этим договором «Русский дизель», Харьковский и Николаевский заводы начали получать техническую документацию, позволяющую производить четыре типа судовых дизелей: «S-68», «RK-30», «TS-29» и «QLK-51».

Их основные технические показатели приведены в таблице.

В 1930–1931 гг. двигатели 4S-68 первыми среди лицензионных поступили на суда, строившиеся Северной верфью. Это были одноярусные грузопассажирские теплоходы «Макс Гельц» и «Бела Кун» водоизмещением 8150 т., предназначенные для Черноморско-Балтийской линии. Ими же оборудовались большие лесовозы типа «Волголес» и «Двинолес», построенные в 1932–1935 гг. Адмиралтейским заводом. Самые большие двигатели 6S-68 мощностью 2000 кВт устанавливались Северной верфью в течение 1938 и 1939 гг. на одноярусных рудовозах типа «Алексей Серов» и «Полина Осипенко», а также на двухвальных универсальных сухогрузах «Труд» и «Пролетарий», строящихся в Николаеве. Практически на всех перечисленных судах устанавливались в качестве вспомогательных дизели типа «RK-30». Эти весьма металлоемкие двигатели с предкамерным смесеобразованием позволяли использовать низкосортное топливо,

были технологичны и просты в обслуживании. С 1938 г. на судостроительные заводы вместо «RK-30» стали поступать бескомпрессорные двигатели «TS-29» вместо «RK-30». Выпуск крейцкопфных дизелей «QLK-51» был весьма мал.

Все двухтактные двигатели того времени, кроме дизеля «QLK-51», оборудовались поршневыми продувочными насосами. Они обладали рядом недостатков: большие габариты, неуравновешенность и неравномерность подачи воздуха. Ротативные воздухоподводки были лишены этих недостатков, поэтому на «Русском дизеле» было освоено их производство, и начиная с 1936 г. ими оборудовались все двухтактные судовые двигатели [7].

Для разрабатываемых в те годы больших подводных лодок требовались компактные и мощные двигатели. Так как лицензионные двигатели не отвечали этим требованиям, заводу «Русский дизель» было поручено ответственное задание – создать дизель нового типа. В обещанный годичный срок двигатель 9ДКР 51/55 мощностью 3100 кВт при 400 мин⁻¹ был предъявлен заказчику в 1938 г. Это был первый в мире высокофорсированный, среднеоборотный бескомпрессорный дизель со средним эффективным давлением 4,7 бара, средней скоростью поршня 7,3 м/с и рекордной по тому времени удельной массой 20 кг/кВт.

Подводные лодки с этими дизелями принимали активное участие в Великой Отечественной войне в составе Северного флота. На базе этого двигателя в 1939 г. была разработана конструкция судового реверсивного двигателя 8ДР 43/61, в серийное производство он поступил только после Великой Отечественной войны. ■

Основные показатели лицензионных судовых дизелей

Дизель	Марка	Цилиндровая мощность, кВт	Частота вращения, мин ⁻¹	Среднее эффективное давление, МПа	Удельный расход топлива, г/кВт·ч	Удельная масса, кг/кВт
«S-68»	ДКРВ 68/120	330	100	0,47	252	163
«RK-30»	ДКВ 30/40	37	300	0,26	286	82
«TS-29»	ДР 29/50	74	300	0,45	245	55
«QLK-51»	ДКВ 51/55	368	420	0,5	252	25

ЛИТЕРАТУРА

1. Ваншейдт В.А. К истории развития двигателей дизеля на заводе «Русский дизель» // Дизелестроение. – 1937. – № 6. – С. 5–10.
2. Яковлев И.И. Корабли и верфи. – Л.: Судостроение, 1970. – С. 384.
3. Ваншейдт В.А. Дизелестроение на заводе «Русский дизель» после Октября // Дизелестроение. – 1937. – № 11. – С. 16–28.

4. Сытов Н.П., Фрид Е.Г. Развитие отечественного морского судостроения // Судостроение. – 1985. – № 8. – С. 12–15.
5. Гутниер К.Г., Кац А.М. Модернизация двигателя серии 2400 завода «Русский дизель» // Дизелестроение. – 1937. – № 3. – С. 28–34.
6. Истошин П.А., Румб В.К. Всеволод Александрович Ваншейдт // Двигателестроение. – 1990. – № 8. – С. 55–58.
7. Матвеев И.П. Испытание ротативной воздухоподводки завода «Русский дизель» // Дизелестроение. – 1937. – № 5. – С. 31–33. ■

УРАВНЕНИЕ ЭНЕРГИИ РАБОЧИХ КАНАЛОВ РАДИАЛЬНЫХ ТУРБОМАШИН В ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Г.М. Басалыгин, *д-р техн. наук, проф.*,
ГМА им. адмирала С.О. Макарова

При исследовании переходных режимов работы газотурбинных двигателей (ГТД) и систем газотурбинного наддува ДВС широко используется квазистатический подход при формировании математической модели динамики турбомашин (турбин и лопаточных компрессоров), входящих в состав ГТД либо систем наддува ДВС [1–7] и др. Квазистатические модели применяются по причине отсутствия разработанных динамических моделей тепловых турбомашин, в том числе радиального (и осерадиального) типа.

Применение квазистатической математической модели для описания динамических режимов радиальных турбомашин существенно увеличивает погрешность моделирования переходных процессов в системах наддува ДВС, а также в ГТД при наличии в составе последних радиальных турбомашин. Такая модель не позволяет выявить условия возникновения неустойчивых режимов работы радиальных лопаточных компрессоров и исследовать их влияние на рабочие процессы ГТД и систем наддува ДВС.

Первый шаг по разработке математической модели динамики радиальных турбомашин выполнен в работе [8]. Получены уравнения силового взаимодействия между рабочими лопатками и протекающим через каналы рабочего колеса газом. Уравнения учитывают как статическую, так и динамическую составляющие силового взаимодействия, оказывающие влияние на динамику вращательного движения роторов радиальных и осерадиальных турбомашин обоих типов: лопаточных центробежных компрессоров и центробежных (либо центробежных) турбин.

Полученные в работе [8] уравнения динамики рабочих колес турбомашин являются составной частью единой математической модели, описывающей переходные и динамические процессы радиальных турбомашин турбокомпрессоров (ТК), входящих в состав ГТД либо системы наддува ДВС. Единая математическая модель обязательно должна включать также динамические варианты уравнений энергии и количества движения, записанные для массы газа в рабочих и направляющих каналах радиальных и осерадиальных турбомашин (турбин и лопаточных компрессоров).

Невозможно разработать адекватную протекающим процессам замкнутую математическую модель динамики радиальных турбомашин без учета закона сохранения энергии в их рабочих каналах. В целях упрощения задачи можно ограничиться рассмотрением относительного движения потока, что избавляет от необходимости учитывать влияние работы кориолисовой силы инерции. Достаточно учесть зависимость полной энергии потока в каналах рабочего колеса от центробежной силы инерции. Влияние же кориолисовой силы инерции на техническую работу и энергию потока в каналах рабочего колеса учтено в уравнениях, полученных в работе [8] при рассмотрении абсолютного движения потока.

Поставленная в данной работе задача реализуется, как и ранее [8], в рамках теории одномерного течения газа через каналы турбомашин с использованием динамической модели в сосредоточенных параметрах рабочего тела, что существенно упрощает численное решение математической модели. Под радиальными понимаются не только чисто радиальные, но также осерадиальные и радиально-осевые турбомашин, т.е. имеющие осевой вход газа на рабочее колесо (центробежные компрессоры) либо осевой выход из рабочего колеса (центробежные турбины).

При выводе динамического варианта уравнения энергии процессы, протекающие в обоих типах радиальных турбомашин, а именно в центробежных (ц.б) компрессорах и в центростремительных (ц.с), а также и в центробежных турбинах, рассматриваются с единых позиций. Вывод выполнен применительно к рабочему колесу центробежного компрессора, схематично представленного на рис. 1,а.

Динамическое уравнение энергии для элементарной массы газа dm , заполняющей элементарный кольцевой конечный объем dV в произвольном меридиональном сечении x_m каналов рабочего колеса радиальной (осерадиальной) турбомашин (рис.1), можно представить, рассматривая относительное движение потока газа, в виде дифференциального уравнения:

$$\frac{d}{dt} dI_w^* = \frac{d}{dt} dQ_M + \frac{d}{dt} dQ_F + \frac{d}{dt} dL_{u.c.}, \quad (1)$$

где dI_w^* – полная энтальпия массы газа dm в относительном движении, Дж, равная

$$dI_w^* = i_w^* dm = \left(i + \frac{W^2}{2}\right) dm; \quad (2)$$

dQ_M, dQ_F – элементарные значения энергии, вносимой в массу газа dm протекающим через канал (dQ_M) и в результате теплообмена с металлом рабочего канала (dQ_F), Дж; $dL_{u.c.}$ – элементарная работа центробежной силы dF_u , действующей на элементарную массу dm , Дж, равная

$$dL_{u.c.} = dF_u dr = dm \omega^2 r dr, \quad (3)$$

i, i_w^* – удельные значения энтальпии газа статической (i) и полной в относительном движении (i_w^*), Дж/кг; $W, W^2/2$ – относительная скорость, м/с, и удельная кинетическая энергия, $m^2/c^2 = \text{Дж}/\text{кг}$; ω – угловая скорость рабочего колеса, рад/с; r, dr – средний радиус меридионального поперечного сечения x_m каналов рабочего колеса (см. рис.1) и его элементарное приращение, м.

Элементарная масса газа dm , входящая в зависимости (2), (3) и уравнение (1), определяется по формуле

$$dm = \rho dV = \rho S_m dx_m, \quad (4)$$

в которой ρ – удельная плотность газа, $\text{кг}/\text{м}^3$; S_m – площадь произвольного поперечного меридионального сечения рабочих каналов, равная

$$S_m = 2\pi r k_2 b_m, \quad (5)$$

где b_m – ширина меридионального сечения рабочих каналов, м; k_z – коэффициент, учитывающий загромождение лопатками меридионального сечения рабочего колеса.

Уравнение сплошности потока, записанное для меридионального сечения S_m , имеет вид

$$G = \rho S_m W_m = \rho S_m C_m \quad (6)$$

где G – расход газа через сечение, кг/с; W_m, C_m меридиональные составляющие относительной W и абсолютной C скоростей потока, м/с, осредненные в сечении S_m .

Член в левой части уравнения (1) можно с учетом зависимости (2) представить в виде *полной производной*, равной

$$\frac{d}{dt} dI_W^* = \frac{d}{dt} (i_W^* dm) = \frac{\partial}{\partial t} (i_W^* dm) + \frac{\partial (i_W^* dm)}{\partial x_m} \frac{dx_m}{dt}. \quad (7)$$

Учитывая значение частной производной по времени от пространственной координаты $dx_m/dt = W_m = C_m$, второй член в правой части равенства (7) можно представить, принимая во внимание уравнения (6) и (4), в виде

$$\begin{aligned} W_m \frac{\partial}{\partial x_m} (i_W^* dm) &= \frac{G}{\rho S_m} dm \frac{\partial i_W^*}{\partial x_m} = \\ &= \frac{G}{\rho S_m} (\rho S_m dx_m) \frac{di_W^*}{dx_m} = G di_W^*. \end{aligned} \quad (8)$$

Первый член в правой части равенства (7) можно представить с учетом зависимости (4), если перейти от частных производных к обыкновенным

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (i_W^* dm) &= dm \frac{\partial i_W^*}{\partial t} + i_W^* \frac{\partial}{\partial t} dm = \\ &= \rho_0 S_m dx_m \left(\bar{\rho} \frac{di_W^*}{dt} + i_W^* \frac{d\bar{\rho}}{dt} \right). \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь и далее индексом ноль (“0”) помечены значения параметров и величин на исходном установившемся режиме (например плотность газа ρ_0), а чертой сверху их относительные значения. Так, $\bar{\rho} = \rho/\rho_0$ – относительная плотность газа в рассматриваемый момент времени.

Уравнение энергии (1) после подстановки в его левую часть значения (7) с учетом (8) и (9) примет вид

$$\begin{aligned} \rho_0 S_m dx_m \left(\bar{\rho} \frac{di_W^*}{dt} + i_W^* \frac{d\bar{\rho}}{dt} \right) + G di_W^* &= \\ = \frac{d}{dt} dQ_M + \frac{d}{dt} dQ_F + \frac{d}{dt} dL_{u.c.} \end{aligned} \quad (10)$$

Все значения параметров и величин в уравнениях и зависимостях (1)...(10) относятся к элементарной массе dm , расположенной на произвольном расстоянии x_m от входа в рабочее колесо. При этом используются значения параметров (энтальпии i и i^* , плотности ρ и др.), осредненные по площади поперечного сечения S_m .

Выполнив интегрирование уравнения (10) по пространственной координате x_m от входного сечения рабочего колеса 1 до выходного сечения 2, получим уравнение энергии для рабочего колеса в целом [с учетом зависимости (3)]:

$$\begin{aligned} m_{\kappa 0} (\bar{\rho}_{\kappa} \frac{di_{W\kappa}^*}{dt} + i_{W\kappa}^* \frac{d\bar{\rho}_{\kappa}}{dt}) + G_{\kappa} (i_{W2}^* - i_{W1}^*) &= \\ = \frac{dQ_{M\kappa}}{dt} + \frac{dQ_{F\kappa}}{dt} + \int_1^2 \frac{d}{dt} (dm \omega^2 r dr), \end{aligned} \quad (11)$$

где $m_{\kappa 0}$ масса газа, заполняющего каналы рабочего колеса на исходном установившемся режиме (кг), согласно зависимости (4) равная

$$m_{\kappa 0} = \int_1^2 \rho_0 S_m dx_m; \quad (12)$$

$i_{W\kappa}^*$ – осредненное значение полной удельной энтальпии газа в каналах рабочего колеса, Дж/кг, равное

$$i_{W\kappa}^* = \frac{I_{W\kappa}^*}{m_{\kappa}} = \frac{\int_1^2 i_W^* \rho S_m dx_m}{\int_1^2 \rho S_m dx_m}; \quad (13)$$

$I_{W\kappa}^*$ – общая (суммарная) полная энтальпия массы газа m_{κ} , аккумулированной в каналах рабочего колеса, Дж;

$\bar{\rho}_{\kappa} = \rho_{\kappa}/\rho_{\kappa 0}$ – относительная осредненная плотность газа в каналах рабочего колеса, зависящая от осредненной плотности

$$\rho_{\kappa} = \frac{m_{\kappa}}{V_{\kappa}} = \frac{\int_1^2 \rho S_m dx_m}{\int_1^2 S_m dx_m}; \quad (14)$$

V_{κ} – объем каналов рабочего колеса, м³; G_{κ} – расход газа через каналы рабочего колеса, осредненный по пространственной координате, кг/с; i_{W1}^*, i_{W2}^* – полная энтальпия i_W^*

во входном и выходном сечениях рабочего колеса, Дж/кг; $Q_{M\kappa}, Q_{F\kappa}$ – энергия (теплота), Дж, дополнительно подведенная к массе газа m_{κ} за время переходного процесса в результате энергообмена с протекающим через рабочие каналы потоком газа ($Q_{M\kappa}$) и в результате теплообмена с металлом рабочих каналов ($Q_{F\kappa}$).

Последний член в уравнении (11) с учетом зависимостей (4) и (6) можно представить как

$$\begin{aligned} \omega^2 \frac{dm}{dt} \int_1^2 r dr &= \omega^2 \rho S_m \frac{dx_m}{dt} \frac{r_2^2 - r_1^2}{2} = \\ &= k_r \omega^2 \rho S_m W_m = k_r \omega^2 G_{\kappa}, \end{aligned} \quad (15)$$

где k_r – постоянный коэффициент, равный

$$k_r = \frac{r_2^2 - r_1^2}{2}. \quad (16)$$

Можно показать, что последний член (15) в уравнении энергии (11) есть не что иное, как интенсивность работы центробежной силы $dL_{u.c.}/dt$ (мощность, Вт), подводимой к газу, протекающему через каналы рабочего колеса. Действительно, согласно (15) и (16),

$$G_{\kappa} \omega^2 \frac{r_2^2 - r_1^2}{2} = G_{\kappa} \frac{u_2^2 - u_1^2}{2} = G_{\kappa} l_{u.c.} = \frac{dL_{u.c.}}{dt}, \quad (17)$$

где u_1, u_2 – окружная скорость рабочего колеса во входном ($u_1 = \omega r_1$) и выходном ($u_2 = \omega r_2$) сечениях рабочего колеса, м/с; $l_{u.c.}$ – удельная работа центробежной силы, Дж/кг, равная

$$l_{u.c.} = \frac{u_2^2 - u_1^2}{2} = k_r \omega^2. \quad (18)$$

Уравнение энергии каналов рабочего колеса (11) с учетом значения его последнего члена из равенства (15) можно

представить в виде (разрешив относительно $di_{W\kappa}^*/dt$)

$$\begin{aligned} \frac{di_{W\kappa}^*}{dt} = & \frac{1}{T_{m\kappa}} \frac{\bar{G}_\kappa}{\bar{\rho}_\kappa} [k_r \omega^2 - 2(i_{W\kappa}^* - i_{W1}^*)] + \\ & + \frac{1}{m_{\kappa 0} \bar{\rho}_\kappa} \left(\frac{dQ_{M\kappa}}{dt} + \frac{dQ_{F\kappa}}{dt} \right) - \\ & - \frac{i_{W\kappa}^*}{\bar{\rho}_\kappa} \frac{d\bar{\rho}_\kappa}{dt}. \end{aligned} \quad (19)$$

Здесь $T_{m\kappa} = m_{\kappa 0} / G_{\kappa 0}$ – постоянная времени материального баланса рабочего колеса, с.

В уравнении (19) выполнена замена

$$i_{W2}^* - i_{W1}^* \approx 2(i_{W\kappa}^* - i_{W1}^*), \quad (20)$$

вытекающая из приближенного равенства

$$i_{W2}^* \approx 2i_{W\kappa}^* - i_{W1}^*. \quad (21)$$

Последний член уравнения энергии (19) определяется из динамического уравнения материального баланса каналов рабочего колеса

$$m_{\kappa 0} \frac{d\bar{m}_\kappa}{dt} = G_1 - G_2,$$

которое после подстановки в $\bar{m}_\kappa = m_\kappa / m_{\kappa 0}$ значений m_κ и $m_{\kappa 0}$, согласно зависимостям (14) и (12), принимает вид

$$\frac{d\bar{\rho}_\kappa}{dt} = \frac{1}{T_{m\kappa}} (\bar{G}_1 - \bar{G}_2). \quad (22)$$

Здесь $G_1, \bar{G}_1, G_2, \bar{G}_2$ – абсолютные, кг/с, и относительные (\bar{G}) значения расхода газа через входное 1 и выходное 2 сечения рабочего колеса.

Влияние энергии, дополнительно вносимой в объем рабочего колеса за время переходного процесса, определяется в уравнении (19) членом, с учетом приближенного равенства (21), равным

$$\begin{aligned} \frac{1}{m_{\kappa 0} \bar{\rho}_\kappa} \frac{dQ_{M\kappa}}{dt} = & \frac{1}{T_{m\kappa} \bar{\rho}_\kappa} [(\bar{G}_1 + \bar{G}_2)(i_{W1}^* - i_{W1,0}^*) - \\ & - 2\bar{G}_2(i_{W\kappa}^* - i_{W\kappa 0}^*)]. \end{aligned} \quad (23)$$

Влияние теплообмена между газом, протекающим через рабочие каналы, и металлом рабочих каналов учитывается уравнениями следующего вида (на примере теплообмена с металлом рабочих лопаток):

$$\frac{dQ_{F\lambda}}{dt} = \alpha_{\lambda 0} \bar{\alpha}_\lambda F_\lambda \left[\frac{i_{\kappa 0}}{c_p} (1 - \bar{i}_\kappa) - \frac{Q_{F\lambda}}{q_\lambda} \right], \quad (24)$$

где $\bar{\alpha}_\lambda = \alpha_\lambda / \alpha_{\lambda 0}$ – относительное значение соответствующего коэффициента теплоотдачи α_λ ($\alpha_\lambda, \alpha_{\lambda 0}$ – Вт/м²К); F_λ – поверхность теплообмена, м²; $\bar{i}_\kappa = i_\kappa / i_{\kappa 0}$ – относительное значение статической энтальпии i_κ , осредненной в объеме рабочих каналов; c_p – удельная изобарная теплоемкость газа, Дж/(кг К); q_λ – общая (суммарная) теплоемкость металла рабочих лопаток, Дж/К.

Вывод уравнения, подобного (24), выполнен в работе [9]. Аналогичные уравнения составляются также для $Q_{F\delta}$

и $Q_{F\kappa}$, они позволяют учитывать влияние теплообмена газа с металлом диска рабочего колеса ($Q_{F\delta}$) и металлом прилегающего к рабочему каналу статора ($Q_{F\kappa}$). При этом входящая в уравнение (19) величина $Q_{F\kappa}$ равна их сумме: $Q_{F\kappa} = Q_{F\lambda} + Q_{F\delta} + Q_{F\kappa}$.

Учитывая слабое влияние на энергию газа его теплообмена с металлом рабочего канала, допустимо вместо трех применить единое дифференциальное уравнение вида (24), записанное для $Q_{F\kappa}$, в котором используются суммарные значения поверхности теплообмена F_κ и общей теплоемкости q_κ металла, окружающего рабочие каналы, и подставляется средневзвешенное значение коэффициента теплоотдачи $\alpha_{\kappa 0}$.

После подстановки в уравнение (19) значения входящего в него члена (23) оно примет вид

$$\begin{aligned} \frac{di_{W\kappa}^*}{dt} = & \frac{1}{T_{m\kappa} \bar{\rho}_\kappa} \{ \bar{G}_\kappa [k_r \omega^2 - 2(i_{W\kappa}^* - i_{W1}^*)] + \\ & + (\bar{G}_1 + \bar{G}_2)(i_{W1}^* - i_{W1,0}^*) - 2\bar{G}_2(i_{W\kappa}^* - i_{W\kappa 0}^*) \} + \\ & + \frac{1}{m_{\kappa 0} \bar{\rho}_\kappa} \frac{dQ_{F\kappa}}{dt} - \frac{i_{W\kappa}^*}{\bar{\rho}_\kappa} \frac{d\bar{\rho}_\kappa}{dt}. \end{aligned} \quad (25)$$

Уравнение энергии рабочих каналов (25) можно представить в относительных величинах

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{i}_{W\kappa}^*}{dt} = & \frac{1}{T_{m\kappa} \bar{\rho}_\kappa} \{ \bar{G}_\kappa [k_{u\kappa} \Omega^2 - 2(\bar{i}_{W\kappa}^* - k_{iW1}^* \bar{i}_{W1}^*)] \\ & + k_{iW1}^* (\bar{i}_{W1}^* - 1)(\bar{G}_1 + \bar{G}_2) - \\ & - 2\bar{G}_2(\bar{i}_{W\kappa}^* - 1) \} + \frac{1}{\bar{\rho}_\kappa I_{W\kappa 0}^*} \frac{dQ_{F\kappa}}{dt} - \frac{\bar{i}_{W\kappa}^*}{\bar{\rho}_\kappa} \frac{d\bar{\rho}_\kappa}{dt} \end{aligned} \quad (26)$$

где $k_{u\kappa}, k_{iW1}^*$ – постоянные безразмерные коэффициенты, равные [$k_{u\kappa}$ с учетом формулы (18)]:

$$k_{u\kappa} = \frac{k_r \omega_0^2}{i_{W\kappa 0}^*} = \frac{u_{2,0}^2 - u_{1,0}^2}{2i_{W\kappa 0}^*}; \quad k_{iW1}^* = \frac{i_{W1,0}^*}{i_{W\kappa 0}^*}; \quad (27)$$

$\Omega = \omega / \omega_0$ – относительное значение угловой скорости; $I_{W\kappa 0}^*$ – значение $I_{W\kappa}^*$, определяемое по формуле (13), на исходном установившемся режиме, $I_{W\kappa 0}^* = m_{\kappa 0} i_{W\kappa 0}^*$, Дж.

Как видно из формулы (27), коэффициент $k_{u\kappa}$ характеризует влияние на динамику каналов рабочего колеса удельной работы центробежной силы.

Уравнения энергии (19), (25) и (26) справедливы для рабочих каналов всех типов радиальных турбомашин – центробежных радиальных и осердиальных компрессоров, являющихся потребителями энергии, и для радиальных и радиально-осевых центробежных (а также и центробежных) турбин, являющихся тепловыми двигателями. Однако представленная форма уравнений более приспособлена для использования в математической модели динамики центробежных турбомашин.