

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДИАГНОСТИКИ ДИЗЕЛЕЙ ПО ПАРАМЕТРАМ РАБОТАЮЩЕГО МОТОРНОГО МАСЛА

С.В. Викулов

*На основе анализа экспериментального материала разработаны теоретические основы и нормативы для оценки состояния судовых дизелей.*

*Ключевые слова: судовой дизель, диагностика, прогнозирование, остаточный ресурс, моторное масло.*

Тесная взаимосвязь процессов, происходящих в системе «судовой дизель – работающее моторное масло (РММ)», общее целевое назначение её в системе технической эксплуатации флота (ТЭФ) речного пароходства или судоходной компании – обеспечение надёжности, экономичности, увеличение ресурса работы – приводят к необходимости при разработке эффективных методов диагностики рассматривать данные системы как единый комплекс. В статье рассмотрены основные теоретические положения системного подхода к разработке системы диагностирования судовых дизелей по параметрам РММ на основе спектрального анализа продуктов износа.

Разработать систему диагностирования и прогнозирования технического состояния основных элементов судового дизеля, это значит [1–4]:

- сформировать диагностическую модель;
- выявить закономерности изменения параметров технического состояния объектов диагностирования;
- выбрать диагностические параметры;
- определить характеристики их изменения и связи с параметрами состояния объекта;
- осуществить выбор и технико-экономическое обоснование соответствующих методов и измерительных средств;
- установить нормативные значения диагностических параметров;
- определить способы постановки диагноза;
- определить оптимальный алгоритм диагностирования и прогнозирования.

Для исследования свойств, связей и динамических процессов, протекающих в системе «судовой дизель – РММ», во-первых, как отмечалось выше, необходимо получить

её диагностическую модель. Эта модель, используемая для определения состояния конкретного элемента системы, должна позволить сформулировать критерии для оценки его состояния, разработать оптимальные алгоритмы диагностирования и прогнозирования.

В технической диагностике применяют модель «черного ящика», используемую в кибернетике и системном анализе. Суть методологии применения этой модели в следующем. Если анализируемая система сложна и малоизученна, отсутствует её математическая модель или эта модель недостаточно адекватна протекающим в системе процессам, то можно найти некоторые системные закономерности, не вникая глубоко в физику протекающих в ней явлений.

В соответствии с принципами системной методологии необходимо создавать корректируемые (обучающиеся) алгоритмы диагностирования, которые позволят быстро оптимизировать диагностические нормативы и критерии на основе вновь поступающих данных в связи с изменившимися условиями функционирования элементов комплекса или его структуры [3, 4].

По результатам анализа существующих функциональных и структурно-следственных связей элементов судового дизеля и использования приема декомпозиции, характерного для системного анализа, рассматриваемый комплекс представлен диагностической моделью (Рисунок 1), основанной на принципе оптимального управления и обучения.

Детальный анализ этой модели позволяет разработать математические модели и алгоритмы оценки состояния конкретных элементов комплекса [4–7]. Выделим из комплекса две подсистемы: ОД – объекты диагностирования и УС – управляющую подсистему.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДИАГНОСТИКИ ДИЗЕЛЕЙ ПО ПАРАМЕТРАМ РАБОТАЮЩЕГО МОТОРНОГО МАСЛА

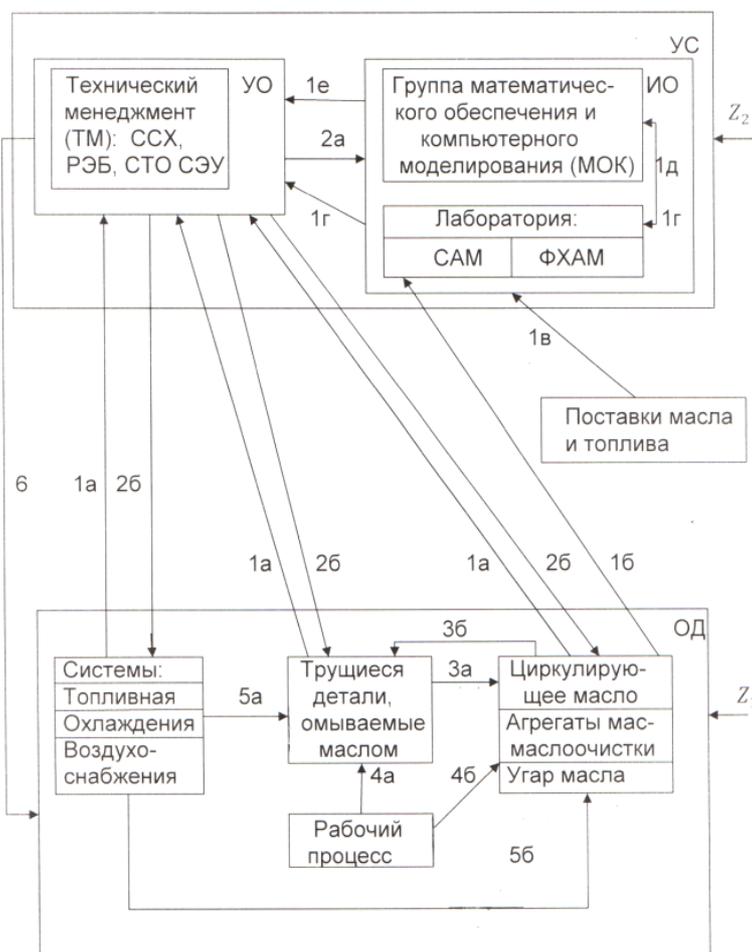


Рисунок 1 – Обобщенная диагностическая модель комплекса «судовой дизель – РММ – ТЭФ речного пароходства»

Для более подробного анализа ОД в ней целесообразно, на наш взгляд, рассматривать следующие элементы и процессы [4]:

- трущиеся детали дизеля, омываемые маслом;
- системы дизеля (топливная, охлаждения и очистки воздуха);
- работающее масло и агрегаты маслосборочной очистки;
- рабочий процесс.

В составе УС, применительно к диагностированию и управлению состоянием ОД, представляется целесообразным выделить такие элементы, как:

- теплотехническую лабораторию пароходства или судоходной компании, осуществляющих спектральный (САМ) и физико-химический (ФХАМ) анализы масел;
- группу математического обеспечения и компьютерного моделирования (МОК).

Все эти перечисленные элементы в совокупности в составе УС представляют собой информационный орган (ИО).

Далее в составе УС выделим управляющий орган (УО), включающий в себя службу технического менеджмента (ТМ), а это конкретно – аппарат управления службы судового хозяйства пароходства или компании (ССХ), ремонтно-эксплуатационные базы (РЭБ) и службу технического обслуживания СЭУ (СТО СЭУ). В её качестве рассматриваются экипажи судов, ремонтно-обслуживающий персонал береговых производственных участков (БПУ) и т.п.

В диагностической обобщенной модели комплекса (рисунок 1) выделены и обозначены следующие входные и выходные воздействия и связи, отражающие информационные процессы этого комплекса:

- 1а – информация о действительном техническом состоянии эксплуатируемых элементов СЭУ, их неисправностях, смене деталей, ремонтах и т.д.;
- 1б – информация о состоянии объекта диагностирования, поступающая в виде проб работавшего масла;

- 1в – информация о качестве поставляемых свежих масел и топлив;
- 1г – информация о результатах измерения комплекса величин контролируемых диагностических параметров и показателей свежего масла и топлива;
- 1д – информация о методах обработки результатов анализов масел, программы и планы экспериментов, алгоритмы поиска диагностических нормативов, алгоритмы распознавания, анализ ошибок и т.д.;
- 1е – систематизированная, обработанная и удобная для обозрения информация, на основе которой принимаются управляющие решения;
- 2а – управляющие решения (заклучения) о техническом состоянии ОД;
- 2б – управляющие решения по каждому элементу ОД, т.е. обратные связи (техническое обслуживание и ремонты, смена масла т.п.);
- 3а – поток продуктов износа и старения, поступающий в систему смазки;
- 3б – обратная связь влияния состояния работающего масла (системы смазки) на трущиеся детали дизеля;
- 4а – влияние рабочего процесса на состояние трущихся пар;
- 4б – влияние рабочего процесса на состояние масла и его угар;
- 5а – влияние систем дизеля, оказываемое на состояние трущихся деталей дизеля;
- 5б – влияние систем дизеля, оказываемое на качество масла, агрегаты маслоочистки и угар масла;
- 6 – управляющие воздействия на ОД в виде изменения режима его работы, условий эксплуатации.

Как видно из анализа рассматриваемой модели, связи внутри ОД достаточно неоднозначны и неопределенны. Например, топливная система и система охлаждения, оказывают влияние на гидродинамический режим трения деталей, которое невозможно учесть количественно. Кроме этого, ОД и УС находятся под влиянием множества случайных факторов  $Z_1$  и  $Z_2$  реальных условий технической эксплуатации флота.

Причинами утраты ресурсных показателей трущихся деталей служат необратимые физические процессы, происходящие на поверхности и в объеме материала деталей. Процессы изнашивания деталей являются в основном стохастическими. Следовательно, расчётная оценка состояния и ресурса элементов может быть выполнена корректно

лишь с привлечением имитационного математического моделирования [4-7].

Техническое состояние судового дизеля характеризуется совокупностью подверженных изменению в процессе эксплуатации свойств элементов, входящих в состав его качества. Классификация состояний судовой техники (в том числе дизелей речного флота) подробно рассмотрена в работе [2]. Следуя такой классификации, для диагностирования состояния конкретных элементов дизеля будем предусматривать формулировку условий разделения множества их возможных состояний  $\{D\}$  на два подмножества исправного  $\{D_1\}$  и дефектного  $\{D_2\}$  состояний, а также получение критериев для оценки этих состояний [4]. В зависимости от вида информации о техническом состоянии ОД, поступающей с РММ, диагностические параметры классифицированы по трем группам, каждая из которых наиболее полно характеризует состояние конкретных элементов ОД: 1 – параметры состояния трущихся деталей (концентрация продуктов износа в РММ); 2 – параметры качества РММ и работоспособности системы смазки (водородный показатель, щелочность, кислотность, загрязненность, вязкость и т.п.); 3 – параметры состояния систем: охлаждения (содержание воды), топливной (температура вспышки, количество топлива в РММ), очистки воздуха (концентрация кремния и т.п.).

Для первой и второй групп параметров многочисленными исследованиями [4–8] теоретически и экспериментально показана стабилизация их значений при достаточно длительной работе двигателя после смены масла.

На основе анализа химического состава материалов деталей исследуемых дизелей и основных факторов, снижающих их надежность и экономичность, формируется комплекс диагностических параметров. В качестве *основных* нами приняты текущие величины концентраций шести элемент-индикаторов ( $k_{Fe}, k_{Cu}, k_{Pb}, k_{Sn}, k_{Cr}, k_{Al}$ ) РММ, по которым оценивалось состояние трущихся деталей, лимитирующих надежность или ресурсные показатели дизеля. По отношению к основным *дополнительными* диагностическими параметрами являлись следующие величины: концентрация кремния ( $k_{Si}$ ), водородный показатель ( $pH$ ), щелочное ( $ЩЧ$ ) и кислотное ( $КЧ$ ) числа, температура вспышки ( $t_{всп}$ ), общая загрязненность ( $\tau$ ) и содержание воды ( $H_2O$ ). Эти параметры характеризуют состояние систем и качество РММ [4].

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДИАГНОСТИКИ ДИЗЕЛЕЙ ПО ПАРАМЕТРАМ РАБОТАЮЩЕГО МОТОРНОГО МАСЛА

Анализ математических моделей алгоритмов диагностирования основных трущихся деталей ДВС по параметрам масла показывает, что они выстраиваются в некоторую естественную иерархию. Во-первых, начиная с менее или более глубокого изучения физических основ протекающих в машине процессов и разработки методик получения информации о техническом состоянии трущихся деталей, основанных на методах классического детерминизма. Во-вторых, до попыток построения обобщенных стохастических закономерностей, основанных на методах теории информации, системного анализа и технической кибернетики [4–9]. Разработанные нами математические модели алгоритмов диагностирования и прогнозирования судовых дизелей на основе спектрального анализа РММ относятся к моделям второго рода [4–6, 9].

Рассмотрим основные теоретические положения эффективного использования имеющейся информации при функционировании разработанного нами алгоритма диагностирования, моделирование которого осуществлено в два этапа.

На первом этапе, путем введения «зоны неопределенности», рассматривалась задача нахождения предельных  $K_{jnp}$  и допустимых  $K_{jдоп}$  нормативных значений величин основного  $j$ -го параметра  $K$ , позволяющих с установленными вероятностями ошибок первого  $\alpha_{уст}$  «ложная тревога» и второго  $\beta_{уст}$  «пропуск дефекта» рода принять однозначное решение соответственно о дефектном или исправном состоянии диагностируемого объекта дизеля. Рисунок 2, на котором показаны распределения вероятностей ошибок принятия решений по концентрации железа в работающем масле M10B<sub>2</sub> судового дизеля 6СРН 36/45, иллюстрирует первый этап моделирования алгоритма диагностирования.

Правило решения при этом будет следующим (отказ от распознавания):

$$K_j \leq K_{jдоп}, K_j \in D_1; K_j \geq K_{jnp}, K_j \in D_2; K_{jдоп} \leq K_j \leq K_{jnp} \quad (1)$$

На втором этапе – задача разрешения «зоны неопределенности» с использованием комплекса дополнительных диагностических параметров на основе статистического последовательного анализа А. Вальда. Решающее правило метода последовательного анализа выражается следующими соотношениями (отказ от распознавания):

$$\frac{P(K^*/D_1)}{P(K^*/D_2)} \geq A, K^* \in D_1; \frac{P(K^*/D_1)}{P(K^*/D_2)} \leq B, K^* \in D_2; B < \frac{P(K^*/D_1)}{P(K^*/D_2)} < A \quad (2)$$

где  $P(K^*/D_1), P(K^*/D_2)$  – условная плотность распределения вероятностей комплекса значений диагностических параметров соответственно при исправном  $D_1$  и дефектном  $D_2$  состоянии объекта;  $A$  – избираемый порог различных уровней для суждения о наличии исправного состояния  $D_1$ ;  $B$  – то же, для суждения о наличии дефектного состояния  $D_2$ .

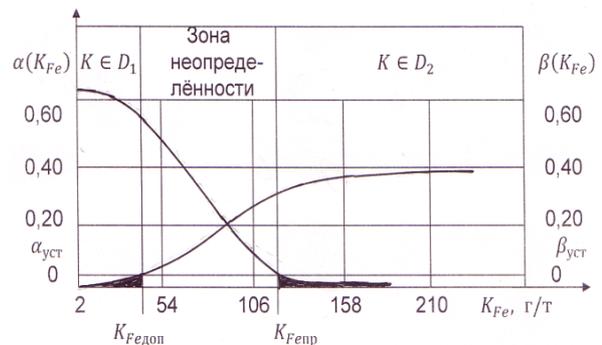


Рисунок 2 – Распределение вероятностей ошибок диагноза по  $K_{Fe}$  для различных состояний дизеля

При установленных нами ошибках первого и второго рода  $\alpha_{уст} = \beta_{уст} = 0,05$  пороги определялись следующим образом:

$$A = \frac{1 - \alpha_{уст}}{\beta_{уст}} = 19, B = \frac{\alpha_{уст}}{1 - \beta_{уст}} = \frac{1}{19}.$$

Диагностическая ценность параметра определяется информацией, которая вносится им в систему состояний [1]. Условимся считать частной диагностической ценностью обследования по  $j$ -му параметру  $K$  для состояния  $D_1$  величину информации, вносимую всеми реализациями параметра в установление этого состояния. Частная диагностическая ценность вычисляется по формулам:

$$Z_{D_1}(K_j) = \sum_{s=1}^M P(K_{js}/D_1) \log_2 \frac{P(K_{js}/D_1)}{P(K_{js})}, \quad (3)$$

$$Z_{D_2}(K_j) = \sum_{s=1}^M P(K_{js}/D_2) \log_2 \frac{P(K_{js}/D_2)}{P(K_{js})}, \quad (4)$$

где  $P(K_{js}/D_1), P(K_{js}/D_2)$  – условная вероятность наличия  $j$ -го параметра  $K$  в  $s$ -ом интервале значений соответственно для ис-

правного  $D_1$  и дефектного  $D_2$  состояний дизеля;  $P(K_j)$  — полная вероятность наличия  $j$ -го параметра  $K$  в  $S$ -ом интервале его значений для всей системы состояний  $D$  дизеля;  $M$  — число интервалов  $S$  величин  $j$ -го параметра  $K$ .

Общая диагностическая ценность определится как количество информации, вносимой обследованием в систему состояний:

$$Z_D(K_j) = P(D_1) Z_{D_1}(K_j) + P(D_2) Z_{D_2}(K_j), \quad (5)$$

где  $P(D_1)$ ,  $P(D_2)$  — соответственно априорные вероятности исправного и дефектного  $D_2$  состояний дизеля.

В общем случае с увеличением числа интервалов разбиения массива экспериментальных данных диагностическая ценность параметра возрастает или остаётся прежней, но анализ результатов при этом становится более трудоёмким. С учётом этого, выражения (3)-(5) можно использовать не только для количественной оценки информативности  $K_j$ -го параметра, но и для выбора оптимального числа  $M_{\text{опт}}$  разбиений величин  $K_j$  параметра на статистические интервалы.

Анализ результатов проведенного нами численного эксперимента выявил общий экспоненциально-возрастающий характер изменения величин  $Z_{D_1}(K_j)$ ,  $Z_{D_2}(K_j)$ ,  $Z_D(K_j)$  в зависимости от различного числа  $M$  разбиений их значений на равномерные интервалы [4, 10]. Для определения оптимального числа интервалов и, следовательно, оптимальной диагностической ценности параметров опытные точки аппроксимированы экспонентой вида

$$Z_D(K_j) = a[1 - e^{-b(M-1)}], \quad (6)$$

где  $a$ ,  $b$  — коэффициенты, определяемые методом наименьших квадратов путём преобразования уравнения (6) к уравнению вида  $f(x) = 0$  и решения его методом последовательных приближений при заданной точности  $\varepsilon = 1 \cdot 10^{-6}$  с использованием способа простого перебора;  $M = 1, \dots, H_j$  — целое число разбиений на интервалы.

Далее подсчитывались: среднее квадратичное отклонение экспериментальных величин  $Z_D(K_j)_i^2$  от теоретических  $Z_D(K_j)^2$ , вычисляемых по экспоненте,

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{M_j} [Z_D(K_j)_i^2 - Z_D(K_j)^2]^2}{M_j - 1}}, \quad (7)$$

средняя ошибка аппроксимации

$$\sigma_D = \frac{\sigma}{\sqrt{M_j}}; \quad (8)$$

средняя относительная ошибка (точность) аппроксимации

$$\delta = \frac{\sigma_D}{Z_D(K_j)^2} \cdot 100 \%, \quad (9)$$

где  $Z_D(K_j)^2$  — средняя арифметическая величина диагностической ценности:

$$\bar{Z}_D(K_j)^2 = \frac{\sum_{i=1}^{M_j} Z_D(K_j)_i^2}{M_j}, \quad (10)$$

Исходя из гипотезы нормального закона распределения отклонений опытных точек от теоретической кривой (6), при уровне доверительной вероятности  $P = 0,95$  устанавливался доверительный интервал средней ошибки аппроксимации

$$\mu = \pm t_P \cdot \sigma_D, \quad (11)$$

где  $t_P$  критерий Стьюдента.

Определение оптимального числа интервалов  $M_{\text{опт}}$  — производится итерационным методом путём сравнения приращения расчётных величин диагностической ценности двух смежных интервалов с величиной доверительного интервала средней ошибки аппроксимации:

$$|Z_D(K_j)^{M-1} - Z_D(K_j)^M| \leq \mu. \quad (12)$$

Итерационный процесс вычислений продолжается до тех пор, пока  $Z_D(K_j)^M$  не будет отличаться от  $Z_D(K_j)^{M-1}$  на величину  $\mu$  или не будет осуществлён перебор всех интервалов  $M = 1, \dots, H_j$ .

Решающее правило (2) соответствует однородному комплексу диагностических параметров, а в наших исследованиях используются параметры различной физической природы. Более того, это правило не учитывает диагностическую ценность, величина которой различна для различных параметров и диагнозов. Поэтому в решающее правило (2) вводятся весовые коэффициенты  $\delta_{1j}$ , которые учитывают диагностическую ценность и дисперсию  $K_j$  параметра для различных  $D_i$  состояний контролируемых деталей дизеля:

$$\delta_{1j} = \frac{Z_{D_1}(K_j)}{\sigma_{1j}}; \quad \delta_{2j} = \frac{Z_{D_2}(K_j)}{\sigma_{2j}}; \quad \delta_j = \frac{\delta_{1j}}{\delta_{2j}}, \quad (13)$$

где  $\sigma_{1j}$ ,  $\sigma_{2j}$  — среднее квадратичное отклонение  $K_j$  параметра соответственно исправного и дефектного состояний объекта.

Тогда закон распределения отношений плотности условных вероятностей результирующего состояния в выражении (2) задается

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДИАГНОСТИКИ ДИЗЕЛЕЙ ПО ПАРАМЕТРАМ РАБОТАЮЩЕГО МОТОРНОГО МАСЛА

как произведение частных законов распределений плотности вероятностей (отношений правдоподобий) параметров:

$$\frac{P(K^*/D_1)}{P(K^*/D_2)} = \prod_{j=1}^m \frac{\delta_{1j} P(K_{js}/D_1)}{\delta_{2j} P(K_{js}/D_2)} = \prod_{j=1}^m \Lambda_{js},$$

где  $\Lambda_{js} = \delta_{1j} / \delta_{2j}$  – приведенное отношение правдоподобий  $K_{js}$  параметра для  $s$ -го интервала его значений.

По результатам оптимизации диагностической информации в порядке убывания диагностической ценности параметров формируется диагностическая матрица, обеспечивающая более эффективное использование обучающегося вероятностного алгоритма диагностирования [4]. Процесс обучения заключается в периодической корректировке предельных и допустимых нормативов (Рисунок 1) по мере поступления новой информации, ее оптимизации и формировании диагностической матрицы, служащей информационной базой для принятия решений о состоянии объекта при нахождении значений основного диагностического параметра в «зоне неопределенности».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биргер, И.А. Техническая диагностика / И.А. Биргер. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.
2. Васильев, Б.В. Диагностирование технического состояния судовых дизелей / Б.В. Васильев, Д.И. Кофман, С.Г.Эренбург. – М.: Транспорт, 1982. – 144 с.
3. Шеромов, Л.А. Принципы построения систем диагностирования судовых дизелей с применением самообучающихся алгоритмов / Л.А. Шеромов // Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Л.: ЛИИВТ, 1991. – 47 с.

4. Викулов, С.В. Основы технической диагностики судовых дизелей по комплексу параметров работающего моторного масла / С.В. Викулов. – Новосибирск: Новосиб. гос. академ. водного трансп., 2011. – 176 с.

5. Викулов, С.В. Прогнозирование остаточного ресурса деталей ЦПГ высокооборотных судовых дизелей по расходу масла / С.В. Викулов // Науч. пробл. трансп. Сибири и Дальнего Востока – 2009. – № 2. – С.173-175

6. Викулов, С. В. Прогнозирование остаточного ресурса деталей ЦПГ судового дизеля по общей загрязнённости масла / С.В. Викулов // Науч. пробл. трансп. Сибири и Дальнего Востока. – 2010. – № 2. – С. 292 – 294

7. Надежкин, А.В. Мониторинг работающего моторного масла в системе обеспечения безопасной ресурсосберегающей эксплуатации судовых дизелей: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Владивосток: МГУ, 2011. – 42 с.

8. Чанкин, В.В. Методы оценки состояния тепловозных дизелей без их разборки с применением экспрессного спектрального анализа масел: Дис. ... докт. техн. наук. – М.: 1972. – 299 с.

9. Викулов, С.В. Оптимизация алгоритма диагностирования / С.В. Викулов, Л.А. Шеромов // Повышение эффективности технической эксплуатации судовых энергетических установок. Труды НИИВТ. – Новосибирск, 1983. – С. 68 – 77

**Викулов С.В.,** к.т.н., доц.,  
доцент кафедры «Сопротивление материалов  
и подъемно-транспортные машины»,  
моб. тел.: 8-913-939-0809,  
Новосибирская государственная академия  
водного транспорта, Новосибирск.