Межвузовский научный сборник

«Проектирование и исследование технических систем»

№ 13 январь - июнь 2009 г.

Выходит 2 раза в год

Ответственный редактор

доктор техн. наук, профессор ***В.Г. Шибаков***

Ответственный секретарь

доктор техн. наук, профессор ***Ф.Д. Байрамов***

Редакционная коллегия

д-р техн. наук, проф.	***С.В. Дмитриев***
д-р техн. наук, проф.	***И.Х. Исрафилов***
д-р техн. наук, проф.	***М.С. Колесников***
д-р физ.-мат. наук, проф.	***Л.М. Котляр***
д-р техн. наук, проф.	***Б.Л. Кузнецов***
д-р хим. наук, проф.	***М.П. Соколов***
д-р физ.-мат. наук, проф.	***Э.С. Сибгатуллин***
д-р физ.-мат. наук, проф.	***С.Н. Тимергалиев*** (зам. отв. ред.)
канд. техн. наук	***В.В. Румянцев.***

Адрес редакции: 423810, Татарстан, г. Набережные Челны, пр. Мира, 68/19,
Камская государственная инженерно-экономическая академия
тел./факс (8552) 39-66-95 e-mail: ic@ineka.ru

ISBN 978-5-9536-0184-9 (№ 13)
ISBN 5-9536-0004-6

© ГОУ ВПО «Камская государственная инженерно-экономическая академия», 2009 год

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ 1. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ

Сибгатуллин Э.С., Исламов К.Ф.
Оценка прочности массивных элементов конструкций…….…… 5
Мавлеев И.Р.
Исследование разрешимости краевой задачи для одного квазилинейного дифференциального уравнения второго порядка в частных производных ……. 14
Харчук С.И., Болдырев А.В., Харчук С.С., Болдырев С.В.
Использование STAR-CCM+ для моделирования течения жидкости в проточной части центробежного насоса…….… 18
Харчук С.И., Болдырев А.В., Нургалиев Н.Н., Харчук С.С.
Численное моделирование течения при переходе от ламинарного к турбулентному режиму в цилиндрической трубе……..... 28
Шакиров И.А.
О новом методе исследования констант Лебега семейства полиномов Лагранжа……... 33

РАЗДЕЛ 2. КОНСТРУИРОВАНИЕ КОЛЕСНЫХ МАШИН, СИЛОВЫХ УСТАНОВОК И ИХ ЭКСПЛУАТАЦИЯ

Хайруллин А.Х., Галиуллин Л.А.
Выбор режима испытания ДВС и информационных параметров…….…… 42
Волошко В.В., Мавлеев И.Р.
Высокомоментный дифференциальный гидромеханический вариатор в конструкции бесступенчатой коробки передач грузового автомобиля…… 45
Волошко В.В., Кашапов А.Р.
Шестнадцатиступенчатая коробка перемены передач для грузовых автомобилей большой грузоподъемности……...…… 52
Волошко В.В., Фокин Р.А.
Автоматическая восьмиступенчатая коробка передач для переднеприводного легкового автомобиля …….. 55
Чивилихин В.А., Карих Ф.Г., Арслангараев Р.А.
Разработка концентратора микрозагрязнений картерного масла для контроля качества обкатки двигателя... 60
Барыкин А.Ю.
Оценка перераспределения опорных реакций на ведущих колесах автомобилей…… 63
Хайруллин А.Х., Галиуллин Л.А.
Подходы к разработке структуры автоматизированной системы испытаний ДВС……. 69

РАЗДЕЛ 3. ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Калимуллин Р.Р., Садриев Р.Ш., Родькин И.М., Астащенко Т.В.
Свойства применяемых сталей для зубчатых колес…… 71
Хамадеев Ш.А.
Разработка структуры базы прецедентов комплексной оценки технологических маршрутов в кузнечно-штамповочном производстве..... 77
Симонова Л.А., Костюк И.В., Головнич И.В.
Система хранения данных в базе знаний инструментообеспечения…….. 84
Загороднев Д.И.
Организационная структура крупного и малого предприятия и принципы организации производства…… 91
Малныч А.А., Мороз В.В., Файзрахманов Р.Р.
Метод прогнозирования сроков отказа деталей кузнечно-штамповочных машин…….. 96
Малныч А.А., Мороз В.В., Файзрахманов Р.Р.
Практическая значимость моделирования повреждений в деталях для надежности кузнечно-штамповочных машин…… 101
Жарин Д.Е., Соколова А.Г., Шафигуллин Л.Н., Гумеров М.И.
Механическая обработка полимерных композиционных материалов осевым инструментом…… 105
Ососков М.А., Панкратов Д.Л.
Управление анизотропией материала при восстановлении изношенных деталей автомобиля методом пластической реновации в режиме высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО)……. 110

Калимуллин Р.Р., Соловейчик С.С., Западнова Н.Н., Абдрахманов Р.Н.
Новые экономнолегированные стали…… 116

РАЗДЕЛ 4. ЭЛЕМЕНТЫ И КОМПОНЕНТЫ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

Хабибуллин Р.Г., Лысанов Д.М.
Оценка качественных характеристик диагностического оборудования для сервисных предприятий..... 119
Лысанов Д.М.
Системный анализ организации работ на сервисном предприятии……..……. 124
Тарабарин О.И., Абулхазипова Р.М.
Реновация деталей нефтедобывающего оборудования методом газоплазменной наплавки……..……. 128
Шарафутдинов Р.Н., Ахметов В.М., Алексеев И.А.
Влияние прокладки нефте- и газопроводов на лесные почвы национального парка «Нижняя Кама»……... 134
Смирнова Н.Н., Динмухаметова А.И.
Токсичность водорастворимых смазочно-охлаждающих жидкостей…… 139
Розенцвайг А.К., Страшинский Ч.С.
Режимы дробления низкокипящей дисперсной фазы в турбулентном потоке охлаждающей эмульсии…….. 142

РАЗДЕЛ 5. ЭКОНОМИКА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ И КОМПЛЕКСОВ

Гончаров С.Н., Гончаров М.Н., Гончарова Ю.Г.
Комплексное эффективное управление системой штамповочного производства…… 154
Гончарова Ю.Г., Гончаров С.Н.
Локальное применение упрочняющих технологий при производстве деталей автомобиля и инструмента…. 161
Загирова А.Р.
Оптимизация параметров плановых и расчетных задач бизнес-процесса «Основное производство»……... 165

РАЗДЕЛ 1

Математические и численные методы исследования систем

УДК 539.374

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ МАССИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

Э.С. Сибгатуллин, *д.ф.-м.н.;* К.Ф. Исламов, *к.т.н.*
Камская государственная инженерно-экономическая академия

Рассмотрены трёхмерные тела из композиционных материалов (КМ). В общем случае, как сама матрица, так и армирующие ее элементы (волокна, тонкие стержни) являются анизотропными материалами. Рассматриваются произвольные структуры армирования, кратковременные статические нагрузки. С использованием жесткопластической модели деформируемого твердого тела, соотношений теории течения и гипотез кинематического характера получены параметрические уравнения предельной поверхности в 18-мерном пространстве (9-ти сил и 9-ти моментов) внутренних силовых факторов (ВСФ) для конечного элемента (КЭ) в форме прямоугольной призмы. Из общих уравнений следуют соответствующие уравнения для частных случаев (для однородных анизотропных и изотропных материалов).

Введение. Пространственные задачи механики деформируемого твердого тела имеют место, когда все три измерения тела (длина, ширина, высота) не сильно отличаются друг от друга. Такие задачи возникают, например, при проектировании массивных монолитных железобетонных фундаментов под тяжелое промышленное оборудование. Определение несущей способности массивных элементов конструкций, оставаясь в пространствах напряжений σ_{ij} $\left(i,j=\overline{1,3}\right)$ и деформаций ε_{ij}, является трудной задачей даже при использовании современной мощной вычислительной техники. В настоящей работе предложено представить массивное тело как совокупность КЭ в виде прямоугольных призм и тетраэдров. Выведены уравнения для вычисления предельных комбинаций внутренних сил T_{ij} и моментов M_{ij}, действующих на грани этих элементов.

Вывод уравнений предельной поверхности для КЭ в форме прямоугольной призмы. Введем следующие системы координат: $(xyz)_j$ – эта система связана с осями анизотропии j-й компоненты КМ $\left(j=\overline{1,n}\right)$; система $\xi_1\xi_2\xi_3$ связана с КМ в целом; OXYZ – глобальная (неподвижная) система, куда отнесена конструкция в целом.

Уравнение предельной поверхности для j-й компоненты КМ в системе $(xyz)_j$ имеет следующий вид:

$$\left(\vec{\sigma}_1^T A_1 \vec{\sigma}_1 + 2\vec{B}_1^T \vec{\sigma}_1 - 1\right)_j = 0. \qquad (1)$$

Здесь $\vec{\sigma}_1$ – вектор величин, описывающих напряженное состояние; A_1 – симметричная матрица; индекс T означает транспонирование. Компоненты матрицы A_1 и вектора $\vec{B}_1$ подлежат определению на основе соответствующих экспериментальных результатов. Критерий прочности (1) является частным случаем критерия Малмейстера [1].

Компоненты тензора напряжений в рассматриваемой точке тела при переходе от декартовой системы $(xyz)_j$ в декартовую систему координат $\xi_1\xi_2\xi_3$ преобразуются по следующей формуле[2]:

$$\sigma_{ik}\left(x_j, y_j, z_j\right) = a_{pi} a_{qk} \sigma_{pq}\left(\xi_1, \xi_2, \xi_3\right); \qquad i, k = x, y, z; \quad p,q = 1, 2, 3. \qquad (2)$$

Здесь a_{pi}, a_{qk} – косинусы углов между соответствующими осями системы $(xyz)_j$ и $\xi_1\xi_2\xi_3$:

$$a_{1x} = \cos(\xi_1, x_j); \quad a_{2x} = \cos(\xi_2, x_j); \quad a_{3x} = \cos(\xi_3, x_j);$$
$$a_{1y} = \cos(\xi_1, y_j); \quad a_{2y} = \cos(\xi_2, y_j); \quad a_{3y} = \cos(\xi_3, y_j);$$
$$a_{1z} = \cos(\xi_1, z_j); \quad a_{2z} = \cos(\xi_2, z_j); \quad a_{3z} = \cos(\xi_3, z_j).$$

После перехода от осей $(xyz)_j$ к осям $\xi_1\xi_2\xi_3$ с использованием (2) уравнение (1) принимает вид

(3) $$\Phi_j(\vec{\sigma}_j) \equiv \left(\vec{\sigma}^T A\vec{\sigma} + 2\vec{B}^T\vec{\sigma} - 1\right)_j = 0.$$

(4)

Здесь $A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{N1} & a_{N2} & \cdots & a_{NN} \end{bmatrix}$; $\vec{B} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_N \end{bmatrix}$; $\vec{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \vdots \\ \sigma_N \end{bmatrix}$;

N – размерность пространства параметров, описывающих напряженное состояние (размерность пространства обобщенных сил); A – симметричная матрица. Индекс j указывает номер компоненты в КМ и для удобства записи может быть как верхним, так и нижним.

Используя ассоциированный с условием (3) закон изменения кинематических характеристик [3], находим

(4) $$\dot{\varepsilon}_i^j = \dot{\lambda}_j \frac{\partial \Phi_j}{\partial \sigma_i^j} \equiv 2\dot{\lambda}_j\left(\vec{A}_i\vec{\sigma} + b_i\right)_j, j = \overline{1, N}.$$

Здесь $\dot{\lambda}_j(\dot{\varepsilon}_i^j) \geq 0$; $\vec{A}_i$ – i-я строка матрицы A; b_i - i-й элемент вектора $\vec{B}$; $[\dot{\varepsilon}_1, \dot{\varepsilon}_2, \ldots, \dot{\varepsilon}_N]_j^T$ – вектор скоростей обобщенных перемещений j-й компоненты КМ. Решая систему уравнений (4) относительно обобщенных сил σ_i^j, находим

(5) $$\sigma_i^j = \left\{\left[\left(\frac{0.5}{\lambda}\right)\sum_{k=1}^N \delta_{ik}\dot{\varepsilon}_k - \Delta_i\right]/\Delta\right\}_j.$$

Здесь $\delta_{ik} = \delta_{ki}$ – алгебраические дополнения элемента a_{ik} $(i, k = \overline{1, N})$ матрицы A; Δ – детерминант матрицы A; Δ_i – детерминант, который получен при замене i-го столбца Δ на вектор $\vec{B}$. Подставляя (5) в (3),получаем

(6) $$\dot{\lambda}_j^2 = \left(\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N \delta_{ik}\dot{\varepsilon}_i\dot{\varepsilon}_k / S_\Delta\right)_j,$$

где $S_\Delta^j = 4\left(\sum_{i=1}^N b_i\Delta_i + \Delta\right)_j$.

В данной работе между одинарными и двойными индексациями напряжений и деформаций установлены следующие зависимости: 11→1; 22→2; 33→3; 12→4; 23→5; 31→6.

Примем следующие гипотезы кинематического характера:

(7) $$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_{11} &= \dot{e}_{11} + \dot{æ}_{21}\xi_2 - \dot{æ}_{31}\xi_3; & \dot{\varepsilon}_{12} &= 0.5(\dot{\gamma}_{12} - \dot{æ}_{11}\xi_3 + \dot{æ}_{22}\xi_3); \\ \dot{\varepsilon}_{22} &= \dot{e}_{22} - \dot{æ}_{12}\xi_3 + \dot{æ}_{32}\xi_1; & \dot{\varepsilon}_{23} &= 0.5(\dot{\gamma}_{23} - \dot{æ}_{22}\xi_1 + \dot{æ}_{33}\xi_1); \\ \dot{\varepsilon}_{33} &= \dot{e}_{33} + \dot{æ}_{13}\xi_2 - \dot{æ}_{23}\xi_1; & \dot{\varepsilon}_{31} &= 0.5(\dot{\gamma}_{31} - \dot{æ}_{33}\xi_2 + \dot{æ}_{11}\xi_2). \end{aligned}$$

Здесь $\dot{\varepsilon}_{ij}$ $(i, j = \overline{1,3})$ - скорости деформаций. Начало подвижной системы $\xi_1\xi_2\xi_3$ располагается в центре рассматриваемой грани призмы, а оси ξ_1, ξ_2, ξ_3 параллельны соответствующим ребрам этой призмы. Скорости обобщенных перемещений $\dot{e}_{ij}, \dot{æ}_{ij}, \dot{\gamma}_{ij}$ $(i, j = \overline{1,3})$ остаются постоянными в пределах рассматриваемой грани призмы. В соответствии с (7) грани прямоугольной призмы перемещаются поступательно и поворачиваются относительно соответствующих осей ξ_1, ξ_2, ξ_3, а также испытывают сдвиги. Отметим, что все соотношения в (7) являются линейными относительно ξ_1, ξ_2, ξ_3.

Подставив (7) в (5), получаем

$$\sigma_i^j = \frac{1}{2\lambda_j\Delta_j}\left\{\sum_{k=1}^{6}\delta_{ik}^j\dot{e}_k + \xi_1\left[\delta_{i2}^j\dot{æ}_{32} - \delta_{i3}^j\dot{æ}_{23} + 0.5\delta_{i5}^j(\dot{æ}_{33} - \dot{æ}_{22})\right] + \xi_2\left[\delta_{i1}^j\dot{æ}_{21} + \delta_{i3}^j\dot{æ}_{13} + 0.5\delta_{i6}^j(\dot{æ}_{11} - \dot{æ}_{33})\right] + \xi_3\left[-\delta_{i1}^j\dot{æ}_{31} - \delta_{i2}^j\dot{æ}_{12} + 0.5\delta_{i4}^j(\dot{æ}_{22} - \dot{æ}_{11})\right]\right\} - \frac{\Delta_i^j}{\Delta_j};\ i = \overline{1,6}. \quad (8)$$

Здесь приняты следующие обозначения:

$\dot{e}_1 \equiv \dot{e}_{11}; \dot{e}_2 \equiv \dot{e}_{22};\ \dot{e}_3 \equiv \dot{e}_{33}; \dot{e}_4 \equiv \dot{\gamma}_{12}; \dot{e}_5 \equiv \dot{\gamma}_{23};\ \dot{e}_6 \equiv \dot{\gamma}_{31}.$

Подставив (7) в (6), получаем

$$\dot{\lambda}_j^2 = \frac{1}{S_\Delta^j}\left[P_e + 2\left(\xi_1 P_{eæ}^{\xi_1} + \xi_2 P_{eæ}^{\xi_2} + \xi_3 P_{eæ}^{\xi_3} + \xi_1\xi_2 P_{æ}^{\xi_1\xi_2} + \xi_2\xi_3 P_{æ}^{\xi_2\xi_3} + \xi_3\xi_1 P_{æ}^{\xi_3\xi_1}\right) + \xi_1^2 P_{æ}^{\xi_1} + \xi_2^2 P_{æ}^{\xi_2} + \xi_3^2 P_{æ}^{\xi_3}\right]_j. \quad (9)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$P_e^j = \delta_{11}^j\dot{e}_{11}^2 + \delta_{22}^j\dot{e}_{22}^2 + \delta_{33}^j\dot{e}_{33}^2 + \frac{1}{4}\left(\delta_{44}^j\dot{\gamma}_{12}^2 + \delta_{55}^j\dot{\gamma}_{23}^2 + \delta_{66}^j\dot{\gamma}_{31}^2\right) + 2\left\{\delta_{12}^j\dot{e}_{11}\dot{e}_{22} + \delta_{23}^j\dot{e}_{22}\dot{e}_{33} + \delta_{31}^j\dot{e}_{33}\dot{e}_{11} + \frac{1}{2}\left[\dot{e}_{11}\left(\delta_{14}^j\dot{\gamma}_{12} + \delta_{15}^j\dot{\gamma}_{23} + \delta_{16}^j\dot{\gamma}_{31}\right) + \dot{e}_{22}\left(\delta_{24}^j\dot{\gamma}_{12} + \delta_{25}^j\dot{\gamma}_{23} + \delta_{26}^j\dot{\gamma}_{31}\right) + \dot{e}_{33}\left(\delta_{34}^j\dot{\gamma}_{12} + \delta_{35}^j\dot{\gamma}_{23} + \delta_{36}^j\dot{\gamma}_{31}\right)\right] + \frac{1}{4}\left(\delta_{45}^j\dot{\gamma}_{12}\dot{\gamma}_{23} + \delta_{56}^j\dot{\gamma}_{23}\dot{\gamma}_{31} + \delta_{64}^j\dot{\gamma}_{31}\dot{\gamma}_{12}\right)\right\};$$

$$\left(P_{eæ}^{\xi_1}\right)_j = \dot{e}_{11}\left[\delta_{12}^j\dot{æ}_{32} - \delta_{13}^j\dot{æ}_{23} + 0.5\delta_{15}^j(\dot{æ}_{33} - \dot{æ}_{22})\right] + \dot{e}_{22}\left[\delta_{22}^j\dot{æ}_{32} - \delta_{23}^j\dot{æ}_{23} + 0.5\delta_{25}^j(\dot{æ}_{33} - \dot{æ}_{22})\right] + \dot{e}_{33}\left[\delta_{32}^j\dot{æ}_{32} - \delta_{33}^j\dot{æ}_{23} + 0.5\delta_{35}^j(\dot{æ}_{33} - \dot{æ}_{22})\right] + \frac{1}{2}\left[\dot{æ}_{32}\left(\delta_{24}^j\dot{\gamma}_{12} + \delta_{25}^j\dot{\gamma}_{23} + \delta_{26}^j\dot{\gamma}_{31}\right) - \dot{æ}_{23}\left(\delta_{43}^j\dot{\gamma}_{12} + \delta_{53}^j\dot{\gamma}_{23} + \delta_{63}^j\dot{\gamma}_{31}\right)\right] + \frac{1}{4}(\dot{æ}_{33} - \dot{æ}_{22})\left(\delta_{45}^j\dot{\gamma}_{12} + \delta_{55}^j\dot{\gamma}_{23} + \delta_{65}^j\dot{\gamma}_{31}\right);$$

$$\left(P_{eæ}^{\xi_2}\right)_j = \dot{e}_{11}\left[\delta_{11}^j\dot{æ}_{21} + \delta_{13}^j\dot{æ}_{13} + 0.5\delta_{16}^j(\dot{æ}_{11} - \dot{æ}_{33})\right] + \dot{e}_{22}\left[\delta_{12}^j\dot{æ}_{21} + \delta_{23}^j\dot{æ}_{13} + 0.5\delta_{26}^j(\dot{æ}_{11} - \dot{æ}_{33})\right] + \dot{e}_{33}\left[\delta_{13}^j\dot{æ}_{21} + \delta_{33}^j\dot{æ}_{13} + 0.5\delta_{36}^j(\dot{æ}_{11} - \dot{æ}_{33})\right] + \frac{1}{2}\left[\dot{æ}_{21}\left(\delta_{14}^j\dot{\gamma}_{12} + \delta_{15}^j\dot{\gamma}_{23} + \delta_{16}^j\dot{\gamma}_{31}\right) + \dot{æ}_{13}\left(\delta_{34}^j\dot{\gamma}_{12} + \delta_{35}^j\dot{\gamma}_{23} + \delta_{36}^j\dot{\gamma}_{31}\right)\right] + \frac{1}{4}(\dot{æ}_{11} - \dot{æ}_{33})\left(\delta_{46}^j\dot{\gamma}_{12} + \delta_{56}^j\dot{\gamma}_{23} + \delta_{66}^j\dot{\gamma}_{31}\right);$$

$$\left(P_{eæ}^{\xi_3}\right)_j = \dot{e}_{11}\left[0.5\delta_{14}^j(\dot{æ}_{22} - \dot{æ}_{11}) - \delta_{11}^j\dot{æ}_{31} - \delta_{12}^j\dot{æ}_{12}\right] + \dot{e}_{22}\left[0.5\delta_{24}^j(\dot{æ}_{22} - \dot{æ}_{11}) - \delta_{12}^j\dot{æ}_{31} - \delta_{22}^j\dot{æ}_{12}\right] + \dot{e}_{33}\left[0.5\delta_{34}^j(\dot{æ}_{22} - \dot{æ}_{11}) - \delta_{13}^j\dot{æ}_{31} - \delta_{23}^j\dot{æ}_{12}\right] - \frac{1}{2}\left[\dot{æ}_{31}\left(\delta_{14}^j\dot{\gamma}_{12} + \delta_{15}^j\dot{\gamma}_{23} + \delta_{16}^j\dot{\gamma}_{31}\right) + \dot{æ}_{12}\left(\delta_{24}^j\dot{\gamma}_{12} + \delta_{25}^j\dot{\gamma}_{23} + \delta_{26}^j\dot{\gamma}_{31}\right)\right] + \frac{1}{4}(\dot{æ}_{22} - \dot{æ}_{11})\left(\delta_{44}^j\dot{\gamma}_{12} + \delta_{45}^j\dot{\gamma}_{23} + \delta_{46}^j\dot{\gamma}_{31}\right);$$

$$\left(P_{æ}^{\xi_1\xi_2}\right)_j = \dot{æ}_{32}\left(\delta_{12}^j\dot{æ}_{21} + \delta_{23}^j\dot{æ}_{13}\right) - \dot{æ}_{23}\left(\delta_{13}^j\dot{æ}_{21} + \delta_{33}^j\dot{æ}_{13}\right) + 0.5(\dot{æ}_{33} - \dot{æ}_{22})\left(\delta_{15}^j\dot{æ}_{21} + \delta_{35}^j\dot{æ}_{13}\right) + 0.5(\dot{æ}_{11} - \dot{æ}_{33})\left(\delta_{26}^j\dot{æ}_{32} + \delta_{36}^j\dot{æ}_{23}\right) + \frac{1}{4}\delta_{56}^j(\dot{æ}_{11} - \dot{æ}_{33})(\dot{æ}_{33} - \dot{æ}_{22});$$

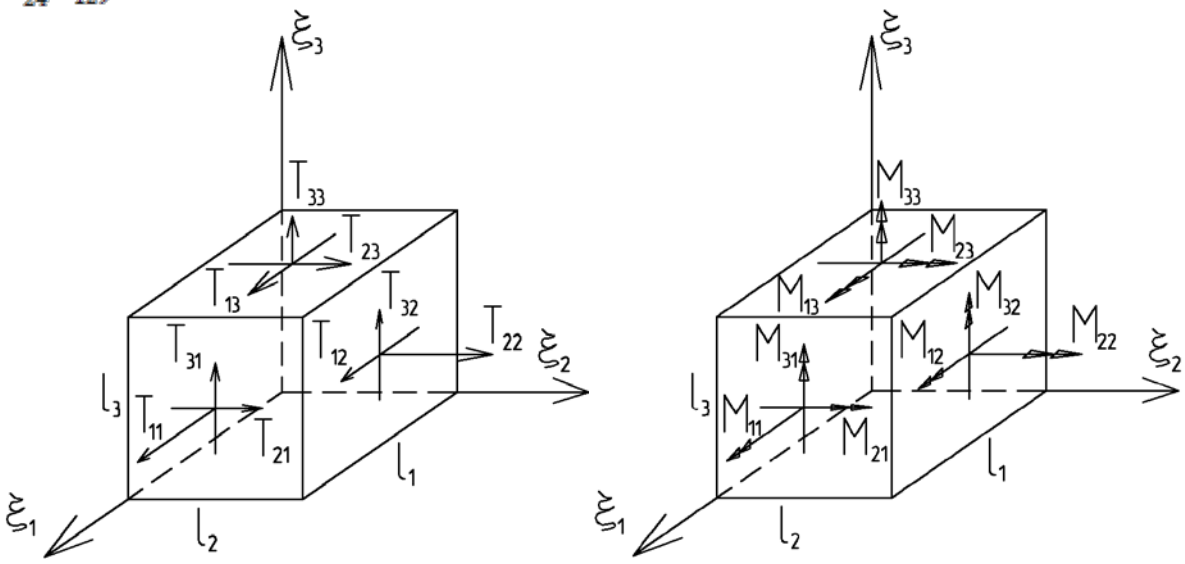
$$\left(P_{æ}^{\xi_2\xi_3}\right)_j = -\dot{æ}_{21}\left(\delta_{11}^j\dot{æ}_{31} + \delta_{12}^j\dot{æ}_{12}\right) - \dot{æ}_{13}\left(\delta_{13}^j\dot{æ}_{31} + \delta_{23}^j\dot{æ}_{12}\right) + 0.5(\dot{æ}_{22} - \dot{æ}_{11})\left(\delta_{14}^j\dot{æ}_{21} + \delta_{34}^j\dot{æ}_{13}\right) + 0.5(\dot{æ}_{33} - \dot{æ}_{11})\left(\delta_{16}^j\dot{æ}_{31} + \delta_{26}^j\dot{æ}_{12}\right) + \frac{1}{4}\delta_{46}^j(\dot{æ}_{11} - \dot{æ}_{22})(\dot{æ}_{33} - \dot{æ}_{11});$$

$$\left(P_{æ}^{\xi_3\xi_1}\right)_j = -\dot{æ}_{32}\left(\delta_{12}^j\dot{æ}_{31} + \delta_{22}^j\dot{æ}_{12}\right) + \dot{æ}_{23}\left(\delta_{13}^j\dot{æ}_{31} + \delta_{23}^j\dot{æ}_{12}\right) + 0.5(\dot{æ}_{22} - \dot{æ}_{33})\left(\delta_{15}^j\dot{æ}_{31} + \delta_{25}^j\dot{æ}_{12}\right) + 0.5(\dot{æ}_{22} - \dot{æ}_{11})\left(\delta_{24}^j\dot{æ}_{32} - \delta_{34}^j\dot{æ}_{23}\right) + 0.25\delta_{45}^j(\dot{æ}_{11} - \dot{æ}_{22})(\dot{æ}_{22} - \dot{æ}_{33});$$

$$\left(P_{æ}^{\xi_1}\right)_j = \delta_{22}^j \dot{æ}_{32}^2 - 2\delta_{23}^j \dot{æ}_{32}\dot{æ}_{23} + \delta_{33}^j \dot{æ}_{23}^2 + 0.25\delta_{55}^j(\dot{æ}_{22} - \dot{æ}_{33})^2 + (\dot{æ}_{33} - \dot{æ}_{22})(\delta_{25}^j \dot{æ}_{32} - \delta_{35}^j \dot{æ}_{23});$$

$$\left(P_{æ}^{\xi_2}\right)_j = \delta_{11}^j \dot{æ}_{21}^2 + 2\delta_{13}^j \dot{æ}_{21}\dot{æ}_{13} + \delta_{33}^j \dot{æ}_{13}^2 + 0.25\delta_{66}^j(\dot{æ}_{11} - \dot{æ}_{33})^2 + (\dot{æ}_{11} - \dot{æ}_{33})(\delta_{16}^j \dot{æ}_{21} + \delta_{36}^j \dot{æ}_{13});$$

$$\left(P_{æ}^{\xi_3}\right)_j = \delta_{11}^j \dot{æ}_{31}^2 + 2\delta_{12}^j \dot{æ}_{31}\dot{æ}_{12} + \delta_{22}^j \dot{æ}_{12}^2 + 0.25\delta_{44}^j(\dot{æ}_{11} - \dot{æ}_{22})^2 + (\dot{æ}_{11} - \dot{æ}_{22})(\delta_{14}^j \dot{æ}_{31} + \delta_{24}^j \dot{æ}_{12}).$$



а) б)

Рисунок 1

Внутренние силы и моменты, действующие на грани прямоугольной призмы, определяем по следующим формулам [4]:

$$T_{11} = \int_{A_1} \sigma_{11} dA;\ T_{21} = \int_{A_1} \sigma_{21} dA;\ T_{31} = \int_{A_1} \sigma_{31} dA;$$
$$T_{12} = \int_{A_2} \sigma_{12} dA;\ T_{22} = \int_{A_2} \sigma_{22} dA;\ T_{32} = \int_{A_2} \sigma_{32} dA;$$
$$T_{13} = \int_{A_3} \sigma_{13} dA;\ T_{23} = \int_{A_3} \sigma_{23} dA;\ T_{33} = \int_{A_3} \sigma_{33} dA; \quad (10)$$
$$M_{11} = \int_{A_1} (\sigma_{31}\xi_2 - \sigma_{21}\xi_3) dA;\ M_{21} = \int_{A_1} \sigma_{11}\xi_3 dA;\ M_{31} = -\int_{A_1} \sigma_{11}\xi_2 dA;$$
$$M_{12} = -\int_{A_2} \sigma_{22}\xi_3 dA;\ M_{22} = \int_{A_2} (\sigma_{12}\xi_3 - \sigma_{32}\xi_1) dA;\ M_{32} = \int_{A_2} \sigma_{22}\xi_1 dA;$$
$$M_{13} = \int_{A_3} \sigma_{33}\xi_2 dA;\ M_{23} = -\int_{A_3} \sigma_{33}\xi_1 dA;\ M_{33} = \int_{A_3} (\sigma_{23}\xi_1 - \sigma_{13}\xi_2) dA.$$

Здесь T_{ii} – нормальные силы, $T_{ij}\ (i \neq j)$ - касательные силы $(i, j = \overline{1,3})$, M_{ii} – «крутящие» моменты, $M_{ij}\ (i \neq j)$ – «изгибающие» моменты (рис. 1); $A_1 = l_2 \cdot l_3$, $A_2 = l_1 \cdot l_3$, $A_3 = l_1 \cdot l_2$ - площади граней призмы. Внутренние элементарные силы $\sigma_{ij} dA$ приводятся к центрам площадей соответствующих граней.

Подставив (8) в (10), получаем нижеприведенные параметрические уравнения для предельных комбинаций ВСФ, действующих на грани прямоугольной призмы (рис. 1). В этих уравнениях приняты следующие обозначения:

$M_1 \equiv M_{21}$; $M_2 \equiv M_{32}$; $M_3 \equiv M_{13}$; $M_4 \equiv M_{31}$; $M_5 \equiv M_{12}$; $M_6 \equiv M_{23}$. Итак:

$$T_{ii} = \sum_{j=1}^{n_i} \int_{A_i} \sigma_i^j dA = \sum_{j=1}^{n_i} \frac{1}{2\Delta_j} \{\sum_{k=1}^{6} \delta_{ik}^j I_{1i}^j \dot{e}_k + I_{2i}^j [\delta_{i2}^j \dot{æ}_{32} - \delta_{i3}^j \dot{æ}_{23} + 0.5\delta_{i5}^j (\dot{æ}_{33} - \dot{æ}_{22})] + I_{3i}^j [\delta_{i1}^j \dot{æ}_{21} + \delta_{i3}^j \dot{æ}_{13} + 0.5\delta_{i6}^j (\dot{æ}_{11} - \dot{æ}_{33})] + I_{4i}^j [-\delta_{i1}^j \dot{æ}_{31} - \delta_{i2}^j \dot{æ}_{12} + 0.5\delta_{i4}^j (\dot{æ}_{22} - \dot{æ}_{11})] - 2\Delta_{ij} A_{ij}\}; \quad (11)$$

здесь $i = \overline{1,3}$; $I_{1i}^j = \int_{A_{ij}} \frac{dA}{\lambda_j}$; $I_{2i}^j = \int_{A_{ij}} \frac{\xi_1 dA}{\lambda_j}$; $I_{3i}^j = \int_{A_{ij}} \frac{\xi_2 dA}{\lambda_j}$; $I_{4i}^j = \int_{A_{ij}} \frac{\xi_3 dA}{\lambda_j}$; $\sum_{j=1}^{n_i} A_{ij} = A_i$.

$$T_{i-3,l} = \sum_{j=1}^{n_l} \int_{A_l} \sigma_i^j dA = \sum_{j=1}^{n_l} \frac{1}{2\Delta_j} \{\sum_{k=1}^{6} \delta_{ik}^j I_{1l}^j \dot{e}_k + I_{2l}^j [\delta_{i2}^j \dot{æ}_{32} - \delta_{i3}^j \dot{æ}_{23} + 0.5\delta_{i5}^j (\dot{æ}_{33} - \dot{æ}_{22})] + I_{3l}^j [\delta_{i1}^j \dot{æ}_{21} + \delta_{i3}^j \dot{æ}_{13} + 0.5\delta_{i6}^j (\dot{æ}_{11} - \dot{æ}_{33})] + I_{4l}^j [-\delta_{i1}^j \dot{æ}_{31} - \delta_{i2}^j \dot{æ}_{12} + 0.5\delta_{i4}^j (\dot{æ}_{22} - \dot{æ}_{11})] - 2\Delta_{ij} A_{lj}\};$$

$$T_{l,i-3} = \sum_{j=1}^{n_{i-3}} \int_{A_{i-3}} \sigma_i^j dA = \sum_{j=1}^{n_{i-3}} \frac{1}{2\Delta_j} \{\sum_{k=1}^{6} \delta_{ik}^j I_{1,i-3}^j \dot{e}_k + I_{2,i-3}^j [\delta_{i2}^j \dot{æ}_{32} - \delta_{i3}^j \dot{æ}_{23} + 0.5\delta_{i5}^j (\dot{æ}_{33} - \dot{æ}_{22})] + I_{3,i-3}^j [\delta_{i1}^j \dot{æ}_{21} + \delta_{i3}^j \dot{æ}_{13} + 0.5\delta_{i6}^j (\dot{æ}_{11} - \dot{æ}_{33})] + I_{4,i-3}^j [-\delta_{i1}^j \dot{æ}_{31} - \delta_{i2}^j \dot{æ}_{12} + 0.5\delta_{i4}^j (\dot{æ}_{22} - \dot{æ}_{11})] - 2\Delta_{ij} A_{i-3,j}\}. \quad (12)$$

В (12) индексы i, l присутствуют в следующих комбинациях:

$$(i = 4, l = 2); (i = 5, l = 3); (i = 6, l = 1).$$

Примем следующие обозначения: $\zeta_1=\xi_3$; $\zeta_2=\xi_1$; $\zeta_3=\xi_2$. Далее:

(13)

$$M_i = \sum_{j=1}^{n_i} \int_{A_{ij}} \sigma_i^j \zeta_i dA = \sum_{j=1}^{n_i} \frac{1}{2\Delta_j} \{\sum_{k=1}^{6} \delta_{ik}^j J_{1i}^j \dot{e}_k + J_{2i}^j [\delta_{i2}^j \dot{æ}_{32} - \delta_{i3}^j \dot{æ}_{23} + 0.5\delta_{i5}^j (\dot{æ}_{33} - \dot{æ}_{22})] + J_{3i}^j [\delta_{i1}^j \dot{æ}_{21} + \delta_{i3}^j \dot{æ}_{13} + 0.5\delta_{i6}^j (\dot{æ}_{11} - \dot{æ}_{33})] + J_{4i}^j [-\delta_{i1}^j \dot{æ}_{31} - \delta_{i2}^j \dot{æ}_{12} + 0.5\delta_{i4}^j (\dot{æ}_{22} - \dot{æ}_{11})] - 2\Delta_{ij} \tilde{S}_i^j\};$$

здесь $i = \overline{1,3}$;

$J_{1i}^j = \int_{A_{ij}} \frac{\zeta_i dA}{\lambda_j}$; $J_{2i}^j = \int_{A_{ij}} \frac{\zeta_i \xi_1 dA}{\lambda_j}$; $J_{3i}^j = \int_{A_{ij}} \frac{\zeta_i \xi_2 dA}{\lambda_j}$; $J_{4i}^j = \int_{A_{ij}} \frac{\zeta_i \xi_3 dA}{\lambda_j}$; $\tilde{S}_i^j = \int_{A_{ij}} \zeta_i dA$.

Примем следующие обозначения: $\zeta_4=\xi_2$; $\zeta_5=\xi_3$; $\zeta_6=\xi_1$. Далее:

(14)

$$M_i = -\sum_{j=1}^{n_{i-3}} \int_{A_{i-3,j}} \sigma_i^j \zeta_i dA = -\sum_{j=1}^{n_{i-3}} \frac{1}{2\Delta_j} \{J_{5i}^j \sum_{k=1}^{6} \delta_{ik}^j \dot{e}_k + J_{6i}^j [\delta_{i2}^j \dot{æ}_{32} - \delta_{i3}^j \dot{æ}_{23} + 0.5\delta_{i5}^j (\dot{æ}_{33} - \dot{æ}_{22})] + J_{7i}^j [\delta_{i1}^j \dot{æ}_{21} + \delta_{i3}^j \dot{æ}_{13} + 0.5\delta_{i6}^j (\dot{æ}_{11} - \dot{æ}_{33})] + J_{8i}^j [-\delta_{i1}^j \dot{æ}_{31} - \delta_{i2}^j \dot{æ}_{12} + 0.5\delta_{i4}^j (\dot{æ}_{22} - \dot{æ}_{11})] - 2\Delta_{ij} \tilde{S}_i^j\};$$

здесь $i = \overline{4,6}$;

$J_{5i}^j = \int_{A_{i-3,j}} \frac{\zeta_i}{\lambda_j} dA$; $J_{6i}^j = \int_{A_{i-3,j}} \frac{\zeta_i \xi_1 dA}{\lambda_j}$; $J_{7i}^j = \int_{A_{i-3,j}} \frac{\zeta_i \xi_2 dA}{\lambda_j}$; $J_{8i}^j = \int_{A_{i-3,j}} \frac{\zeta_i \xi_3 dA}{\lambda_j}$; $\tilde{S}_i^j = \int_{A_{i-3,j}} \zeta_i dA$.

«Крутящие» моменты определяются следующими уравнениями:

$$M_{11} = \int_{A_1} (\sigma_{31}\xi_2 - \sigma_{21}\xi_3) dA = \sum_{j=1}^{n_1} \frac{1}{2\Delta_j} \{\tilde{I}_{51}^j \sum_{k=1}^{6} \delta_{6k}^j \dot{e}_k + \tilde{I}_{61}^j [\delta_{62}^j \dot{æ}_{32} - \delta_{63}^j \dot{æ}_{23} + 0.5\delta_{65}^j (\dot{æ}_{33} - \dot{æ}_{22})] + \tilde{I}_{71}^j [\delta_{61}^j \dot{æ}_{21} + \delta_{63}^j \dot{æ}_{13} + 0.5\delta_{66}^j (\dot{æ}_{11} - \dot{æ}_{33})] + \tilde{I}_{81}^j [-\delta_{61}^j \dot{æ}_{31} - \delta_{62}^j \dot{æ}_{12} + 0.5\delta_{64}^j (\dot{æ}_{22} - \dot{æ}_{11})] - 2\Delta_{6j} S_{31}^j\} - \sum_{j=1}^{n_1} \frac{1}{2\Delta_j} \{\tilde{I}_{91}^j \sum_{k=1}^{6} \delta_{4k}^j \dot{e}_k + \tilde{I}_{10,1}^j [\delta_{42}^j \dot{æ}_{32} - \delta_{43}^j \dot{æ}_{23} + 0.5\delta_{45}^j (\dot{æ}_{33} - \dot{æ}_{22})] + \tilde{I}_{11,1}^j [\delta_{41}^j \dot{æ}_{21} + \delta_{43}^j \dot{æ}_{13} + 0.5\delta_{46}^j (\dot{æ}_{11} - \dot{æ}_{33})] + \tilde{I}_{12,1}^j [-\delta_{41}^j \dot{æ}_{31} - \delta_{42}^j \dot{æ}_{12} + 0.5\delta_{44}^j (\dot{æ}_{22} - \dot{æ}_{11})] - 2\Delta_{4j} S_{21}^j\};$$

$$M_{22} = \int_{A_2} (\sigma_{12}\xi_3 - \sigma_{32}\xi_1)dA = \sum_{j=1}^{n_2} \frac{1}{2\Delta_j} \{\tilde{I}_{13,2}^j \sum_{k=1}^{6} \delta_{4k}^j \dot{e}_k + \tilde{I}_{14,2}^j [\delta_{42}^j \dot{æ}_{32} - \delta_{43}^j \dot{æ}_{23} + 0.5\delta_{45}^j (\dot{æ}_{33} - \dot{æ}_{22})] + \tilde{I}_{15,2}^j [\delta_{41}^j \dot{æ}_{21} + \delta_{43}^j \dot{æ}_{13} + 0.5\delta_{46}^j (\dot{æ}_{11} - \dot{æ}_{33})] + \tilde{I}_{16,2}^j [-\delta_{41}^j \dot{æ}_{31} - \delta_{42}^j \dot{æ}_{12} + 0.5\delta_{44}^j (\dot{æ}_{22} - \dot{æ}_{11})] - 2\Delta_{4j} S_{12}^j\} - \sum_{j=1}^{n_2} \frac{1}{2\Delta_j} \{\tilde{I}_{17,2}^j \sum_{k=1}^{6} \delta_{5k}^j \dot{e}_k + \tilde{I}_{18,2}^j [\delta_{52}^j \dot{æ}_{32} - \delta_{53}^j \dot{æ}_{23} + 0.5\delta_{55}^j (\dot{æ}_{33} - \dot{æ}_{22})] + \tilde{I}_{19,2}^j [\delta_{51}^j \dot{æ}_{21} + \delta_{53}^j \dot{æ}_{13} + 0.5\delta_{56}^j (\dot{æ}_{11} - \dot{æ}_{33})] + \tilde{I}_{20,2}^j [-\delta_{51}^j \dot{æ}_{31} - \delta_{52}^j \dot{æ}_{12} + 0.5\delta_{54}^j (\dot{æ}_{22} - \dot{æ}_{11})] - 2\Delta_{5j} S_{32}^j\}; \quad (15)$$

$$M_{33} = \int_{A_3} (\sigma_{23}\xi_1 - \sigma_{13}\xi_2)dA = \sum_{j=1}^{n_3} \frac{1}{2\Delta_j} \{\tilde{I}_{21,3}^j \sum_{k=1}^{6} \delta_{5k}^j \dot{e}_k + \tilde{I}_{22,3}^j [\delta_{52}^j \dot{æ}_{32} - \delta_{53}^j \dot{æ}_{23} + 0.5\delta_{55}^j (\dot{æ}_{33} - \dot{æ}_{22})] + \tilde{I}_{23,3}^j [\delta_{51}^j \dot{æ}_{21} + \delta_{53}^j \dot{æ}_{13} + 0.5\delta_{56}^j (\dot{æ}_{11} - \dot{æ}_{33})] + \tilde{I}_{24,3}^j [-\delta_{51}^j \dot{æ}_{31} - \delta_{52}^j \dot{æ}_{12} + 0.5\delta_{54}^j (\dot{æ}_{22} - \dot{æ}_{11})] - 2\Delta_{5j} S_{23}^j\} - \sum_{j=1}^{n_3} \frac{1}{2\Delta_j} \{\tilde{I}_{25,3}^j \sum_{k=1}^{6} \delta_{6k}^j \dot{e}_k + \tilde{I}_{26,3}^j [\delta_{62}^j \dot{æ}_{32} - \delta_{63}^j \dot{æ}_{23} + 0.5\delta_{65}^j (\dot{æ}_{33} - \dot{æ}_{22})] + \tilde{I}_{27,3}^j [\delta_{61}^j \dot{æ}_{21} + \delta_{63}^j \dot{æ}_{13} + 0.5\delta_{66}^j (\dot{æ}_{11} - \dot{æ}_{33})] + \tilde{I}_{28,3}^j [-\delta_{61}^j \dot{æ}_{31} - \delta_{62}^j \dot{æ}_{12} + 0.5\delta_{64}^j (\dot{æ}_{22} - \dot{æ}_{11})] - 2\Delta_{6j} S_{13}^j\};$$

здесь, например, $\tilde{I}_{51}^j = \int_{A_{1j}} \frac{\xi_2}{\lambda_j} dA = I_{31}^j$; $\tilde{I}_{13,2}^j = \int_{A_{2j}} \frac{\xi_3}{\lambda_j} dA = I_{42}^j$; $\tilde{I}_{21,3}^j = \int_{A_{3j}} \frac{\xi_1}{\lambda_j} dA = I_{23}^j$.

Параметрические уравнения (11÷15) описывают предельную поверхность (поверхность прочности) для прямоугольной призмы из композиционного материала в пространстве внутренних силовых факторов, действующих на грани призмы с размерами l_1, l_2, l_3 (рис.1). Здесь параметрами являются отношения скоростей обобщенных перемещений $\dot{e}_{11}, \dots, \dot{æ}_{33}$. Исключив эти параметры из уравнений (11÷15), можно, в принципе, получить уравнение предельной поверхности в пространстве $T_{11}, \dots, M_{33}$.

Предельные комбинации ВСФ на наклонной грани тетраэдра. Предельные комбинации ВСФ, приложенных в центре наклонной грани прямоугольного тетраэдра (рис.2), определяются из следующих уравнений статики:

$$P_{1\nu} = T_{11} + T_{12} + T_{13}; \qquad M_{1\nu} = M_{11} + M_{12} + M_{13};$$
$$P_{2\nu} = T_{21} + T_{22} + T_{23}; \qquad M_{2\nu} = M_{21} + M_{22} + M_{23};$$
$$P_{3\nu} = T_{31} + T_{32} + T_{33}; \qquad M_{3\nu} = M_{31} + M_{32} + M_{33}.$$

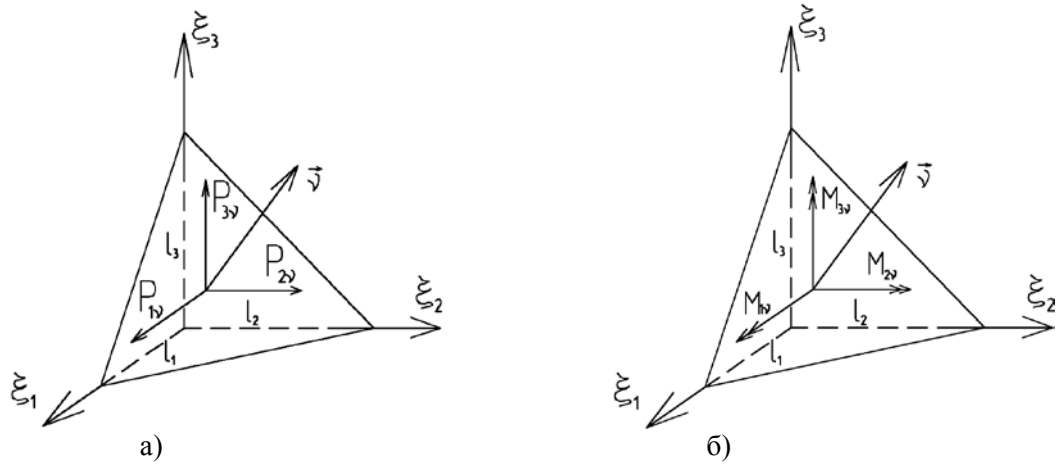


Рисунок 2

Уравнения предельных поверхностей для однородных анизотропных и изотропных тел. Для тел из однородных анизотропных материалов в приведенных выше соотношениях будут отсутствовать индексы *j*, а в уравнениях (11÷15) – еще и знаки суммирования $\sum_{j=1}^{n_i}$. Имеем:

$$T_{ii} = \int_{A_i} \sigma_i dA = \frac{1}{2\Delta}\{\sum_{k=1}^{6} \delta_{ik} I_{1i} \dot{e}_k + I_{3i}[\delta_{i1}\dot{æ}_{21} + \delta_{i3}\dot{æ}_{13} + 0.5\delta_{i6}(\dot{æ}_{11} - \dot{æ}_{33})] + I_{2i}[\delta_{i2}\dot{æ}_{32} - \delta_{i3}\dot{æ}_{23} + 0.5\delta_{i5}(\dot{æ}_{33} - \dot{æ}_{22})] + I_{4i}[-\delta_{i1}\dot{æ}_{31} - \delta_{i2}\dot{æ}_{12} + 0.5\delta_{i4}(\dot{æ}_{22} - \dot{æ}_{11})] - 2\Delta_i A_i\};\ i = \overline{1,3};$$

$$I_{1i} = \int_{A_i} \frac{dA}{\lambda};\ I_{2i} = \int_{A_i} \frac{\xi_1 dA}{\lambda};\ I_{3i} = \int_{A_i} \frac{\xi_2 dA}{\lambda};\ I_{4i} = \int_{A_i} \frac{\xi_3 dA}{\lambda}.$$

$$T_{i-3,l} = \int_{A_i} \sigma_i\ dA = \frac{1}{2\Delta}\{\sum_{k=1}^{6} \delta_{ik} I_{1l}\, \dot{e}_k + I_{2l}\left[\delta_{i2}\dot{æ}_{32} - \delta_{i3}\dot{æ}_{23} + 0.5\delta_{i5}(\dot{æ}_{33} - \dot{æ}_{22})\right] + I_{3l}\left[\delta_{i1}\dot{æ}_{21} + \delta_{i3}\dot{æ}_{13} + 0.5\delta_{i6}(\dot{æ}_{11} - \dot{æ}_{33})\right] + I_{4l}\left[-\delta_{i1}\dot{æ}_{31} - \delta_{i2}\dot{æ}_{12} + 0.5\delta_{i4}(\dot{æ}_{22} - \dot{æ}_{11})\right] - 2\Delta_i A_l\};$$

$$T_{l,i-3} = \int_{A_{i-3}} \sigma_i\ dA = \frac{1}{2\Delta}\{\sum_{k=1}^{6} \delta_{ik} I_{1,i-3}\dot{e}_k + I_{2,i-3}\left[\delta_{i2}\dot{æ}_{32} - \delta_{i3}\dot{æ}_{23} + 0.5\delta_{i5}(\dot{æ}_{33} - \dot{æ}_{22})\right] + I_{3,i-3}\left[\delta_{i1}\dot{æ}_{21} + \delta_{i3}\dot{æ}_{13} + 0.5\delta_{i6}(\dot{æ}_{11} - \dot{æ}_{33})\right] + I_{4,i-3}\left[-\delta_{i1}\dot{æ}_{31} - \delta_{i2}\dot{æ}_{12} + 0.5\delta_{i4}(\dot{æ}_{22} - \dot{æ}_{11})\right] - 2\Delta_i A_{i-3}\};$$

в двух последних уравнениях индексы i, l присутствуют в следующих комбинациях: $(i = 4, l = 2); (i = 5, l = 3);\ (i = 6, l = 1)$.

Примем следующие обозначения: $\zeta_1=\xi_3$; $\zeta_2=\xi_1$; $\zeta_3=\xi_2$. Далее:

$$M_i = \int_{A_i} \sigma_i\ \zeta_i dA = \frac{1}{2\Delta}\{\sum_{k=1}^{6} \delta_{ik} J_{1i}\, \dot{e}_k + J_{2i}\left[\delta_{i2}\dot{æ}_{32} - \delta_{i3}\dot{æ}_{23} + 0.5\delta_{i5}(\dot{æ}_{33} - \dot{æ}_{22})\right] + J_{3i}\left[\delta_{i1}\dot{æ}_{21} + \delta_{i3}\dot{æ}_{13} + 0.5\delta_{i6}(\dot{æ}_{11} - \dot{æ}_{33})\right] + J_{4i}\left[-\delta_{i1}\dot{æ}_{31} - \delta_{i2}\dot{æ}_{12} + 0.5\delta_{i4}(\dot{æ}_{22} - \dot{æ}_{11})\right] - 2\Delta_i \tilde{S}_i\ \};$$

здесь $i = \overline{1,3}$;

$$J_{1i} = \int_{A_i} \frac{\zeta_i dA}{\lambda};\ J_{2i} = \int_{A_i} \frac{\zeta_i \xi_1 dA}{\lambda};\ J_{3i} = \int_{A_i} \frac{\zeta_i \xi_2 dA}{\lambda};\ J_{4i} = \int_{A_i} \frac{\zeta_i \xi_3 dA}{\lambda};\ \tilde{S}_i\ = \int_{A_i} \zeta_i dA.$$

Примем следующие обозначения: $\zeta_4=\xi_2$; $\zeta_5=\xi_3$; $\zeta_6=\xi_1$. Далее:

$$M_i = -\int_{A_{i-3}} \sigma_i\ \zeta_i dA = -\frac{1}{2\Delta}\{J_{5i} \sum_{k=1}^{6} \delta_{ik}\dot{e}_k + J_{6i}\left[\delta_{i2}\dot{æ}_{32} - \delta_{i3}\dot{æ}_{23} + 0.5\delta_{i5}(\dot{æ}_{33} - \dot{æ}_{22})\right] + J_{7i}\left[\delta_{i1}\dot{æ}_{21} + \delta_{i3}\dot{æ}_{13} + 0.5\delta_{i6}(\dot{æ}_{11} - \dot{æ}_{33})\right] + J_{8i}\left[-\delta_{i1}\dot{æ}_{31} - \delta_{i2}\dot{æ}_{12} + 0.5\delta_{i4}(\dot{æ}_{22} - \dot{æ}_{11})\right] - 2\Delta_i \tilde{S}_i\ \};$$

здесь $i = \overline{4,6}$;

$$J_{5i} = \int_{A_{i-3}} \frac{\zeta_i}{\lambda} dA;\ J_{6i} = \int_{A_{i-3}} \frac{\zeta_i \xi_1 dA}{\lambda};\ J_{7i} = \int_{A_{i-3}} \frac{\zeta_i \xi_2 dA}{\lambda};\ J_{8i} = \int_{A_{i-3}} \frac{\zeta_i \xi_3 dA}{\lambda};\ \tilde{S}_i\ = \int_{A_{i-3}} \zeta_i dA.$$

«Крутящие» моменты определяются по следующим уравнениям:

$$M_{11} = \int_{A_1} (\sigma_{31}\xi_2 - \sigma_{21}\xi_3) dA = \frac{1}{2\Delta}\{\tilde{I}_{51} \sum_{k=1}^{6} \delta_{6k}\dot{e}_k + \tilde{I}_{61}\left[\delta_{62}\dot{æ}_{32} - \delta_{63}\dot{æ}_{23} + 0.5\delta_{65}(\dot{æ}_{33} - \dot{æ}_{22})\right] + \tilde{I}_{71}\left[\delta_{61}\dot{æ}_{21} + \delta_{63}\dot{æ}_{13} + 0.5\delta_{66}(\dot{æ}_{11} - \dot{æ}_{33})\right] + \tilde{I}_{81}\left[-\delta_{61}\dot{æ}_{31} - \delta_{62}\dot{æ}_{12} + 0.5\delta_{64}(\dot{æ}_{22} - \dot{æ}_{11})\right] - 2\Delta_{6j} S_{31}\} - \frac{1}{2\Delta_j}\{\tilde{I}_{91} \sum_{k=1}^{6} \delta_{4k}\dot{e}_k + \tilde{I}_{10,1}\left[\delta_{42}\dot{æ}_{32} - \delta_{43}\dot{æ}_{23} + 0.5\delta_{45}(\dot{æ}_{33} - \dot{æ}_{22})\right] + \tilde{I}_{11,1}\left[\delta_{41}\dot{æ}_{21} + \delta_{43}\dot{æ}_{13} + 0.5\delta_{46}(\dot{æ}_{11} - \dot{æ}_{33})\right] + \tilde{I}_{12,1}\left[-\delta_{41}\dot{æ}_{31} - \delta_{42}\dot{æ}_{12} + 0.5\delta_{44}(\dot{æ}_{22} - \dot{æ}_{11})\right] - 2\Delta_4 S_{21}\};$$

$$M_{22} = \int_{A_2} (\sigma_{12}\xi_3 - \sigma_{32}\xi_1)dA = \frac{1}{2\Delta_j}\{\tilde{I}_{13,2}\sum_{k=1}^{6}\delta_{4k}\dot{e}_k + \tilde{I}_{14,2}[\delta_{42}\dot{æ}_{32} - \delta_{43}\dot{æ}_{23} + 0.5\delta_{45}(\dot{æ}_{33} - \dot{æ}_{22})] + \tilde{I}_{15,2}[\delta_{41}\dot{æ}_{21} + \delta_{43}\dot{æ}_{13} + 0.5\delta_{46}(\dot{æ}_{11} - \dot{æ}_{33})] + \tilde{I}_{16,2}[-\delta_{41}\dot{æ}_{31} - \delta_{42}\dot{æ}_{12} + 0.5\delta_{44}(\dot{æ}_{22} - \dot{æ}_{11})] - 2\Delta_4 S_{12}\} - \frac{1}{2\Delta}\{\tilde{I}_{17,2}\sum_{k=1}^{6}\delta_{5k}\dot{e}_k + \tilde{I}_{18,2}[\delta_{52}\dot{æ}_{32} - \delta_{53}\dot{æ}_{23} + 0.5\delta_{55}(\dot{æ}_{33} - \dot{æ}_{22})] + \tilde{I}_{19,2}[\delta_{51}\dot{æ}_{21} + \delta_{53}\dot{æ}_{13} + 0.5\delta_{56}(\dot{æ}_{11} - \dot{æ}_{33})] + \tilde{I}_{20,2}[-\delta_{51}\dot{æ}_{31} - \delta_{52}\dot{æ}_{12} + 0.5\delta_{54}(\dot{æ}_{22} - \dot{æ}_{11})] - 2\Delta_5 S_{32}\};$$

$$M_{33} = \int_{A_3} (\sigma_{23}\xi_1 - \sigma_{13}\xi_2)dA = \frac{1}{2\Delta}\{\tilde{I}_{21,3}\sum_{k=1}^{6}\delta_{5k}\dot{e}_k + \tilde{I}_{22,3}[\delta_{52}\dot{æ}_{32} - \delta_{53}\dot{æ}_{23} + 0.5\delta_{55}(\dot{æ}_{33} - \dot{æ}_{22})] + \tilde{I}_{23,3}[\delta_{51}\dot{æ}_{21} + \delta_{53}\dot{æ}_{13} + 0.5\delta_{56}(\dot{æ}_{11} - \dot{æ}_{33})] + \tilde{I}_{24,3}[-\delta_{51}\dot{æ}_{31} - \delta_{52}\dot{æ}_{12} + 0.5\delta_{54}(\dot{æ}_{22} - \dot{æ}_{11})] - 2\Delta_5 S_{23}\} - \frac{1}{2\Delta}\{\tilde{I}_{25,3}\sum_{k=1}^{6}\delta_{6k}\dot{e}_k + \tilde{I}_{26,3}[\delta_{62}\dot{æ}_{32} - \delta_{63}\dot{æ}_{23} + 0.5\delta_{65}(\dot{æ}_{33} - \dot{æ}_{22})] + \tilde{I}_{27,3}[\delta_{61}\dot{æ}_{21} + \delta_{63}\dot{æ}_{13} + 0.5\delta_{66}(\dot{æ}_{11} - \dot{æ}_{33})] + \tilde{I}_{28,3}[-\delta_{61}\dot{æ}_{31} - \delta_{62}\dot{æ}_{12} + 0.5\delta_{64}(\dot{æ}_{22} - \dot{æ}_{11})] - 2\Delta_6 S_{13}\};$$

здесь, например, $\tilde{I}_{51} = \int_{A_1}\frac{\xi_2}{\lambda}dA = I_{31}$, $\tilde{I}_{13,2} = \int_{A_2}\frac{\xi_3}{\lambda}dA = I_{42}$, $\tilde{I}_{21,3} = \int_{A_3}\frac{\xi_1}{\lambda}dA = I_{23}$.

Условие прочности для однородного изотропного материала с разными сопротивлениями растяжению и сжатию имеет следующий вид:

$$a(\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 + \sigma_{33}^2) + 2b(\sigma_{11}\sigma_{22} + \sigma_{22}\sigma_{33} + \sigma_{33}\sigma_{11}) + 2c(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) + d(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2) = 1. \quad (16)$$

Например, для легкой стали в (16) нужно подставить значение $a = 1/\sigma_0^2$, $2b = -1/\sigma_0^2$, $c = 0$, $d = 3/\sigma_0^2$; для бетона – значения $a = \frac{1}{R_c R_t}$, $2b = -\frac{1}{R_c R_t}$, $c = \frac{R_c - R_t}{R_c R_t}$, $d = \frac{1}{4R_t^2}$.
Здесь σ_0 - предел текучести стали, $R_c > 0$ - прочность бетона при сжатии, $R_t > 0$ – прочность бетона при растяжении. Исходя из (16), имеем:

$\delta = a^3 - 3ab^2 + 2b^3$; $\Delta = d^3\delta$; $\delta_{ii} = d^3(a^2 - b^2)$ при $i = \overline{1,3}$; $\delta_{ii} = d^2\delta$ при $i = \overline{4,6}$; $\delta_{ij} = d^3 b(b - a)$ при $i \neq j$, $i = \overline{1,3}$, $j = \overline{1,3}$; $\delta_{ij} = 0$ при $i \neq j$, $i = \overline{4,6}$, $j = \overline{4,6}$; $\Delta_i = 0$, $i = \overline{1,6}$; $S_\Delta = 4\Delta$.

Для определения $\dot{\lambda}^2$ используем (9) без индекса j, где

$$P_e = \delta_{11}(\dot{e}_{11}^2 + \dot{e}_{22}^2 + \dot{e}_{33}^2) + \frac{1}{4}\delta_{44}(\dot{\gamma}_{12}^2 + \dot{\gamma}_{23}^2 + \dot{\gamma}_{31}^2) + 2\delta_{12}(\dot{e}_{11}\dot{e}_{22} + \dot{e}_{22}\dot{e}_{33} + \dot{e}_{33}\dot{e}_{11});$$
$$P_{e\text{æ}}^{\xi_1} = \delta_{12}[\dot{e}_{11}(\dot{æ}_{32} - \dot{æ}_{23}) - \dot{e}_{22}\dot{æ}_{23} + \dot{e}_{33}\dot{æ}_{32}] + \delta_{22}(\dot{e}_{22}\dot{æ}_{32} - \dot{e}_{33}\dot{æ}_{23});$$
$$P_{e\text{æ}}^{\xi_2} = \delta_{11}(\dot{e}_{11}\dot{æ}_{21} + \dot{e}_{33}\dot{æ}_{13}) + \delta_{12}[\dot{e}_{11}\dot{æ}_{13} + \dot{e}_{22}(\dot{æ}_{21} + \dot{æ}_{13}) + \dot{e}_{33}\dot{æ}_{21}];$$
$$P_{e\text{æ}}^{\xi_3} = \delta_{11}(-\dot{e}_{11}\dot{æ}_{31} - \dot{e}_{22}\dot{æ}_{12}) + \delta_{12}[-\dot{e}_{11}\dot{æ}_{12} - \dot{e}_{22}\dot{æ}_{31} - \dot{e}_{33}(\dot{æ}_{31} + \dot{æ}_{12})];$$
$$P_{\text{æ}}^{\xi_1\xi_2} = \delta_{12}[\dot{æ}_{32}(\dot{æ}_{21} + \dot{æ}_{13}) - \dot{æ}_{23}\dot{æ}_{21}] - \delta_{33}\dot{æ}_{13}\dot{æ}_{23};$$
$$P_{\text{æ}}^{\xi_2\xi_3} = -\delta_{11}\dot{æ}_{31}\dot{æ}_{21} - \delta_{12}[\dot{æ}_{21}\dot{æ}_{12} + \dot{æ}_{13}(\dot{æ}_{31} + \dot{æ}_{12})];$$
$$P_{\text{æ}}^{\xi_3\xi_1} = -\delta_{22}\dot{æ}_{12}\dot{æ}_{32} + \delta_{12}[-\dot{æ}_{32}\dot{æ}_{31} + \dot{æ}_{23}(\dot{æ}_{31} + \dot{æ}_{12})];$$
$$P_{\text{æ}}^{\xi_1} = \delta_{22}(\dot{æ}_{32}^2 + \dot{æ}_{23}^2) - 2\delta_{23}\dot{æ}_{32}\dot{æ}_{23};$$
$$P_{\text{æ}}^{\xi_2} = \delta_{11}(\dot{æ}_{21}^2 + \dot{æ}_{13}^2) + 2\delta_{13}\dot{æ}_{21}\dot{æ}_{13};$$
$$P_{\text{æ}}^{\xi_3} = \delta_{11}(\dot{æ}_{31}^2 + \dot{æ}_{12}^2) + 2\delta_{12}\dot{æ}_{31}\dot{æ}_{12}.$$

Для внутренних сил T_{ij} и моментов $M_{ij}, \left(i,j=\overline{1,3}\right)$ соответствующие формулы (11÷15) также упрощаются:

(17) $$T_{ii}=\frac{1}{2\Delta}\left[I_{1i}\sum_{k=1}^{3}\delta_{ik}\dot{e}_k+I_{2i}(\delta_{i2}\dot{æ}_{32}-\delta_{i3}\dot{æ}_{23})+I_{3i}(\delta_{i1}\dot{æ}_{21}+\delta_{i3}\dot{æ}_{13})-I_{4i}(\delta_{i1}\dot{æ}_{31}+\delta_{i2}\dot{æ}_{12})\right];$$

здесь $i=\overline{1,3}$;

$$I_{1i}=\int_{A_i}\frac{dA}{\lambda};\ I_{2i}=\int_{A_i}\frac{\xi_1 dA}{\lambda};\ I_{3i}=\int_{A_i}\frac{\xi_2 dA}{\lambda};\ I_{4i}=\int_{A_i}\frac{\xi_3 dA}{\lambda}.$$

(18) $$\begin{aligned}
T_{12}&=\frac{\delta_{44}}{2\Delta}\left[I_{12}\dot{e}_4+0.5I_{42}(\dot{æ}_{22}-\dot{æ}_{11})\right];\\
T_{23}&=\frac{\delta_{55}}{2\Delta}\left[I_{13}\dot{e}_5+0.5I_{23}(\dot{æ}_{33}-\dot{æ}_{22})\right];\\
T_{31}&=\frac{\delta_{66}}{2\Delta}\left[I_{11}\dot{e}_6+0.5I_{31}(\dot{æ}_{11}-\dot{æ}_{33})\right];\\
T_{21}&=\frac{\delta_{44}}{2\Delta}\left[I_{11}\dot{e}_4+0.5I_{41}(\dot{æ}_{22}-\dot{æ}_{11})\right];\\
T_{32}&=\frac{\delta_{55}}{2\Delta}\left[I_{12}\dot{e}_5+0.5I_{22}(\dot{æ}_{33}-\dot{æ}_{22})\right];\\
T_{13}&=\frac{\delta_{66}}{2\Delta}\left[I_{13}\dot{e}_6+0.5I_{33}(\dot{æ}_{11}-\dot{æ}_{33})\right].
\end{aligned}$$

(19) $$M_i=\frac{1}{2\Delta}\left[J_{1i}\sum_{k=1}^{3}\delta_{ik}\dot{e}_k+J_{2i}(\delta_{i2}\dot{æ}_{32}-\delta_{i3}\dot{æ}_{23})+J_{3i}(\delta_{i1}\dot{æ}_{21}+\delta_{i3}\dot{æ}_{13})-J_{4i}(\delta_{i1}\dot{æ}_{31}+\delta_{i2}\dot{æ}_{12})\right];$$

здесь $i=\overline{1,3}$, $J_{1i}=\int_{A_i}\frac{\zeta_i dA}{\lambda}$; $J_{2i}=\int_{A_i}\frac{\zeta_i\xi_1 dA}{\lambda}$; $J_{3i}=\int_{A_i}\frac{\zeta_i\xi_2 dA}{\lambda}$; $J_{4i}=\int_{A_i}\frac{\zeta_i\xi_3 dA}{\lambda}$;
$\zeta_1=\xi_3;\ \zeta_2=\xi_1;\ \zeta_3=\xi_2$.

(20) $$M_i=-\frac{1}{2\Delta}\left[J_{5i}\sum_{k=1}^{3}\delta_{ik}\dot{e}_k+J_{6i}(\delta_{i2}\dot{æ}_{32}-\delta_{i3}\dot{æ}_{23})+J_{7i}(\delta_{i1}\dot{æ}_{21}+\delta_{i3}\dot{æ}_{13})-J_{8i}(\delta_{i1}\dot{æ}_{31}+\delta_{i2}\dot{æ}_{12})\right];$$

здесь $i=\overline{4,6}$; $J_{5i}=\int_{A_{i-3}}\frac{\zeta_i dA}{\lambda}$; $J_{6i}=\int_{A_{i-3}}\frac{\zeta_i\xi_1 dA}{\lambda}$; $J_{7i}=\int_{A_{i-3}}\frac{\zeta_i\xi_2 dA}{\lambda}$; $J_{8i}=\int_{A_{i-3}}\frac{\zeta_i\xi_3 dA}{\lambda}$;
$\zeta_4=\xi_2;\ \zeta_5=\xi_3;\ \zeta_6=\xi_1$.

(21) $$\begin{aligned}
M_{11}&=\frac{\delta_{44}}{2\Delta}\left[\tilde{I}_{51}\dot{e}_6-\tilde{I}_{91}\dot{e}_4+0.5\tilde{I}_{71}(\dot{æ}_{11}-\dot{æ}_{33})-0.5\tilde{I}_{12,1}(\dot{æ}_{22}-\dot{æ}_{11})\right];\\
M_{22}&=\frac{\delta_{55}}{2\Delta}\left[\tilde{I}_{13,2}\dot{e}_4-\tilde{I}_{17,2}\dot{e}_5+0.5\tilde{I}_{16,2}(\dot{æ}_{22}-\dot{æ}_{11})-0.5\tilde{I}_{18,2}(\dot{æ}_{33}-\dot{æ}_{22})\right];\\
M_{33}&=\frac{\delta_{66}}{2\Delta}\left[\tilde{I}_{21,3}\dot{e}_5-\tilde{I}_{25,3}\dot{e}_6+0.5\tilde{I}_{22,3}(\dot{æ}_{33}-\dot{æ}_{22})-0.5\tilde{I}_{27,3}(\dot{æ}_{11}-\dot{æ}_{33})\right];
\end{aligned}$$

здесь $\frac{\delta_{ii}}{2\Delta}=\frac{1}{2d}$; $i=\overline{4,6}$;

$$\tilde{I}_{51}=\int_{A_1}\frac{\xi_2}{\lambda}dA;\ \tilde{I}_{71}=\int_{A_1}\frac{\xi_2^2}{\lambda}dA;\ \tilde{I}_{91}=\int_{A_1}\frac{\xi_3}{\lambda}dA;\ \tilde{I}_{12,1}=\int_{A_1}\frac{\xi_3^2}{\lambda}dA;$$
$$\tilde{I}_{13,2}=\int_{A_2}\frac{\xi_3}{\lambda}dA;\tilde{I}_{16,2}=\int_{A_2}\frac{\xi_3^2 dA}{\lambda};\tilde{I}_{17,2}=\int_{A_2}\frac{\xi_1}{\lambda}dA;\tilde{I}_{18,2}=\int_{A_2}\frac{\xi_1^2}{\lambda}dA;$$
$$\tilde{I}_{21,3}=\int_{A_3}\frac{\xi_1 dA}{\lambda};\ \tilde{I}_{22,3}=\int_{A_3}\frac{\xi_1^2 dA}{\lambda};\tilde{I}_{25,3}=\int_{A_3}\frac{\xi_2}{\lambda}dA;\ \tilde{I}_{27,3}=\int_{A_3}\frac{\xi_2^2 dA}{\lambda}.$$

Уравнения (17) – (21) определяют предельные комбинации внутренних сил и моментов для изотропных тел, прочностные свойства которых описываются уравнениями (16), при их объемном напряженном состоянии. Эти силы и моменты действуют на грани прямоугольной призмы с размерами l_1, l_2, l_3.

Для материалов, аналогичных мягкой стали, уравнение (16) переходит в условие пластичности Мизеса и описывает в пространстве напряжений круговой цилиндр бесконечной длины. При этом теряется однозначная зависимость между скоростями деформаций и напряжениями. Математически это проявляется, в частности, в том, что $\delta = 0$, $\Delta = 0$. Когда эти величины оказываются в знаменателях некоторых формул, возникают неопределенности.

Пусть $\dot{e}_{11} = \dot{e}_{22} = \dot{e}_{33} = 1$, скорости остальных обобщенных перемещений равны нулю. Тогда:

$$P_в = 3d^3\left(a \quad - b \quad\right)^2;\ \delta = a^3 - 3ab^2 + 2b^3;\ S_\Delta = 4d^3\delta;\ \dot{\lambda}^2 = \frac{P_в}{S_\Delta} = \frac{3(a-b)^2}{4\delta};$$

$$T_{11} = \frac{I_{11}}{2\Delta}(\delta_{11}\dot{e}_1 + \delta_{12}\dot{e}_2 + \delta_{13}\dot{e}_3);\ T_{22} = \frac{I_{12}}{2\Delta}(\delta_{21}\dot{e}_1 + \delta_{22}\dot{e}_2 + \delta_{23}\dot{e}_3);$$

$$T_{33} = \frac{I_{13}}{2\Delta}(\delta_{31}\dot{e}_1 + \delta_{32}\dot{e}_2 + \delta_{33}\dot{e}_3).$$

Значения остальных ВСФ равны нулю.

Пусть $A_1 = A_2 = A_3 = 1$. Тогда $I_{11} = I_{12} = I_{13} = \frac{1}{\lambda} = \frac{2\sqrt{\delta}}{\sqrt{3}(a-b)}$;

$$T_{11} = T_{22} = T_{33} = \frac{a-b}{\sqrt{3\delta}}.$$

При $\delta=0$ имеем $T_{11}=T_{22}=T_{33}=\infty$.

Пусть $\dot{æ}_{11} = \dot{æ}_{22} = \dot{æ}_{33} = 1$, скорости остальных обобщенных перемещений равны нулю. В этом случае получаем, согласно (21), значения $M_{11} = M_{22} = M_{33} = 0$. Значения остальных ВСФ также равны нулю. Анализ напряженного состояния показывает, что эти результаты не противоречат уравнениям (17) – (21).

Заключение. Уравнения (11) – (15) и их варианты для частных случаев, приведенные здесь, могут занять центральное место в теории предельного равновесия массивных тел. Выше, для определенности, изложение велось применительно к прямоугольным призмам и тетраэдрам. Но приведенные здесь результаты могут быть использованы для вычисления предельных комбинаций ВСФ на любых плоских сечениях массивного тела, имеющих произвольные формы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Малмейстер А.К.* Геометрия теорий прочности // Механика полимеров. - 1966. - №4. – С. 519-534.
2. *Мейз Д.* Теория и задачи механики сплошных сред. – М.: Мир, 1974. – 319 с.
3. *Качанов Л.М.* Основы теории пластичности. – М.: Наука, 1969. – 420 с.
4. *Терегулов И.Г.* Сопротивление материалов и основы теории упругости и пластичности. – М.: Высшая школа, 1984. – 472 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Ф. Д. Байрамовым.
Поступила в редакцию 24.04.09 г.

УДК 517.958

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРЕШИМОСТИ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ОДНОГО КВАЗИЛИНЕЙНОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ВТОРОГО ПОРЯДКА В ЧАСТНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ

И.Р. Мавлеев

Камская государственная инженерно-экономическая академия

Работа посвящена изучению разрешимости краевой задачи для нелинейного дифференциального уравнения второго порядка в частных производных. Разрешимость задачи исследуется в обобщенной постановке. Для этой цели используется топологический метод, состоящий в сведении исходной задачи к решению некоторого операторного уравнения в гильбертовом пространстве с последующим вычислением вращения соответствующего векторного поля. Показывается, что задача в шаре достаточно большого радиуса имеет, по крайней мере, одно обобщенное решение.

1. Постановка задачи. Функциональные пространства. Введение понятия обобщенного решения задачи.

В плоской области Ω с границей Г рассматривается квазилинейное дифференциальное уравнение второго порядка в частных производных

(1) $$Lu \equiv \sum_{i,j=0}^{1} \frac{\partial}{\partial x^{1-i}\partial y^{i}}\left(a_{i+1\,j+1}\frac{\partial u}{\partial x^{1-j}\partial y^{j}}\right) + au_x + bu_y + cu + f(u) = 0$$

относительно неизвестной функции $u = u(x, y)$ с нелинейностью $f(u)$, удовлетворяющей условиям

(2) $$\iint_{\Omega} f(u)u\,dxdy \ge c_0 \iint_{\Omega} u^{2n}dxdy - c_1 \iint_{\Omega} |u|^{n+1}dxdy$$

(3) $$\left|\iint_{\Omega}\left[f(u_1) - f(u_2)\right]v\,dxdy\right| \le \|u_1 - u_2\|^{k}_{L_p(\Omega)}\|v\|_{L_p(\Omega)}, \forall u_i (i = 1,2) \in W_2^{(1)}, \forall v \in W_2^{(1)}$$

где $a_{ij}(x, y), a(x, y), b(x, y), c(x, y)$ – заданные функции; $k \ge 2$ – произвольное натуральное число, c_k – положительные постоянные. В дальнейшем везде будем предполагать, что $a_{ij} = a_{ji}$ и квадратичная форма $\sum_{i,j} a_{ij}x_i x_j$ положительно определена в Ω.

Требуется найти решение $u(x, y)$ уравнения (1), удовлетворяющее граничному условию:

(4) $$u\big|_{\Gamma} = 0.$$

Краевую задачу (1),(4) будем изучать в обобщенной постановке. С этой целью введем функциональные пространства. Пусть $D(\overline{\Omega})$ – множество функций $u \in C^1(\overline{\Omega})$, удовлетворяющих граничным условиям (4). Очевидно, $D(\overline{\Omega})$ суть линейное пространство. Каждой паре элементов $u_j \in D(\overline{\Omega})$ (j = 1,2) поставим в соответствие число

(5) $$(u_1, u_2)_H = \iint_{\Omega}\left(\frac{\partial u_1}{\partial x}\frac{\partial u_2}{\partial x} + \frac{\partial u_1}{\partial y}\frac{\partial u_2}{\partial x} + \frac{\partial u_1}{\partial x}\frac{\partial u_2}{\partial y} + \frac{\partial u_1}{\partial y}\frac{\partial u_2}{\partial y}\right)dxdy.$$

Формула (5) удовлетворяет всем условиям скалярного произведения. Действительно, пусть $(u, u)_H = 0$; тогда имеем в Ω: $u_x, u_y = 0$. Если учесть граничное условие в (4), то получим $u \equiv 0$ в Ω. Выполнение остальных условий скалярного произведения очевидно.

Скалярному произведению (5) соответствует норма

(6) $$\|u\|_H^2 = \iint_{\Omega}\left(a_{11}\frac{\partial u}{\partial x}\frac{\partial u}{\partial x} + a_{12}\frac{\partial u}{\partial x}\frac{\partial u}{\partial y} + a_{21}\frac{\partial u}{\partial y}\frac{\partial u}{\partial x} + a_{22}\frac{\partial u}{\partial y}\frac{\partial u}{\partial y}\right)dxdy.$$

Замыкание $D(\overline{\Omega})$ в норме (6) обозначим через $H(\Omega)$.

Справедлива

Лемма 1. Пусть $u \in H(\Omega)$ и Ω – соболевская область с кусочно-гладкой границей Г. Тогда имеет место

$$b_0 \|u\|^2_{W_2^{(1)}} \le \|u\|^2_H \le b_1 \|u\|^2_{W_2^{(1)}},$$

где $W_2^{(1)}(\Omega)$ – пространство Соболева, b_0, b_1 – известные постоянные, не зависящие от u.

Из леммы 1 следует, что $H(\Omega)$ суть гильбертово пространство.

Определение. Обобщенным решением краевой задачи (1), (4) назовем функцию $u(x,y) \in H(\Omega)$, удовлетворяющую интегральному тождеству

(7) $$\iint_\Omega \sum_{i,j=0}^{1} a_{i+1\,j+1} \frac{\partial u}{\partial x^{1-j}\partial y^j} \frac{\partial v}{\partial x^{1-i}\partial y^i} + u(av)_x + u(bv)_y - cuv - f(u)v = 0$$

для любой функции $v \in H(\Omega)$.

Тождество (7) получено формально из тождества $\iint_\Omega (Lu - f)v dxdy = 0$ с помощью интегрирования по частям.

Соотношению (7) с учетом формулы (5) для скалярного произведения можно придать вид

(8) $$(u,v)_H = \iint_\Omega \{-u(av)_x - u(bv)_y + cuv + f(u)v\} dxdy.$$

2. Сведение задачи к операторному уравнению.

Будем предполагать выполненными следующие условия:

1) функции a, b имеют частные производные первого порядка, ограниченные в $\overline{\Omega}$;

2) функция c – ограничена в $\overline{\Omega}$.

Имеет место следующая

Лемма 2. Пусть выполнены условия 1)-2). Тогда правая часть (8) представляет собой линейный ограниченный функционал в $H(\Omega)$ относительно $v \in H(\Omega)$ при фиксированном $u \in H(\Omega)$.

Доказательство. Прежде всего заметим, что в силу теорем вложения для соболевских пространств $u \in L_p(\Omega), \forall p > 1$. Тогда из условия (3) следует, что $\iint_\Omega f(u)v dxdy$ есть линейный ограниченный функционал в $H(\Omega)$ относительно v.

Далее,

$$\left| \iint_\Omega u(av)_x dxdy \right| \le \left[\|(a)_x\|_C \|v\|_{L_2} + \|a\|_C \|v_x\|_{L_2} \right] \|u\|_{L_2} \le c[\|(a)_x\|_C + \|a\|_C] \|u\|_{L_2} \|v\|_H .$$

Оценивая остальные слагаемые в (8) аналогичным образом, приходим к справедливости леммы 2.

В силу леммы 2 по теореме Рисса существует элемент $G(u) \in H(\Omega)$ такой, что правую часть (8) можно представить в виде скалярного произведения $(G(u), v)_H$. Следовательно, в силу произвольности v получаем

(9) $$u - G(u) = 0,$$

которое представляет собой нелинейное операторное уравнение в $H(\Omega)$ относительно u.

Таким образом, нахождение обобщенного решения задачи (1),(4) свелось к нахождению решения эквивалентного уравнения (9).

Изучим свойства нелинейного оператора $G(u)$.

Имеет место

Лемма 3. Оператор $G(u)$ вполне непрерывен в $H(\Omega)$.

Доказательство. Пусть u_n (n=1,2,…), $u_0 \in H(\Omega)$ и $u_n \to u_0$ слабо в $H(\Omega)$. Применяя неравенство Гёльдера к интегралам в (8), принимая при этом во внимание лемму 1, теорему

вложения для соболевских пространств, ограниченность слабо сходящихся последовательностей и неравенство (3) для f будем иметь:

$$\left|\left(G(u_n)-G(u_0),v\right)_H\right| \le c\left[\|u_n-u_0\|_{L_2}\right]\|v\|_H .$$

На основании теорем вложения для пространств Соболева $\|u_n-u_0\|_{L_p} \to 0,\ n\to\infty,\ \forall p>1$. Тогда $\left|(G(u_n)-G(u_0),v)_H\right| \to 0, n\to\infty$, следовательно, $\|G(u_n)-G(u_0)\|_H \to 0, n\to\infty$, т.е. оператор G(u) усиленно непрерывен, а значит, вполне непрерывен в $H(\Omega)$. Лемма 3 доказана.

3. Исследование разрешимости операторного уравнения (7).

Введем в рассмотрение функционал $\Phi(u;t)=\left(u-tG(u),u\right)_H$, определенный на $H(\Omega)\times[0,1]$. С учетом (8) функционалу $\Phi(u;t)$ можно придать вид:

(10) $$\Phi(u;t)=\|u\|_H^2+tJ(u)-t\Phi_1(u),$$

где $J(u)=\iint\limits_{\Omega} f(u)udxdy$,

(11) $$\Phi_1(u)=\iint\limits_{\Omega}\{-u(au)_x-u(bu)_y+cu^2\}dxdy.$$

Из (2) с помощью неравенства Коши с «ε» получим

(12) $$\iint\limits_{\Omega} f(u)udxdy \ge c_0\iint\limits_{\Omega} u^{2n}dxdy-c_1/(2\varepsilon)\iint\limits_{\Omega}|u|^2dxdy-\varepsilon c_1/2\iint\limits_{\Omega}|u|^{2n}dxdy.$$

Пусть $S(R,0)=\left\{u\in H(\Omega)\middle|\|u\|_H=R\right\}$ – сфера пространства $H(\Omega)$. Функционал $\Phi(u;t)$ оценим снизу на $S(R,0)$. С этой целью $S(R,0)$ разобьем на две части: $S(R,0)=S'(R,0)\cup S''(R,0)$, где $S'(R,0)$ множество элементов $u\in S(R,0)$, удовлетворяющих неравенству:

(13) $$I(u)\equiv\|c\|_C\|u\|_{L_2}^2+\|(au)_x\|_{L_2}\|u\|_{L_2}+\|(bu)_y\|_{L_2}\|u\|_{L_2}+c_1/2\varepsilon\|u\|_{L_2}^2>R^2/2.$$

На $S''(R,0)$, следовательно, будет выполняться

(14) $$I(u)\le R^2/2.$$

Если одно из множеств $S'(R,0), S''(R,0)$ окажется пустым, это лишь упростит наши дальнейшие рассуждения.

Пусть $\overline{S'(R,0)}$ есть слабое замыкание $S'(R,0)$. Имеет место

Лемма 4. Множество $\overline{S'(R,0)}$ не содержит нуля.

Доказательство. Очевидно, $S'(R,0)$ не содержит нуля. Пусть $u_n(n=1,2,...)\in S'(R,0)$ и $u_n\to 0$ слабо в $H(\Omega)$. Из теорем вложения вытекает, что $\|u_{nx}\|_{L_2},\|u_{ny}\|_{L_2},\|u_n\|_{L_2}\to 0, n\to\infty$. Теперь, если учесть ограниченность слабо сходящейся последовательности, то будем иметь $I(u_n)\to 0, n\to\infty$, т.е. начиная с некоторого номера n неравенство (13) становится невозможным. Полученное противоречие доказывает лемму 4.

Рассмотрим функционал $J_1(u)=(c_0-c_1\varepsilon/2)\iint\limits_{\Omega} w^{2n}dxdy$. Выберем ε так, чтобы $c_2=(c_0-c_1\varepsilon/2)$ было неотрицательным числом.

Лемма 5. Функционал $J_1(u)$ слабо непрерывен в $H(\Omega)$.

Доказательство. Пусть $u_k(k=1,2,...)$, $u_0\in H(\Omega)$ и $u_k\to u_0$ (слабо) в $H(\Omega)$. С учетом ограниченности слабо сходящихся последовательностей имеем

$$\left|J_1(u_k)-J_1(u_0)\right|\le c_2\iint\limits_{\Omega}\left|u_k^{2n}-u_0^{2n}\right|dxdy\le c(\|u_k-u_0\|_{L_2}),$$

откуда, принимая во внимание теорему вложения, получаем $J_1(u_k) \to J_1(u_0),\ k \to \infty$, т.е. $J_1(u)$ слабо непрерывен.

Лемма 6. На $S'(R,0)$ справедлива оценка $J_1(u) \geq cR^{2n}, c > 0$.

Доказательство. Пусть последовательность $u_n \in S'(R,0)$ такая, что $J_1(u_n) \to 0,\ n \to \infty$. Пусть $u_n \to u_0$ в $H(\Omega),\ u_0 \in \overline{S'(R,0)}$. В силу слабой непрерывности функционала $J_1(u)$ имеем $J_1(u_0) = 0$, откуда $u_0 = 0$ в Ω, что противоречит лемме 4. Лемма 6 доказана.

Перейдем к оценке $\Phi(u;t)$ на $S(R,0)$. Используя соотношение (10), имеем

(15) $$\Phi(u,t) \geq R^2 + tJ(u) - t|\Phi_1(u)|.$$

Принимая во внимание выражение для $\Phi_1(u)$ в (11), получаем

(16) $$|\Phi_1(u)| \leq I(u),$$

где функционал $I(u)$ определен в (13). Так как $I(u) \leq c\|u\|_H^2$, то из (16) получим

(17) $$|\Phi_1(u)| \leq c\|u\|_H^2.$$

Пусть $u \in S'(R,0)$. Тогда используя лемму 6, неравенство (12), (17), из (15) будем иметь: $\Phi(u;t) \geq R^2 + ct\left[R^{2n} - cR^2\right]$, откуда при достаточно больших R

(18) $$\Phi(u;t) \geq R^2 \forall u \in S'(R,0), \forall t \in [0,1].$$

Пусть $u \in S''(R,0)$.

Тогда из (15), с учетом (12) имеем:

(19) $$\Phi(u;t) \geq R^2/2 + \left[R^2/2 - I(u)\right].$$

Теперь, если учесть неравенство (14), то при достаточно больших R из (19) получим

(20) $$\Phi(u;t) \geq R^2/4\ \forall u \in S''(R,0), \forall t \in [0,1].$$

Оценки (18), (20) означают, что вполне непрерывное векторное поле $u - G(u)$ гомотопно полю u на сфере $S(R,0)$ достаточно большого радиуса R, следовательно, его вращение на этой сфере равно +1. Тогда уравнение (9) внутри $S(R,0)$ имеет, по-крайней мере, одно обобщённое решение [1].

Таким образом, доказана основная теорема.

Теорема. Пусть выполнены условия 1)-2), п.2 и условия леммы 6. Тогда задача (1), (4) внутри сферы $S(R,0)$ достаточно большого радиуса R пространства $H(\Omega)$ имеет хотя бы одно обобщенное решение.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Красносельский М.А.* Топологические методы в теории нелинейных интегральных уравнений. – М.: Гостехиздат, 1956. – 392 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии С.Н. Тимергалиевым.
Поступила в редакцию 24.02.09 г.

УДК 621.65.01:532.5

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ STAR-CCM+ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

С.И. Харчук, *к.ф.-м.н.;* А.В. Болдырев, С.С. Харчук, С.В. Болдырев
Камская государственная инженерно-экономическая академия

Рассмотрены возможности использования пакета STAR-CCM+ для построения характеристик центробежных насосов. Проведено сравнение результатов моделирования в двухмерной и трехмерной постановке с расчетами, выполненными на основе теории подобия.

Введение. Высокая эффективность и надежность турбомашин являются основными требованиями при эксплуатации энергетического оборудования. В настоящее время мировая промышленность производит значительную номенклатуру лопастных гидромашин, но, тем не менее, продолжается постоянное совершенствование их конструкций. Для достижения этих целей широко применяются достижения теории подобия и численного моделирования [1, 2], вместе с тем основным критерием успешности конструкции остается физический эксперимент [3, 4, 5].

Современный уровень исследований характеризуется широким внедрением в научных исследованиях, в конструкторских разработках и в учебном процессе общепризнанных инструментов инженерного анализа для изучения процессов тепломассопереноса и гидродинамики, таких как STAR-CD, Fluent, Ansys CFX, SINF, VP2/3 и др.

Все больше предприятий и научно-исследовательских институтов используют вышеупомянутые пакеты программ. Однако практика показывает, что их применение эффективно при наличии высококвалифицированных специалистов. Вполне адекватной представляется подготовка таких специалистов в вузах, обладающих таким программным обеспечением.

Камская государственная инженерно-экономическая академия имеет академическую лицензию на гидродинамический пакет STAR-CD и STAR-CCM+ для выполнения научных исследований и для обучения студентов. При этом, учитывая специфику учебного процесса и техническую оснащенность большинства вузов, приходится акцентировать внимание на задачах, имеющих практическое применение, но не требующих значительных вычислительных ресурсов. Для оценки эффективности и адекватности применения STAR-CCM+ на вычислительных машинах невысокой производительности проведено тестовое численное моделирование течения вязкой несжимаемой жидкости в центробежном насосе для двухмерной и трехмерной постановок.

Известно, что в методах теории подобия широко используются экспериментальные данные. С усложнением конструкций гидромашин приходится вводить все большее количество дополнительных поправочных коэффициентов в расчетные выражения. При этом встречаются значительные различия цифровых значений у разных авторов [6]. Поэтому рассматривается центробежный насос простой конструкции с лопатками, имеющими постоянную толщину и спрофилированными в виде дуги окружности в одной плоскости. Вход жидкости в насос предполагается радиальным.

1. Методика расчета на основе теории подобия. По предложенной в [3, 5, 6] методике сначала рассчитывается теоретический напор насоса с радиальным входом при допущении бесконечного числа тонких лопаток и без учета потерь

$$H_{t\infty} = \frac{c_{u2\infty} \cdot U_2}{g}, \qquad (1)$$

где $c_{u2\infty}$ – окружная составляющая абсолютной скорости жидкости на выходе колеса при допущении бесконечного числа тонких лопаток; U_2 – окружная скорость жидкости на выходе колеса; g – ускорение свободного падения.

При указанном допущении угол наклона лопатки на выходе колеса $\beta_{л2}$ равен углу выхода потока β_2 (угол между отрицательным направлением окружной скорости U_2 и относительной скоростью жидкости на выходе колеса W_2). Тогда

(2) $$c_{u2\infty} = U_2 - c_{m2} \cdot ctg(\beta_{л2}),$$

где c_{m2} – меридиональная скорость на выходе колеса.

(3) $$c_{m2} = \frac{Q_H}{S_{m2}},$$

где Q_H – подача насоса; S_{m2} – площадь нормального сечения меридионального потока на выходе из колеса.

Характеристика насоса $H_{t\infty} = f(Q)$ при допущении бесконечного числа тонких лопаток и без учета потерь будет линейной. Для удобства дальнейшего анализа эта и другие характеристики представлены в виде зависимости от среднерасходной скорости на входе в рабочее колесо $H_{t\infty} = f(\upsilon_1)$ (рис.1).

Затем определяется коэффициент конечного числа лопастей μ_2 (с помощью формулы Стодолы-Майзеля [5]) и теоретический напор насоса без учета потерь

(4) $$H_t = \mu_2 \cdot H_{t\infty}.$$

Характеристика насоса без учета потерь $H_t = f(\upsilon_1)$ показана на рис.1. После этого находятся потери напора $\Delta h_{ПОТ}$ по эмпирическим формулам: ударные потери $\Delta h_{УД}$ (вызванные большими углами атаки), потери на трение $\Delta h_{ТР}$ и местные потери Δh_M (на внезапное расширение и сужение потока при входе и выходе в колесо, на поворот потока в межлопаточном канале и др.)

(5) $$\Delta h_{ПОТ} = \Delta h_{УД} + \Delta h_{ТР} + \Delta h_M.$$

Отсюда вычисляется теоретический напор насоса $H_{ТЕОР}$ и строится теоретическая напорная характеристика $H_{ТЕОР} = f(\upsilon_1)$ (рис.1)

(6) $$H_{ТЕОР} = H_t - \Delta h_{ПОТ}.$$

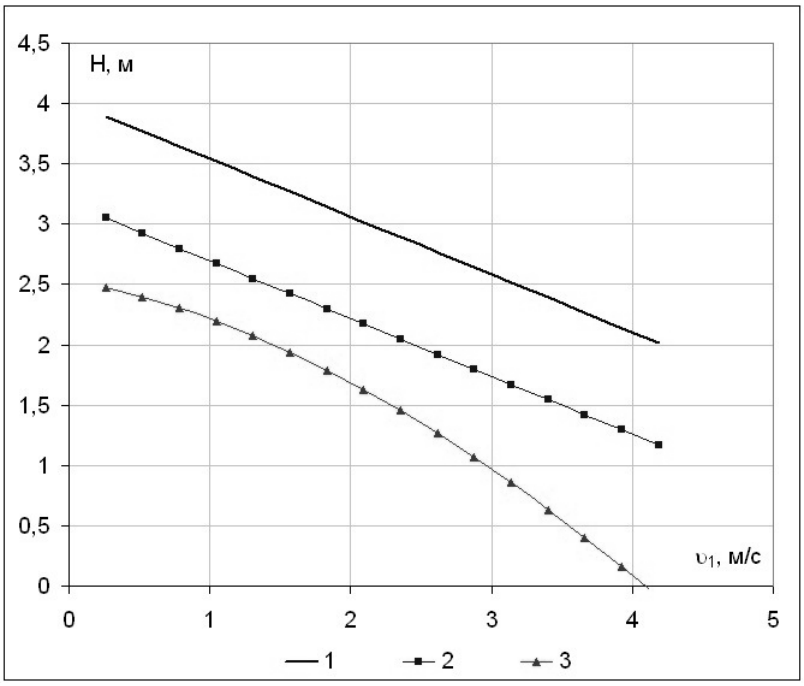


Рисунок 1 – Напорные характеристики центробежного насоса, полученные на основе теории подобия (1 – $H_{t\infty}(\upsilon_1)$, 2 – $H_t(\upsilon_1)$, 3 – $H_{ТЕОР}(\upsilon_1)$)

2. Постановка задачи. Геометрия расчетной области, включающая в себя центробежное колесо закрытого типа с лопатками, загнутыми назад, и спиральную камеру насоса, показана на рисунке 2. Основные характеристики рабочего колеса приведены в таблице 1.

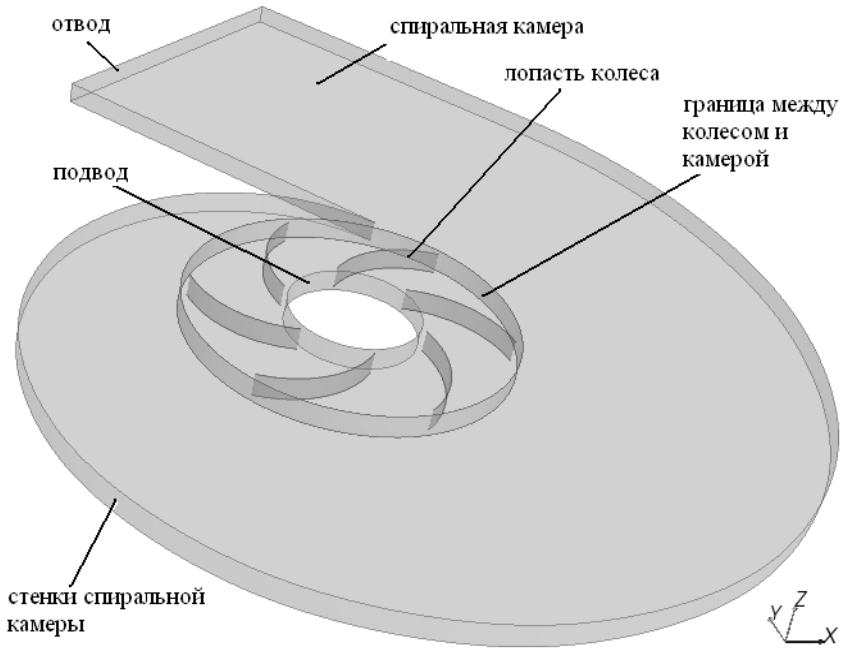


Рисунок 2 – Геометрия расчетной области

Таблица 1 – Основные размеры центробежного колеса

Число лопаток z	7
Радиус колеса на выходе r_2, мм	60
Ширина лопатки на выходе b_2, мм	8
Угол наклона лопатки на выходе β_2, град	28
Толщина лопатки на выходе δ_2, мм	0,2
Радиус колеса на входе r_1, мм	24
Ширина лопатки на входе b_1, мм	8
Угол наклона лопатки на входе β_1, град	50
Толщина лопатки на входе δ_1, мм	0,2

Численное моделирование осуществлялось разделенным решателем (Segregated Flow) в программном пакете STAR-CCM+ 3.04 (лицензия CD-adapco) для установившегося турбулентного движения вязкой, несжимаемой жидкости в двухмерной и трехмерной постановках [7, 8, 9].

Для описания процессов турбулентного переноса применялась система дифференциальных уравнений Навье-Стокса и уравнение неразрывности, осредненные по Рейнольдсу (RANS), которые удобно записать в тензорной форме [10]

$$(7)\qquad \begin{cases} \rho\cdot\dfrac{\partial\overline{\upsilon_i}}{\partial t}+\rho\cdot\overline{\upsilon_j}\cdot\dfrac{\partial\overline{\upsilon_i}}{\partial x_j}=-\dfrac{\partial\overline{p}}{\partial x_i}+\mu\cdot\nabla^2\overline{\upsilon_i}+\dfrac{\partial}{\partial x_j}\left(T_t\right) \\ \dfrac{\partial\overline{\upsilon_j}}{\partial x_j}=0 \end{cases},$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м^3; $\overline{\upsilon_i}$ – i-я компонента вектора осредненной скорости жидкости, м/с; t – время, с; x_j – координата, м; $\overline{p}$ – осредненное давление, Па; μ – динамическая вязкость жидкости, Па·с.

Согласно гипотезе Буссинеска о турбулентной вязкости, компоненты тензора турбулентных напряжений $T_{tij}=-\rho\cdot\overline{\upsilon_i}\overline{\upsilon_j}$ определяются [11]

$$(8)\qquad T_{tij}=\mu_t\cdot\left(\frac{\partial\overline{\upsilon_j}}{\partial x_i}+\frac{\partial\overline{\upsilon_i}}{\partial x_j}\right)-\frac{2}{3}\cdot\rho\cdot k\cdot\delta_{ij},$$

где δ_{ij} – единичный тензор; μ_t – турбулентная вязкость, Па·с; k – кинетическая турбулентная энергия пульсационного движения, м^2/с^2.

В качестве модели турбулентности была выбрана стандартная двухпараметрическая модель k-ε с двухслойным подходом Роди для расчета пограничного слоя (Standard Two-Layer k-ε). Входящие в нее уравнения переноса кинетической турбулентной энергии k и скорости ее диссипации ε соответственно представлены в STAR-CCM+ в виде

$$(9)\qquad \begin{aligned} &\frac{d}{dt}\int_V\rho\cdot k\cdot dV+\int_A\rho\cdot k\cdot\left(\mathbf{v}-\mathbf{v}_g\right)\cdot d\mathbf{a}= \\ &=\int_A\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\cdot\nabla k\cdot d\mathbf{a}+\int_V\left(G_k+G_b-\rho\cdot\left(\varepsilon+\mathrm{Y}_M\right)\right)dV \\ &\frac{d}{dt}\int_V\rho\cdot\varepsilon\cdot dV+\int_A\rho\cdot\varepsilon\cdot\left(\mathbf{v}-\mathbf{v}_g\right)\cdot d\mathbf{a}= \\ &=\int_A\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\nabla\varepsilon\cdot d\mathbf{a}+\int_V\frac{1}{T}\left[C_{\varepsilon1}\left(G_k+G_{nl}+C_{\varepsilon3}G_b\right)-C_{\varepsilon2}\rho\varepsilon+\rho\mathrm{Y}_y\right]dV \end{aligned}$$

Более подробные сведения представлены, например, в руководстве для пользователя STAR-CCM+ [7] и учебном пособии Белова И.А., Исаева С.А. [11].

Для учета сложного движения жидкости, включающего относительное движение внутри проточных каналов и переносное вращательное движение вместе с рабочим колесом, для расчетной подобласти рабочего колеса была применена модель движущейся системы координат (Moving Reference Frame [7]), которая позволяет учитывать действие центробежных и кориолисовых сил при постоянной угловой частоте вращения.

В модели применялись следующие граничные условия [7]:

- на входе в рабочее колесо условие «Velocity-Inlet»: среднерасходная скорость абсолютного движения жидкости с направлением нормально границе, интенсивность турбулентности 10% (как для установившегося турбулентного течения жидкости в канале) и отношение турбулентной вязкости к ламинарной (Turbulent viscosity ratio = 10);

- на выходе из спиральной камеры условие «Pressure-Outlet»: статическое избыточное давление, которое в данной задаче считалось постоянным;

- на границах между вращающимся рабочим колесом и неподвижной спиральной камерой для взаимосвязи двух расчетных областей с разными системами координат были заданы интерфейсы типа In-place.

Режимные параметры моделирования перечислены в таблице 2.

Так как при расчете расходов в двухмерной задаче (плоскость XY) протяженность любого объекта исследования в направлении оси OZ равна единице, площадь подвода увеличилась примерно в 125 раз по сравнению с реальной. Соответственно в 125 раз возросли значения подач Q моделируемого насоса для варианта с двухмерной постановкой. Поэтому энергетические характеристики насоса строились в зависимости от среднерасходной скорости абсолютного движения жидкости на входе в рабочее колесо υ_1.

Таблица 2 – Режимные параметры моделирования

Частота вращения рабочего колеса *n*, об/мин	1000
Вид жидкости	вода
Плотность жидкости ρ, кг/м^3	998,2
Динамическая вязкость жидкости μ, Па·с	0,000889
Скорость жидкости на входе в колесо υ_1, м/с	В зависимости от режима работы насоса (в диапазоне от 0 до 3,5 м/с)
Статическое избыточное давление на выходе спиральной камеры p_2, кПа	200

Расчет характеристик осуществлялся одинаково для двухмерной и трехмерной постановки задачи по следующему алгоритму:

1) Для очередной точки графической зависимости задавалась скорость жидкости на входе в колесо υ_1;

2) Осуществлялась инициализация решения (начальное приближение для всех ячеек расчетной сетки);

3) Проводился численный эксперимент, и по его итогам с использованием ниже приведенных зависимостей определялись напор H и гидравлический КПД насоса η, соответствующие заданной входной скорости.

$$\begin{cases} H = \dfrac{\left(p_2^* - p_1^*\right)}{\rho \cdot g} \\ \eta = \dfrac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{M \cdot \omega} \end{cases}, \qquad (10)$$

где p_1^* – вычисленное полное давление на входе в колесо, Па; p_2^* – вычисленное полное давление на выходе из камеры, Па; M – вычисленный крутящий момент на колесе, Н·м; $\omega = 2 \cdot \pi \cdot n$ – угловая скорость вращения рабочего колеса, рад/с.

4) Остальные точки характеристик насоса определялись повторением пунктов 1-3 алгоритма для других значений входной скорости υ_1 (всего 7 точек отдельно для двухмерной и трехмерной постановок).

3. Вычислительные аспекты. При подготовке к численным экспериментам расчетные подобласти рабочего колеса и спиральной камеры была покрыты неравномерной неструктурированной сеткой из многоугольных ячеек (polyhedral mesh).

Для достижения адекватных значений касательного напряжения на стенке проводилось измельчение сетки вблизи стенок лопаток и спиральной камеры (слои призматических ячеек со сгущением).

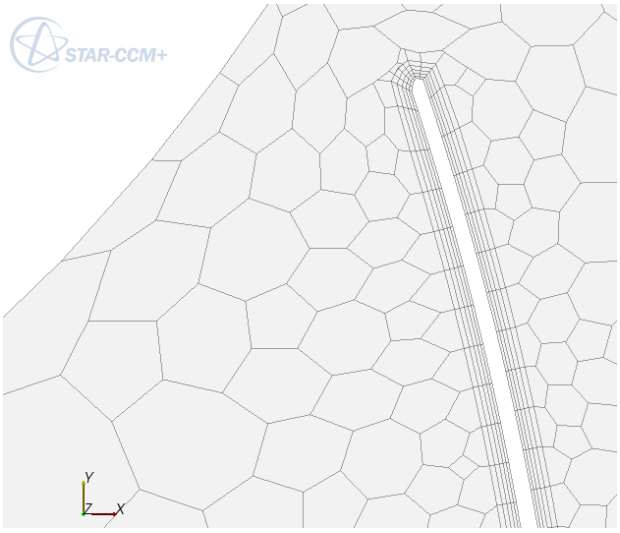


Рисунок 3 – Расчетная сетка вблизи поверхности лопатки

Полученная расчетная сетка показана на рисунке 3, а ее основные размеры и вычисленные в процессе численного эксперимента значения универсального безразмерного параметра y^+ приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры расчетных сеток и значения y^+ для двухмерной (2D) и трехмерной (3D) постановок задачи

Параметр	2D	3D
Число ячеек	17555	186791
Средний размер базовых ячеек, мм	4,8	4,8
Средний размер ячеек на стенках, мм	0,48	0,48
Коэффициент сгущения призм к стенке	1,2	1,2
Число призматических слоев в поперечном к стенке направлении	5	5
Размер пристеночных призматических ячеек в поперечном к стенке направлении, мм	0,00024	0,00024
Минимальное значение y^+ при всех подачах насоса	0,2	0,1
Максимальное значение y^+ при всех подачах насоса	19	15

4. Результаты моделирования. Построенные по результатам численного моделирования в двухмерной и трехмерной постановке энергетические характеристики изображены на рисунках 4 и 5.

Применение двухмерной постановки задачи обеспечило достаточную качественную сходимость с результатами, достигнутыми трехмерным моделированием течения. В частности, на напорной характеристике насоса выявлен «западающий» участок при малых входных скоростях (область малых подач) (см. рис. 4). Это снижение напора из-за отрыва потока на входных кромках лопаток характерно для реальных конструкций насосов, однако традиционная методика проектирования колес насосов не отражает этого (нижняя кривая на рис. 1).

Также хорошо согласуются с данными теории лопастных насосов [3, 5, 12] векторные поля относительной скорости жидкости в межлопаточных каналах рабочего колеса:

- например, при нулевой подаче, что соответствует полностью закрытой задвижке на напорной магистрали, наблюдаются вихри в межлопаточных каналах (рис. 6), вызывающие затраты мощности приводящего двигателя на этом режиме, а также подогрев рабочей жид-

кости, что негативно сказывается на работе насосов, а в некоторых конструкциях может привести к аварии;

- на оптимальном режиме работы насоса – максимальное значение КПД (см. рис. 5) – обеспечиваются хорошие условия обтекания лопаток, поэтому, как видно на рисунке 7, практически исчезают отрывные зоны на их тыльных сторонах, что снижает ударные потери напора. В данной конструкции это достигается при средней скорости жидкости на входе в колесо, равной 2 м/с.

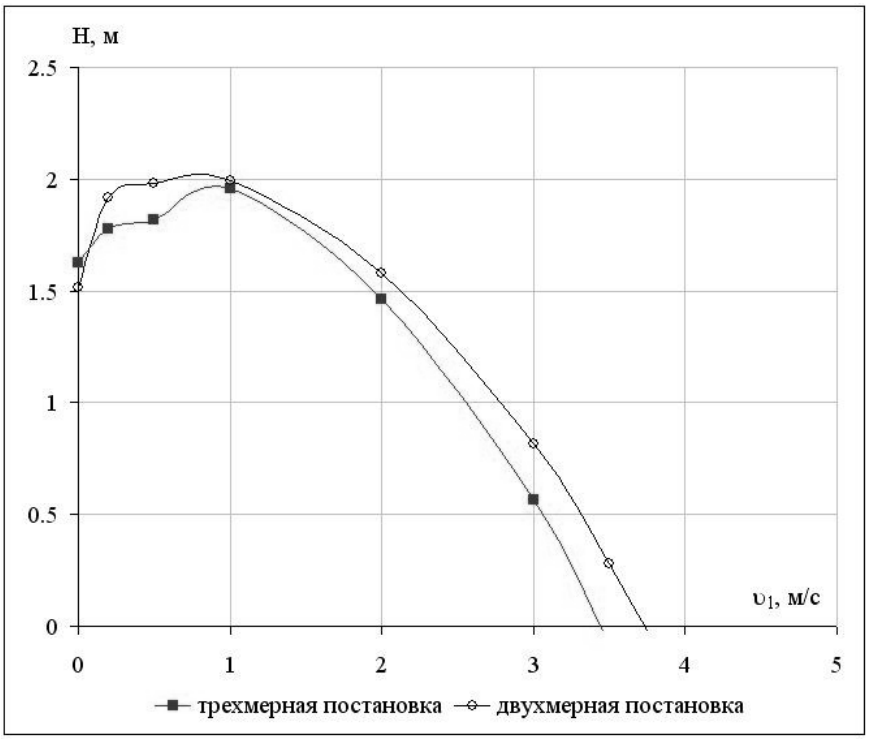


Рисунок 4 – Напорные характеристики центробежного насоса, полученные в ходе численных экспериментов (в трехмерной и двухмерной постановке)

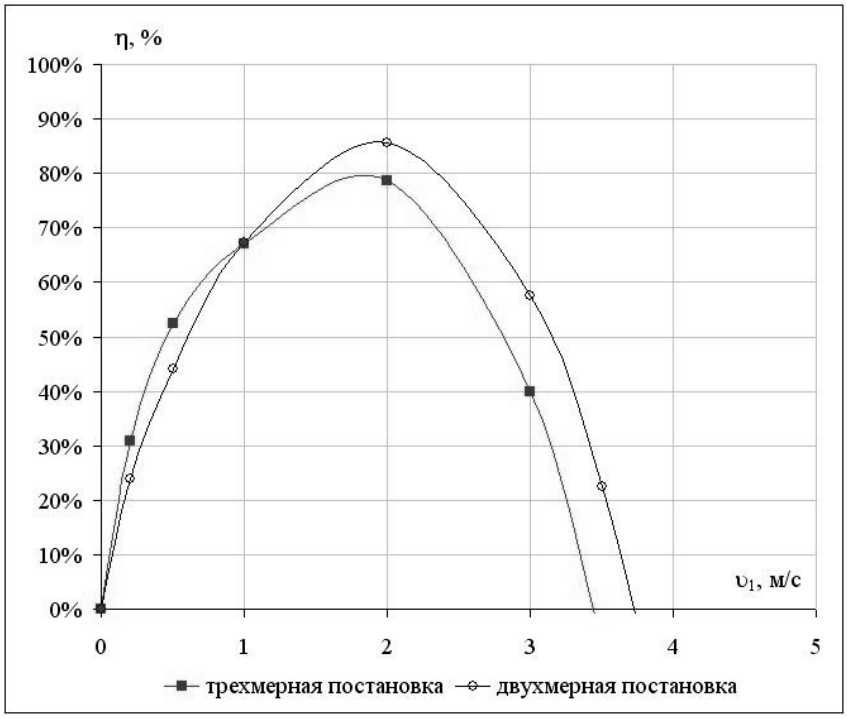


Рисунок 5 – Характеристики коэффициента полезного действия центробежного насоса, полученные в ходе численных экспериментов (2D и 3D постановки)

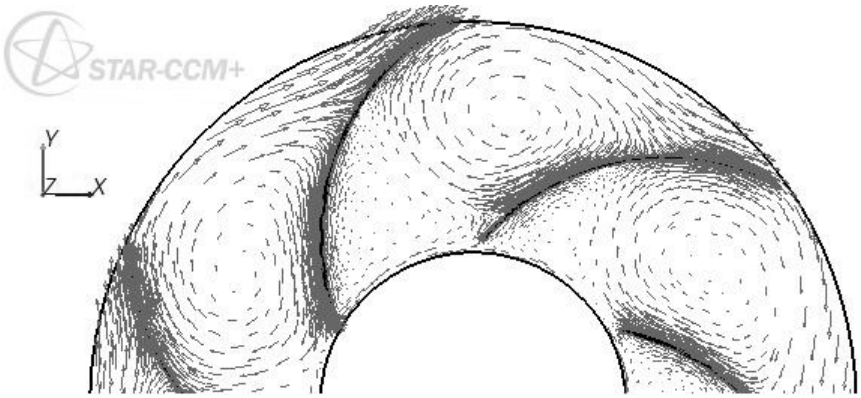


Рисунок 6 – Векторное поле относительной скорости в межлопаточных каналах колеса 2D-насоса (при средней скорости жидкости на входе в колесо υ_1=0 м/с)

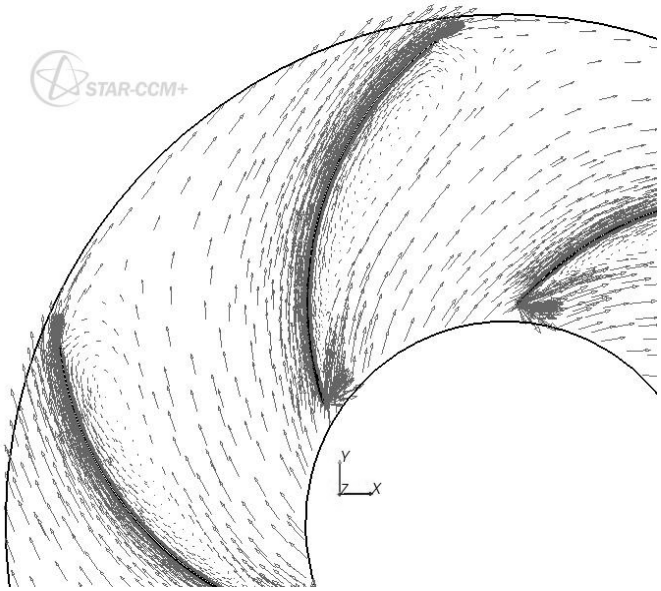


Рисунок 7 - Векторное поле относительной скорости в межлопаточных каналах колеса 2D-насоса (при средней скорости жидкости на входе в колесо υ_1=2 м/с)

Вместе с тем, численное моделирование работы насоса в двухмерной постановке приводит к завышению значений напора насоса по сравнению с величинами, полученными в трехмерной постановке: в точке экстремума характеристики около 2%, на остальных режимах в среднем от 7% до 44%. Однако значения напора, полученные в двухмерной постановке, ниже, чем рассчитанные на основании теории подобия (рис. 1). Отличие значений напора в 2D- и 3D-постановках от величин, полученных на основе теории подобия, сохраняется и в области малых подач.

Анализ энергетических характеристик в двухмерной и трехмерной постановках в зависимости от скорости жидкости на входе в колесо также показал превышение значений КПД в плоской задаче (для оптимального режима работы до 9%, а для других входных скоростей от 16% до 44%). Также можно отметить некоторое увеличение (до 14%) диапазона скоростей данных характеристик.

Возможными причинами этих отклонений являются:

1) нарушение геометрического и кинематического подобия при преобразовании трехмерной задачи в двухмерную;

2) невозможность учета в двухмерной постановке существенного пространственного характера турбулентных течений в проточных частях центробежных насосов (например, изображенная на рисунке 9 зона отрывного течения);

3) отсутствие в двухмерной постановке гидравлических потерь, вызванных трением на поверхностях, нормальных оси OZ, а также влияния трехмерных «вторичных» течений (рисунок 10) в поперечных сечениях межлопаточных каналов (плоскости ZX и ZY).

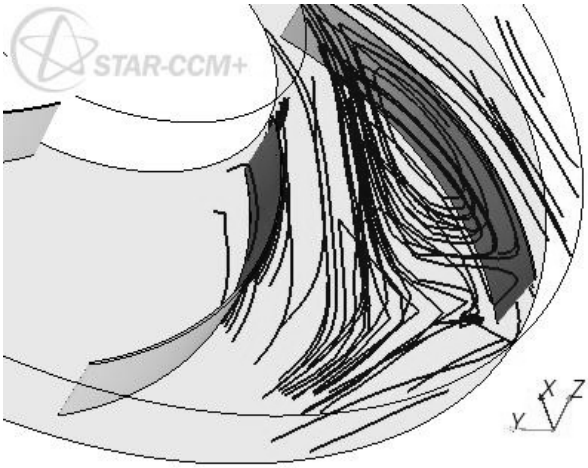


Рисунок 8 – Линии тока относительного движения жидкости в межлопаточном канале при средней скорости на входе в колесо υ_1=1 м/с

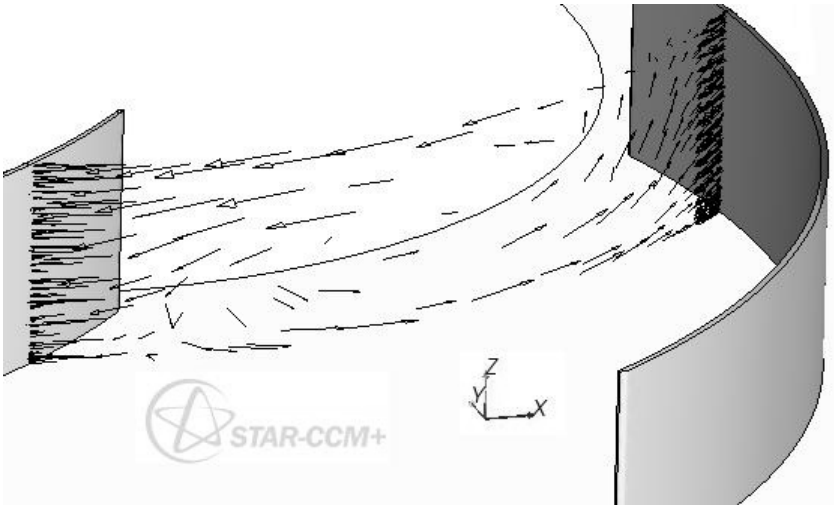


Рисунок 9 – Векторы скоростей «вторичного» течения жидкости в сечении межлопаточного канала цилиндрической поверхностью *r* = 32 мм (при средней скорости на входе в колесо υ_1=0,2 м/с)

Выводы.

1) характеристики насоса, полученные в двухмерной постановке, представляются более соответствующими действительности, чем рассчитанные на основании теории подобия, так как позволяют более полно учесть действие массовых сил, чем в одномерных расчетах;

2) моделирование работы представленного центробежного насоса в двумерной постановке позволяет получить хорошее качественное и удовлетворительное количественное соответствие его характеристик результатам моделирования в трехмерной постановке;

3) следует отметить, что основными факторами, влияющими на характеристики данного насоса, явились ударные потери напора, которые одинаково сильно сказываются на характеристиках в обоих постановках;

4) однако в двухмерной постановке невозможно учесть вторичные течения первого и второго рода, вызванные вращением и кривизной проточной части насоса и турбулентными пульсациями, согласно классификации [13];

5) следует также отметить трудности в достижении сходимости при малых подачах в двухмерной и трехмерной постановках;

6) таким образом, двухмерное моделирование работы центробежного насоса можно считать обоснованным для проведения предварительных и оценочных расчетов характеристик насоса, как в учебных целях, так и для инженерного анализа.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Галаев С.А.* Численное моделирование течения вязкого газа в решетках осевых турбомашин – методика и результаты применения современных программных средств. Автореферат диссер. к.т.н. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2006. – 18 с.

2. *Ершов С.В.* Математическое моделирование трехмерных вязких течений в турбомашинах – современный взгляд // http://www.ipmach.kharkov.ua/Journal/1998.htm

3. *Михайлов А.К., Малюшенко В.В.* Лопастные насосы. Теория, расчет и конструирование. – М.: Машиностроение, 1977. – 288 с.

4. *Поляков В.В., Скворцов Л.С.* Насосы и вентиляторы: Учеб. для вузов. – М.: Стройиздат, 1990. – 336 с.

5. *Стесин С.П., Яковенко Е.А.* Лопастные машины и гидродинамические передачи: Учеб. для студ. по спец. «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика». – М.: Машиностроение, 1990. – 240 с.

6. *Панаиотти С.С., Савельев А.И., Биленко П.Н.* Автоматизированное проектирование высокооборотного центробежного насоса: Учеб. пособие. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 48 с.

7. User guide. STAR-CCM+ Version 3.04.009. – CD-adapco, 2008.

8. *Патанкар С.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / Пер. с англ.; под ред. В.Д. Виленского. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 154 с.

9. *Станкова Е.Н., Затевахин М.А.* Многосеточные методы. Введение в стандартные методы. – СПб: Институт высокопроизводительных вычислений и информационных систем, 2003. – 47 с.

10. Турбулентность. Принципы и применения / Под ред. *У. Фроста, Т. Моулдена*; Пер. с англ. *В.В. Альтова, В.И. Пономарева, А.Д. Хонькина*; С предисловием *В.В. Струминского*. – М.: Мир, 1980. – 535 с.

11. *Белов И.А., Исаев С.А.* Моделирование турбулентных течений: Учебное пособие. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2001. – 109 с.

12. *Шендрик В.В.* Физическая модель рабочего процесса в проточных частях насосов с полуоткрытыми и открытыми рабочими колесами // Вісник СумДУ, Технічні науки. – 2007. – №1. – С. 54-63.

13. *Щукин В.К.* Теплообмен и гидродинамика внутренних потоков в полях массовых сил. – М.: Машиностроение, 1980. – 240 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии И.Х. Исрафиловым.
Поступила в редакцию 17.02.09 г.

УДК 532.5

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ПРИ ПЕРЕХОДЕ ОТ ЛАМИНАРНОГО К ТУРБУЛЕНТНОМУ РЕЖИМУ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТРУБЕ

С.И. Харчук, *к.ф.-м.н.;* А.В. Болдырев, Н.Н. Нургалиев, С.С. Харчук
Камская государственная инженерно-экономическая академия

На основе использования пакета STAR-CCM+ исследовано влияние параметров расчетной сетки и моделей турбулентности на локальные и интегральные характеристики потока при переходе от ламинарного режима к турбулентному режиму течения в цилиндрической трубе.

Современные технические установки должны удовлетворять следующим требованиям:
- высокая надежность и достаточный ресурс;
- экологическая безопасность;
- высокая эффективность;
- конкурентоспособность и т.п.

Известно, что значительные достижения математических и технических наук относятся к XVIII-XX векам. В настоящее время совершенствование технических устройств достигается в основном за счет новых материалов и новых технологий, которые могут быть получены на стыке наук или на не освоенных ранее переходных состояниях.

Одним из средств реализации отмеченных особенностей создания новых технологий и устройств служит инженерный анализ, основанный на достижениях современной науки. Необходимость применения компьютерных технологий инженерного анализа, которые обеспечивают моделирование и анализ рабочих характеристик и конструктивных параметров изделий на этапе их разработки и при модернизации технических устройств, на сегодня является общепризнанной.

Предметом исследования в данной работе является анализ локальных и интегральных характеристик потока, вызванных изменением режимов течений жидкости в технических устройствах. Например, переход от ламинарного режима к турбулентному и обратно, взаимодействие в потоке областей с разным характером течения жидкости, отрыв и присоединения пограничного слоя, пульсирующие потоки, кавитация.

Важнейшим аспектом в этом анализе становится численное моделирование гидродинамических процессов и теплообмена в технических устройствах, для которых характерны сложные виды течений при наличии массовых сил (центробежной, кориолисовой, тяжести). Эти особенности проявляются в теплообменниках, смесителях, коллекторах, змеевиках, отводах, тройниках и т.д.

В настоящее время известен ряд «тяжелых» коммерческих программных пакетов, таких как Fluent, STAR-CD, ANSYS CFX, позволяющих с высокой степенью надежности выполнять соответствующие расчеты в этой области. Но это не означает, что их использование гарантирует успешный результат. Прежде всего, требуется понимание физических процессов в каждом конкретном случае для выбора адекватной математической модели и подходящих граничных условий. Еще одна сложность – это определение размерности и типа сетки и ее элементов, включая степень сгущения у стенок, а также корректная настройка решателя (порядок и направление дискретизации, алгоритм решения) [1, 2].

Ниже представлен анализ влияния некоторых из этих факторов на степень приближения результатов численного эксперимента в программе STAR-CCM+ к результатам классических опытных данных. Рассмотрено течение в зоне перехода от ламинарного к турбулентному движению в цилиндрической трубе с числом Рейнольдса 4000.

Исследования проводились на расчетных гексагональных сетках различной размерности (x=1,5…4% и L=1…5% - радиальный и осевой размеры ячеек от радиуса трубы R соответственно) с различными параметрами пристеночной области (суммарная толщина сеточного пограничного слоя δ=1,25…2,5% от радиуса трубы, число слоев в радиальном направлении

N=20…30, коэффициент сгущения сетки *k*=1,2…1,3). Численные эксперименты осуществлялись в трехмерной постановке на сетках, размеры которых представлены в таблице 1.

Для оценки степени адекватности решения использовались опытные данные по распределению осевой скорости в поперечном сечении трубы и значения коэффициента гидравлического трения λ. Коэффициент трения определялся по формуле Блазиуса [3] и равнялся 0,0398. Профили скорости получены Никурадзе, Нуссельтом, Хагеном, Омбеком и др. [3].

Таблица 1 – Параметры расчетных сеток

№	*x* в %	*L* в %	заданное сгущение сетки у стенки	*k*	*N*	*δ* в %	общее число ячеек в расчетной области	λ, по star-ccm+	отклонение от эксперимента в %	max y^+
1	2	2	нет	-	-	-	79920	0.0415	4.42%	1.5
2	3	2					38296	0.0409	2.88%	
3	4	2					17521	0.0407	2.38%	
4	4	5					12192	0.0412	3.71%	
5	3	2	есть	1.2	20	1.25	39568	0.0404	1.71%	1
6	3	2	есть	1.2	30	1.25	56368	0.0405	1.73%	
7	3	2	есть	1.3	20	1.25	39568	0.0404	1.71%	
8	3	2	есть	1.2	20	2.5	36160	0.0409	2.91%	
9	1.5	1	есть	1.2	20	1.25	146488	0.0403	1.45%	

Поскольку численные эксперименты проводились для течения, переходного от ламинарного к турбулентному, то были выбраны низкорейнольдсовые модели турбулентности k-ε Realizable, k-ω SST, Спаларта-Аллмараса [4, 5], адаптированные к расчетам в ламинарном подслое. Сравнение распределения скоростей, полученных с помощью этих моделей, представлено на рис. 1 для расчетной сетки №8 (рис. 2) с параметрами: x=3%, L=2%, k=1.2, N=20, δ=2.5%, число расчетных ячеек 36160. По оси ординат отложено осредненное по времени безразмерное значение скорости в зависимости от безразмерного расстояния от стенки трубы.

Как видно из рисунка, все модели показали достаточную качественную сходимость с экспериментом, однако количественно лучшие результаты были достигнуты на основе модели Спаларта-Аллмараса. Поэтому данная модель турбулентности использовалась в дальнейшем для исследования влияния параметров расчетной сетки на точность численного эксперимента.

Результаты расчетов с использованием модели Спаларта-Аллмараса представлены в таблице, распределение безразмерных скоростей отображено на рис. 3. Как следует из графика, полученные профили скорости практически совпадают и обеспечивают качественное соответствие опытным данным в пристенном слое и хорошее количественное соответствие в ядре потока. Следует отметить меньшую наполненность расчетного профиля, чем в физическом эксперименте, что может быть особенностью переходного режима.

Однако представленное на рис. 4 распределение относительной турбулентной вязкости вполне адекватно отражает классические представления о турбулентном течении с наличием вязкого ламинарного подслоя. В вязком подслое (пристеночная область темного цвета) отношение турбулентной вязкости к молекулярной составляет $1\cdot10^{-7}$, а в ядре потока (центральная область темного цвета) это отношение составляет 11,8.

При этом интегральная характеристика течения – коэффициент гидравлического трения λ отклоняется от опытного значения от 1,45% до 4,42%.

Характерно, что без сгущения сетки (эксперимент №1-4, рис. 5) в пристенном слое даже трехкратное увеличение числа ячеек не повышает точности определения λ. На данном ри-

сунке некоторое сгущение сетки у стенки вызвано необходимостью совместить регулярные прямоугольные ячейки с криволинейными границами.

Применение сгущения сетки обеспечивает вычисление λ с достаточной для инженерных расчетов точностью. Расчет №7 подтверждает, что удачное разбиение расчетной области позволяет получить удовлетворительное решение с использованием меньших вычислительных ресурсов.

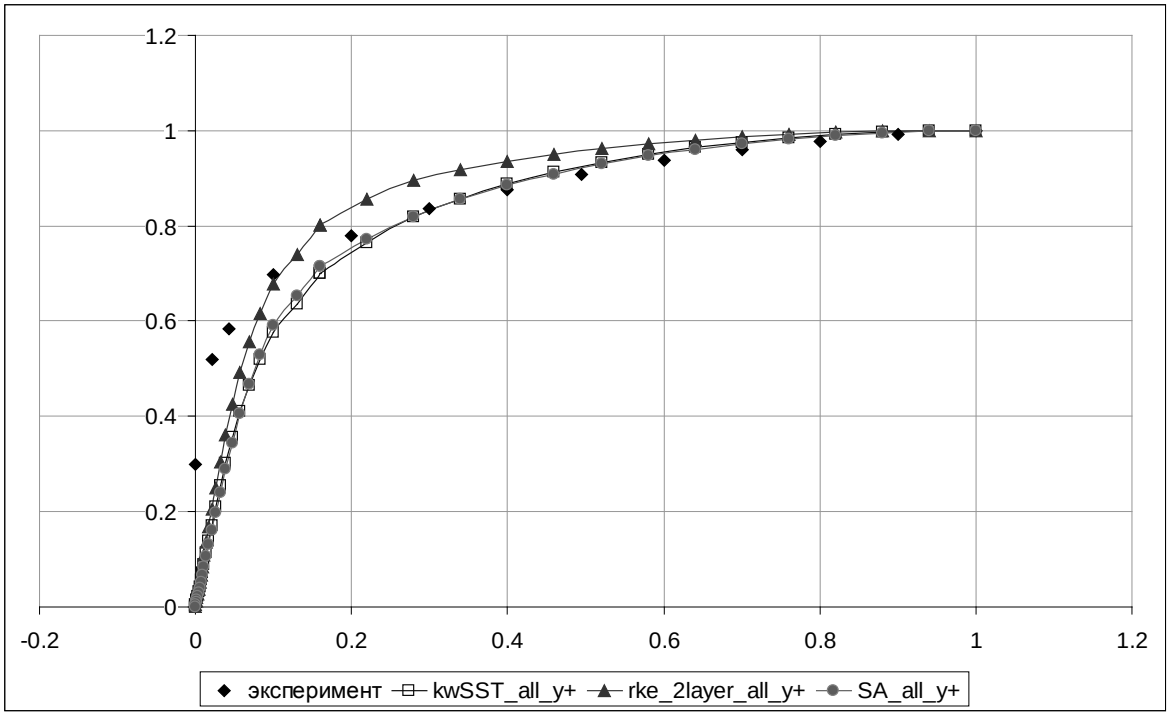


Рисунок 1 - Распределение безразмерных скоростей в поперечном сечении, полученных для сетки №8 с помощью моделей турбулентности k-ε Realizable, k-ω SST, Спаларта-Аллмареса и по данным Никурадзе (эксперимент)

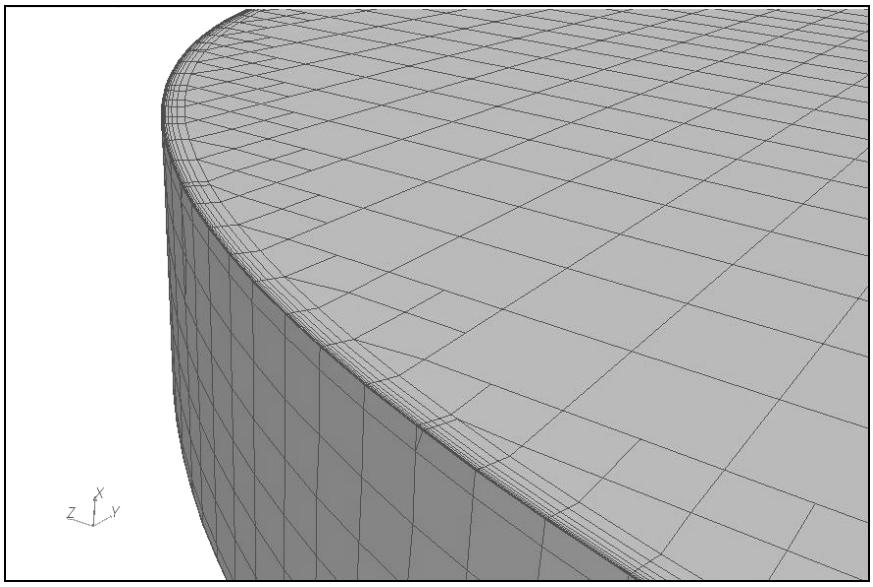


Рисунок 2 – Расчетная сетка со сгущением в пристеночной области (на примере сетки №8)

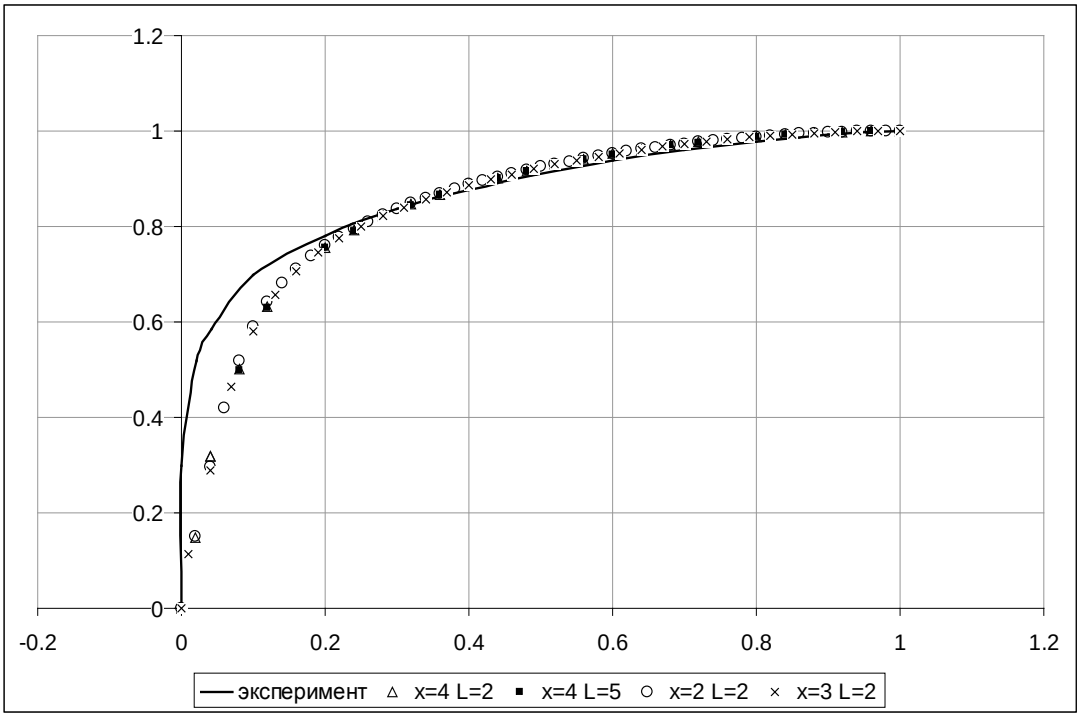


Рисунок 3 – Распределение безразмерных скоростей в поперечном сечении, полученных для сеток №3, 4, 1, 2 с помощью модели турбулентности Спаларта-Аллмареса и по данным Никурадзе (эксперимент)

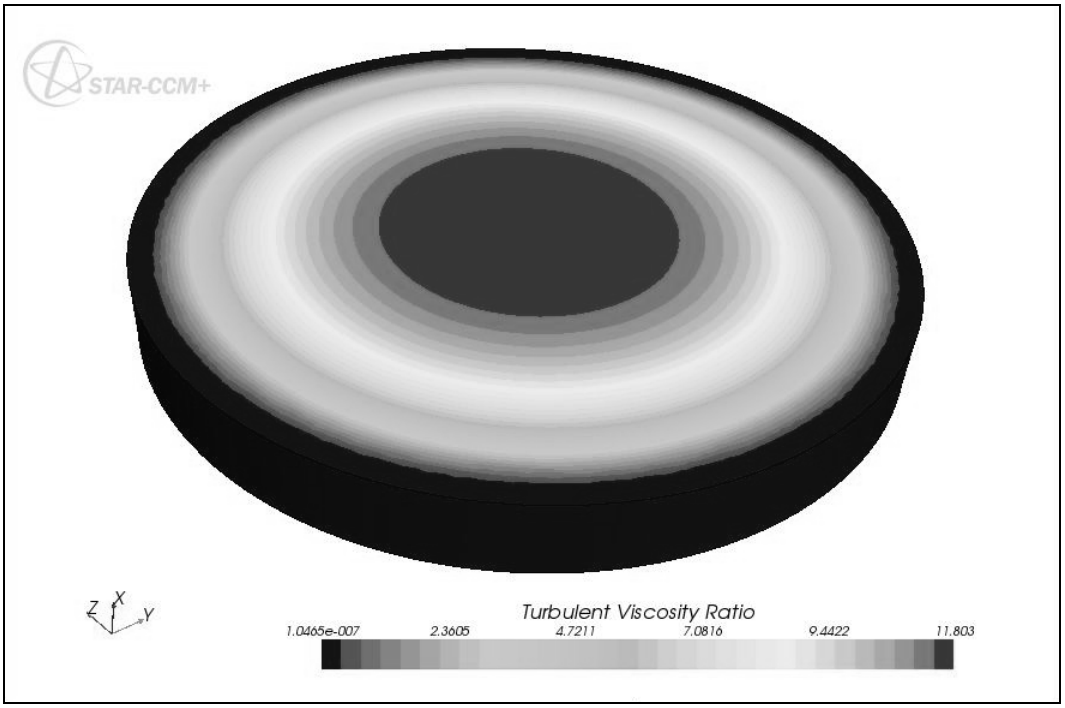


Рисунок 4 – Отношение турбулентной вязкости к молекулярной (эксперимент №1)

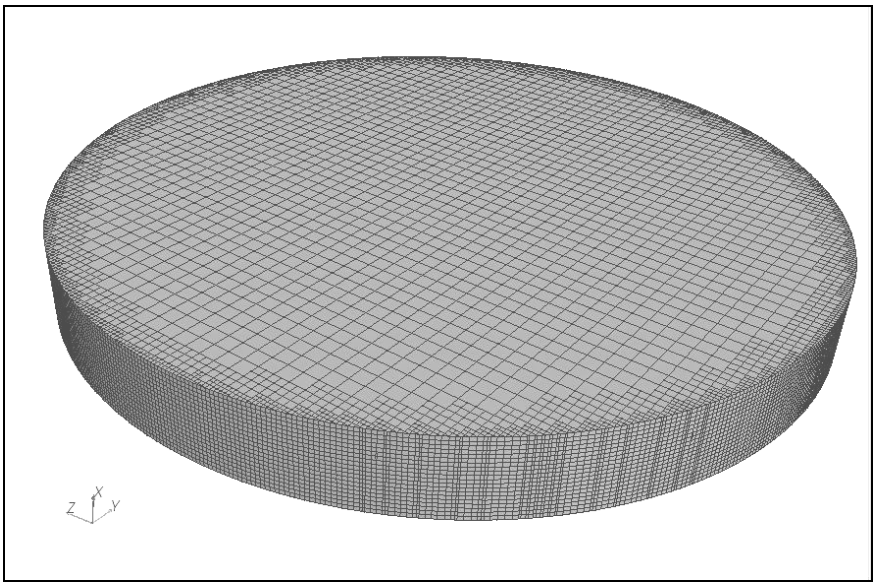


Рисунок 5 – Расчетная сетка без сгущения в пристеночной области (на примере сетки №1)

ЛИТЕРАТУРА

1. *Харчук С.И., Болдырев А.В., Мулюкин В.Л.* Исследование влияния модели турбулентности и расчетной сетки на результаты численного моделирования // Гидрогазодинамика, гидравлические машины и гидропневмосистемы: Тр. Междунар. науч.-техн. конф. – М.: Издательство МЭИ, 2006. – С. 43-46.
2. *Харчук С.И., Болдырев А.В., Харчук С.С.* Моделирование турбулентных течений в цилиндрической трубе // Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика: тез. докл. XII Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – С. 82.
3. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя / Перев. с немецкого. – М.: Глав. ред. физ.-мат. лит-ры издательства «Наука», 1974. – 711 с.
4. User guide. STAR-CCM+ Version 3.04.009. – CD-adapco, 2008.
5. *Белов И.А., Исаев С.А.* Моделирование турбулентных течений: Учебное пособие. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2001. – 109 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Л.М. Котляром.
Поступила в редакцию 31.03.09 г.

УДК 519.65

О НОВОМ МЕТОДЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНСТАНТ ЛЕБЕГА СЕМЕЙСТВА ПОЛИНОМОВ ЛАГРАНЖА

И.А. Шакиров, *к.ф.-м. н.*
Набережночелнинский государственный педагогический институт

Работа посвящена исследованию семейства Φ_n полиномов Лагранжа, интерполирующих заданную функцию в четном числе узлов. Из них в приложениях используются только многочлен, имеющий минимальную норму в $L_2[0,2\pi]$. Это связанно с тем, что для остальных полиномов семейства отсутствовало параметрическое описание их ядер Дирихле, следовательно, и фундаментальных полиномов, функций и констант Лебега. Поэтому их дальнейшее исследование (изучение свойств, вычисление явных видов и др.) оставалось открытым.

В работе впервые проведено описание произвольно выбранного полинома из Φ_n через ядро, зависящее от параметра. На этой основе найдены соответствующие этому полиному функции и константы Лебега, проведено их сравнительное исследование. Решена одна экстремальная задача.

Введение. Хорошо известна тригонометрическая и прикладная важность интерполяционных процессов Лагранжа. Наиболее компактные для них формулы в тригонометрическом случае получаются при равномерном распределении узлов интерполяции на периоде $[0,2\pi)$. В случае четного числа $N = 2n$ $(n \in N)$ узлов существует целое семейство $\Phi_n = \{\Phi_n(x,t;\lambda)\}$ полиномов порядка n (см., напр., [1, с. 24])

$$\Phi_n(x,t;\lambda) = \frac{1}{n}\sum_{k=0}^{2n-1} x(t_k)D_n^*(t-t_k) + \lambda\sin(nt+\alpha) = \tag{1}$$
$$= \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} x(s)D_n^*(t-s)d\omega_{2n}(s) + \lambda\sin(nt+\alpha),$$

каждый из которых совпадает с функций $x = x(t) \in \tilde{R}$ в попарно неэквивалентных корнях уравнения $\sin(nt+\alpha) = 0$, где многочлен

$$\Phi_n(x,t;0) = \Phi_n^*(x,t) = \frac{1}{n}\sum_{k=0}^{2n-1} x(t_k)D_n^*(t-t_k) \tag{2}$$

характеризуется тем, что интеграл от его квадрата на периоде минимален;

$$D_n^*(u) = (1/2)\cdot\sin nu \cdot ctg(u/2) \tag{3}$$

- измененное ядро Дирихле порядка n; $\tilde{R} = \tilde{R}[0,2\pi]$ - множество интегрируемых в смысле Римана (R - интегрируемых) 2π - периодических функций; $\omega_{2n} = \omega_{2n}(t)$ - связанная с нулями $\sin(nt+\alpha)$ ступенчатая функция; $\alpha, \lambda \in \mathrm{R}$.

В случае же нечетного числа $N = 2n+1$ $(n \in N)$ равноотстоящих узлов $t_k = 2\pi/(2n+1)$ $(k = \overline{0,2n})$ такой интерполяционный полином единственен и имеет вид

$$P_n(x,t) = \frac{2}{2n+1}\sum_{k=0}^{2n} x(t_k)D_n(t-t_k) \qquad (D_n(u) = \frac{\sin(n+0{,}5)u}{2\sin 0{,}5u}). \tag{4}$$

Представляют интерес следующие вопросы, которые в математической литературе оставались неисследованными до сих пор:

- возможно ли ядерное (как (2) и (4)) описание произвольно выбранного полинома из семейства (1);
- если да, каковы явные выражения ядер Дирихле и функций Лебега полиномов семейства Φ_n (в том числе и функция Лебега полинома (2), а также и (4));
- как ведут себя константы Лебега при различных значениях параметра λ в (1);

- не является ли многочлен (2), имеющий минимальную норму в пространстве $L_2[0,2\pi]$, также и многочленом, имеющим минимальную норму в пространстве непрерывных 2π - периодических функций $C_{2\pi} = C[0,2\pi]$ и др.?

В данной работе впервые даны ответы на эти и некоторые другие вопросы теории интерполирования периодических функций.

2. Ядерное описание полиномов семейства Φ_n. Исследование поведения семейства полиномов (1) не представляется возможным без параметрического описания их ядер Дирихле, следовательно, и фундаментальных полиномов, функций и констант Лебега. С этой целью введем в рассмотрение ортогональную и полную с весом $d\omega_{2n}$ систему (определения см. в [1, с.14]), состоящую из $N = 2n$ $(n \in N)$ функций

(5) $$1/2,\ \cos t,\ \sin t, \cdots, \cos(n-1)t,\ \sin(n-1)t,\ \cos nt + c\sin nt\ ,$$

последняя из которых зависит от параметра $c \in R$, а ступенчатая функция $\omega_{2n}(t)$ связана с нулями $\sin nt$ на $[0,2\pi]$ (далее, для определенности, всюду в (1) положим $\alpha = 0$), т.е. с множеством точек

(6) $$t_j = \frac{\pi}{n} j \quad (j = \overline{0,2n-1}) \vee t_j = \frac{\pi}{n} j \quad (j = \overline{1,2n};\ n \in N).$$

Нетрудно убедиться, что при любом фиксированном значении параметра $c \in R$ существует единственный тригонометрический полином из множества

(7) $$H_n^c = \left\{ \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{n-1} \left(a_k \cos kt + b_k \sin kt\right) + a_n(\cos nt + c\sin nt);\ a_k, b_k \in R \right\},$$

совпадающий в узлах (6) с заданной функцией $x(t) \in \tilde{R}$. Коэффициенты такого полинома $\Phi_n^c(x,t) \in H_n^c$ имеют вид:

(8) $$a_k = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} x(t)\cos kt d\omega_{2n}\ (k = \overline{0,n-1}),\ b_k = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} x(t)\sin kt d\omega_{2n}\ \ (k = \overline{1,n-1}),$$
$$a_n = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} x(t)\left(\cos nt + c\sin nt\right) d\omega_{2n}.$$

Учитывая, что для произвольной функции $x(t) \in \tilde{R}$ (при условии связанности $\omega_{2n}(t)$ с узлами (6), для определенности - с $t_j = \pi j/n,\ j = \overline{0,2n-1}$) имеет место равенство

$$\frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} x(t)\sin nt\, d\omega_{2n}(t) = \frac{1}{n}\sum_{j=0}^{2n-1} x(t_j)\sin nt_j = 0,$$

после некоторых упрощений получим явный вид полинома $\Phi_n^c(x,t)$:

(9) $$\begin{aligned}
\Phi_n^c(x,t) &= \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} x(s)\left[\frac{1}{2} + \sum_{k=1}^{n-1}\cos k(s-t) + \frac{1}{2}\cos ns(\cos nt + c\sin nt)\right] d\omega_{2n}(s) = \\
&= \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} x(s)\left[\frac{1}{2} + \sum_{k=1}^{n-1}\cos k(s-t) + \frac{1}{2}\cos n(s-t) - \frac{c}{2}\sin n(s-t)\right] d\omega_{2n}(s) = \\
&= \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} x(s)\left[\frac{\sin n(s-t)}{2tg\dfrac{s-t}{2}} - \frac{c}{2}\sin n(s-t)\right] d\omega_{2n}(s) = \\
&= \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} x(s) D_n^c(s-t) d\omega_{2n}(s) = \frac{1}{n}\sum_{j=0}^{2n-1} x(t_j) D_n^c(t_j - t) = \sum_{j=0}^{2n-1} x(t_j) l_j^c(t),
\end{aligned}$$

где

(10) $$D_n^c(u) = \frac{1}{2}\sin nu\,(ctg\,u/2 - c), \qquad l_j^c(t) = \frac{1}{n}D_n^c(t_j - t)$$

являются соответственно ядрами Дирихле и фундаментальными полиномами, зависящими от параметра $c \in R$, и

(11) $$l_j^c(t) = \left\{1,\ \textit{если}\, t = t_j;\quad 0,\ \textit{если}\ t \neq t_j\ (j = \overline{0,2n-1})\right\}.$$

Теперь, представляя основной фундаментальный полином $l_0^c(t)$ $\left(в\ (10)\ j = 0;\ t_0 = 0\right)$ в виде

(12) $$l_0^c(t) = \frac{1}{2n}\sin nt(ctg\frac{t}{2} + c) \vee l_0^{-c}(t) = \frac{1}{2n}\sin nt(ctg\frac{t}{2} - c) \qquad (c \in R),$$ а также используя следуемые из (10) и (12) равенства

(13) $$l_j^c(t) = l_0^{-c}(t_j - t) \qquad \left(j = \overline{0,2n-1};\ c \in R\right),$$

интерполяционный полином (9) выразим через (12):

(14) $$\Phi_n^c(x,t) = \sum_{j=0}^{2n-1} x(t_j) l_0^{-c}(t_j - t) \qquad (t_j = \frac{\pi}{n}j;\ c \in R).$$

Следует отметить, что в семействе $\tilde{\Phi}_n = \left\{\Phi_n^c(x,t);\ c \in R\right\}$, где интерполяционные полиномы представлены в удобном для исследования виде (14), наиболее важными в приложениях являются многочлены при $c = 0$ ($\Phi_n^0(x,t) = \Phi_n^*(x,t)$; см. (2)), $c = 1$ и $c = -1$. Последние два многочлена впервые были введены и удачно использованы автором в работе [2] при обосновании приближенных методов решения различных классов интегральных уравнений.

2. Параметрические выражения функций и констант Лебега. Ясно, что интерполяционные полиномы (14) из $\tilde{\Phi}_n$ порождают семейство операторов

(15) $$\Phi_n^c : \tilde{R} \to H_n^c\left(\subset \tilde{R}\right),\quad c \in R.$$

При рассмотрении вопросов, связанных с проблемой погрешности приближения заданной функции полиномами (14) в пространстве $\tilde{R} = C_{2\pi}$, (14) и (15) приводят, в свою очередь, к необходимости исследования семейств функций F и констант K Лебега:

(16) $$F = \left\{\lambda_n^c(t) \middle| c \in R\right\},\quad K = \left\{\lambda_n^c \middle| c \in R\right\}.$$

Ниже приведем две теоремы, напрямую связанные с (15) и (16).

ТЕОРЕМА 1. Операторы $\Phi_n^c : C_{2\pi} \to H_n^c$ являются линейными проекционными операторами при любом фиксированном значении параметра $c \in R$.

ТЕОРЕМА 2. Для выбранной системы узлов интерполяции (6) и произвольной 2π-периодической непрерывной функции $x = x(t)$ верна следующая оценка погрешности приближения в пространстве $C_{2\pi}$:

$$\left\|x - \Phi_n^c x\right\|_{C_{2\pi}} \le (1 + \lambda_n^{-c}) \cdot E_n^c(x) \qquad (c \in R),$$

где $E_n^c(x)$ - наилучшее равномерное приближение $x(t)$ многочленами вида (7), а λ_n^{-c} - верхняя оценка нормы оператора (15) при фиксированном значении $c \in R$ и $\tilde{R} = C_{2\pi}$.

Теорема 1 доказывается по известному алгоритму с учетом специфики множеств (5) и (7), а также явного вида (9) многочлена $\Phi_n^c(x,t)$.

Схему доказательства теоремы 2 приведем с целью детализации введенных в этом пункте новых обозначений и терминологии. Действительно, во-первых, для (14) и (15) верны нижеследующие оценки:

(17)
$$\left|\Phi_n^c(x,t)\right| \le \sum_{j=0}^{2n-1}\left|x(t_j)\right|\cdot\left|l_0^{-c}(t_j-t)\right| \le \left(\sum_{j=0}^{2n-1}\left|l_0^{-c}(t_j-t)\right|\right)\cdot\|x\|_{C_{2\pi}} = \lambda_n^{-c}(t)\cdot\|x\|_{C_{2\pi}};$$
$$\left\|\Phi_n^c x\right\|_{C_{2\pi}} \le \max_{t\in[0,2\pi]}\lambda_n^{-c}(t)\cdot\|x\|_{C_{2\pi}} = \lambda_n^{-c}\|x\|_{C_{2\pi}}; \qquad \left\|\Phi_n^c\right\|_{C_{2\pi}\to C_{2\pi}} \le \lambda_n^{-c},$$

где

(18)
$$\lambda_n^{-c}(t) = \sum_{j=0}^{2n-1}\left|l_0^{-c}(t_j-t)\right|, \qquad \lambda_n^{-c} = \max_{t\in[0,2\pi]}\lambda_n^{-c}(t) \qquad (c\in R)$$

называются функциями и константами Лебега, соответствующими полиномам (14) и операторам (15) соответственно; во-вторых, обозначая через $Q_n^c = Q_n^c(t)\in H_n^c$ многочлен наилучшего равномерного приближения для $x(t)\in C_{2\pi}$ при каждом фиксированном значении параметра c и используя теорему 1, получим

(19)
$$\left\|x-\Phi_n^c x\right\|_{C_{2\pi}} = \left\|x-Q_n^c+\Phi_n^c(Q_n^c-x)\right\| \le \left(1+\left\|\Phi_n^c\right\|_{C_{2\pi}\to C_{2\pi}}\right)\cdot E_n^c(x) \le \left(1+\lambda_n^{-c}\right)E_n^c(x).$$

Из неравенства (19) хорошо прослеживается актуальность исследования поведения констант Лебега λ_n^c (следовательно, и функций Лебега $\lambda_n^c(t)$) в зависимости от поведения параметра $(c\in R)$, к чему мы и приступим далее.

3. Явные выражения функций Лебега полиномов Лагранжа из Φ_n. Изучению одного из наиболее важных констант теории интерполирования посвящено большое количество работ. Достаточно полные результаты для двух классических полиномов вида (2) и (4) имеются в монографии [3], где для них найдены точные значения констант Лебега λ_n^* и λ_n [3, с. 43,46] соответственно:

(20)
$$\lambda_n^* = \frac{1}{n}\sum_{j=0}^{n-1} ctg\frac{2j+1}{4n}\pi, \quad \lambda_n = \frac{1}{2n+1}\left(1+2\sum_{k=0}^{n-1}\cos ec\frac{2k+1}{4n+2}\pi\right) \quad (n\in N).$$

Вычисление же соответствующих (20) явных (безмодульных) видов функций Лебега $\lambda_n^*(t)$ и $\lambda_n(t)$ оставалось открытым вопросом (в [3] константы (20) вычислены без использования явных видов $\lambda_n^*(t)$ и $\lambda_n(t)$) в связи с тем, что недостаточно полно было исследовано влияние выбора узлов интерполяции и сдвигов аргументов фундаментальных полиномов на поведение основного фундаментального полинома в периоде (напр., на $l_0^0(t)$ в (10)).

Ниже явные выражения функций Лебега получены для всего семейства F (в том числе и для $\lambda_n^*(t)\equiv\lambda_n^0(t)$, т.е. при $c=0$ в (16)) и изучены их свойства, а в разделе 5 аналогичное сделано для функции Лебега $\lambda_n(t)$.

ТЕОРЕМА 3. Фундаментальные полиномы $l_0^c(t)$ и функции Лебега $\lambda_n^c(t)$ являются

1) соответственно 2π и π/n-периодическими функциями при любых значениях параметра c $(c\in R)$;
2) четными функциями при $c=0$;
3) функциями, принадлежащими классу ни четных и ни нечетных функций при остальных значениях параметра c, т.е. при $c\in R\setminus\{0\}$.

1. Доказательство равенства $l_0^c(t+2\pi)=l_0^c(t)$ следует из (12), а $\frac{\pi}{n}$- периодичность $\lambda_n^c(t)$ $(c\in R)$ - из (18):

$$\lambda_n^c\left(t+\frac{\pi}{n}\right)=\sum_{j=0}^{2n-1}\left|l_0^c\left[t_j-(t+\frac{\pi}{n})\right]\right|=\sum_{j=0}^{2n-1}\left|l_0^c\left(t_{j-1}-t\right)\right|=\left|l_0^c\left(t_{-1}-t+2\pi\right)\right|+$$

(21)

$$+\sum_{j=1}^{2n-1}\left|l_0^c\left(t_{j-1}-t\right)\right|=\sum_{k=0}^{2n-2}\left|l_0^c\left(t_k-t\right)\right|+\left|l_0^c\left(t_{2n-1}-t\right)\right|=\sum_{k=0}^{2n-1}\left|l_0^c\left(t_k-t\right)\right|=\lambda_n^c(t).$$

2. Из (12) и (18) при $c=0$ предварительно получим явные выражения фундаментального полинома $l_0^*(t)$ и функции Лебега $\lambda_n^*(t)$ для классического интерполяционного многочлена (2):

(22) $$l_0^*(t)\equiv l_0^0(t)=\frac{\sin nt}{2n}\cdot ctg\frac{t}{2}\qquad \left(t\in(0,2\pi)\right);$$

$$\lambda_n^*(t)\equiv\lambda_n^0(t)=\sum_{j=0}^{2n-1}\left|l_0^*(t_j-t)\right|=\frac{1}{2n}\sum_{j=0}^{2n-1}\left|\sin n(\frac{\pi}{n}j-t)\cdot ctg\frac{t_j-t}{2}\right|=$$

$$=\frac{1}{2n}\sum_{j=0}^{2n-1}\left|(-1)^{j+1}\sin nt\right|\cdot\left|ctg\frac{t_j-t}{2}\right|=\frac{\left|\sin nt\right|}{2n}\sum_{j=0}^{2n-1}\left|ctg\frac{t_j-t}{2}\right|\qquad\left(\lambda_n^*(t_j)=1,\quad j=\overline{1,2n}\right).$$

Учитывая равенство $\left|ctg\frac{t_{2n}-t}{2}\right|=\left|ctg\frac{t_0-t}{2}\right|$ и $\frac{\pi}{n}$-периодичность $\lambda_n^*(t)$, перепишем ее на двух основных периодах в следующих видах:

(23) $$\lambda_n^*(t)=\frac{\left|\sin nt\right|}{2n}\sum_{j=1}^{2n}\left|ctg\frac{t_j-t}{2}\right|\qquad(t\in\left[-\pi/2n,0\right)\cup(0,\pi/2n],\ \ \lambda_n^*(0)=1);\ ,$$

(24) $$\lambda_n^*(t)=\frac{\sin nt}{2n}\sum_{j=1}^{2n}(ctg\frac{t_j-t}{2})\cdot sign(ctg\frac{t_j-t}{2})\ \ (t\in(0,\pi/n))\,.$$

Используя свойства и поведение графика функции $y=ctg\frac{u}{2}$ на $(0,2\pi)$, из (24) получим более практичное безмодульное представление функции Лебега:

(25) $$\lambda_n^*(t)=\frac{\sin nt}{2n}\sum_{j=1}^{n}(ctg\frac{t_{j-1}+t}{2}+ctg\frac{t_j-t}{2})\qquad(t\in(0,\pi/n))\,.$$

Четность функции (22) очевидна, а четность $\lambda_n^*(t)$ установим используя (23)-(25) (для определенности $t\in(0,\pi/2n)$) и равенства $\left|ctg(t_0-t)/2\right|=ctg(t_0+t)/2$, $\left|ctg(t_n+t)/2\right|=ctg(t_n-t)/2$:

$$\lambda_n^*(-t)=\frac{\left|\sin n(-t)\right|}{2n}\sum_{j=1}^{n}\left(\left|ctg\frac{t_{j-1}+(-t)}{2}\right|+\left|ctg\frac{t_j-(-t)}{2}\right|\right)=$$

(26) $$=\frac{\sin nt}{2n}\left[\sum_{j=2}^{n}ctg\frac{t_{j-1}+t}{2}+\left|ctg\frac{t_n+t}{2}\right|+\left|ctg\frac{t_0-t}{2}\right|+\sum_{j=1}^{n-1}ctg\frac{t_j-t}{2}\right]=$$

$$=\frac{\sin nt}{2n}\sum_{j=1}^{n}(ctg\frac{t_{j-1}+t}{2}+ctg\frac{t_j-t}{2})=\lambda_n^*(t).$$

3. Первая часть утверждения пункта 3) теоремы 3 легко следует из (12):

$$l_0^c(-t)=\frac{\sin nt}{2n}\cdot(ctg\frac{t}{2}-c)\neq\pm l_0^c(t)\qquad\left(t\in(-\pi,0)\cup(0,\pi);\ l_0^c(0)=1,\ c\in R\setminus\{0\}\right).$$

До перехода к доказательству второй части данного пункта, используя (18), (12), равенство $l_0^{-c}(t_0-t)=l_0^{-c}(t_{2n}-t)$ и схему получения представлений (23)-(25) функции $\lambda_n^*(t)$, установим нижеследующие явные выражения функции Лебега $\lambda_n^{-c}(t)\quad(c\in R)$:

$$\lambda_n^{-c}(t)=\sum_{j=0}^{2n-1}\left|l_0^{-c}(t_j-t)\right|=\sum_{j=1}^{2n}\left|l_0^{-c}(t_j-t)\right|=\frac{1}{2n}\sum_{j=1}^{2n}\left|\sin(\pi j-nt)\cdot(ctg\frac{t_j-t}{2}-c)\right|=$$
$$=\frac{|\sin nt|}{2n}\sum_{j=1}^{2n}\left|ctg\frac{t_j-t}{2}-c\right|\qquad(t\in[-\pi/2n,0)\cup(0,\pi/2n],\quad \lambda_n^{-c}(0)=1); \tag{27}$$

$$\lambda_n^{-c}(t)=\frac{\sin nt}{2n}\sum_{j=1}^{2n}(ctg\frac{t_j-t}{2}-c)\cdot sign(ctg\frac{t_j-t}{2}-c)\quad\left(t\in(0,\pi/n)\right), \tag{28}$$

которые при $c=0$ полностью согласуются с (23) и (24).

Теперь, переходя в (27) к $-t$ и считая (для определенности) $t\in(0,\pi/2n]$, получим:

$$\lambda_n^{-c}(-t)=\frac{|\sin n(-t)|}{2n}\sum_{j=0}^{2n-1}\left|ctg\frac{t_j-(-t)}{2}-c\right|=\frac{\sin nt}{2n}\sum_{j=0}^{2n-1}\left|ctg\frac{t_j+t}{2}-c\right|=$$
$$=\frac{\sin nt}{2n}\sum_{j=0}^{2n-1}(ctg\frac{t_j+t}{2}-c)\cdot sign(ctg\frac{t_j+t}{2}-c)\qquad\left(t\in(0,\pi/2n]\right). \tag{29}$$

Поведение функции $y=\left|ctg\frac{u}{2}-c\right|\ \left(u\in(0,2\pi)\right)$ исключает тождественное совпадение на $(0,\pi/2n]$ содержащихся в (28) и (29) сумм, за исключением случая $c=0$ (см. (26)). Действительно, для этого достаточно представить (27) и (28) в виде, аналогичном представлению (25) функции $\lambda_n^*(t)$, и рассмотреть разность $\lambda_n^{-c}(t)-\lambda_n^{-c}(-t)$ на периоде (для определенности, ниже $c\geq 0$; $t\in(0,\pi/2n]$, следовательно, $-t\in[-\pi/2n,0)$; $\lambda_n^{-c}(0)=1$):

$$\lambda_n^{-c}(t)-\lambda_n^{-c}(-t)=\frac{\sin nt}{2n}\left[\sum_{j=1}^{n^*}(ctg\frac{t_{j-1}+t}{2}+ctg\frac{t_j-t}{2})+\right.$$
$$\left.+\sum_{j=n^*+1}^{n}(ctg\frac{t_{j-1}+t}{2}-ctg\frac{t_j-t}{2})+2c(n-n^*)\right]-\frac{\sin nt}{2n}\left[\sum_{j=1}^{n^*}(ctg\frac{t_{j-1}+t}{2}+ctg\frac{t_j-t}{2})+\right.$$
$$\left.+\sum_{j=n^*+1}^{n}(-ctg\frac{t_{j-1}+t}{2}+ctg\frac{t_j-t}{2})+2c(n-n^*)\right]=$$
$$=\frac{\sin nt}{n}\left[\sum_{j=n^*+1}^{n}(ctg\frac{t_{j-1}+t}{2}-ctg\frac{t_j-t}{2})\right]\qquad(n^*=[\frac{2n}{\pi}arcctg\,c]), \tag{30}$$

где $n^*=n^*(n,c)$ - вполне определенное целое число ($n^*\in[0,n]$; например, при $c=0$ получаем $n^*=n$ и правая часть (30) обращается в нуль тождественно, т.е. $\lambda_n^0(t)-\lambda_n^0(-t)\equiv 0$ или $\lambda^*(t)\equiv\lambda_n^*(-t)$, что полностью согласуется с (26)). Правая часть (30) обращается в нуль только на концах полуинтервала $(0,\pi/2n]$, а во внутренних его точках $\lambda_n^{-c}(t)>\lambda_n^{-c}(-t)$, что исключает четность функции Лебега $\lambda_n^{-c}(t)$ ($c>0$) и завершает доказательство теоремы 3.

4. Сравнительное исследование семейства констант Лебега. Результаты предыдущего раздела позволяют оценить константы Лебега λ_n^c $(\in K)$ из (16) через λ_n^* и параметр $c\in R$, а

также найти точное значение константы λ_n^*, соответствующее функциям Лебега (23)-(25). При этом используются элементы дифференциального исчисления. В конце параграфа приведено решение экстремальной задачи

$$\min\{\lambda_n^c \,|\, c \in R\} = \lambda_n^0 = \lambda_n^* .$$

ТЕОРЕМА 4. Для произвольной константы λ_n^c из семейства K верна оценка

$$\lambda_n^c \le \lambda_n^* + |c| \qquad (c \in R,\ n \in N).$$

Используя (18), п.1) теоремы 3 и (22) получим утверждение теоремы 4:

$$\lambda_n^c = \max_{t\in[0,\pi/n]} \sum_{j=0}^{2n-1} \left| l_0^c(t_j - t) \right| = \max_{t\in[0,\pi/n]} \sum_{j=0}^{2n-1} \left| \frac{\sin n(t_j - t)}{2n} \cdot (ctg\,\frac{t_j - t}{2} + c) \right| \le$$

$$\le \max_{t\in[0,\pi/n]} \sum_{j=0}^{2n-1} \left| l_0^*(t_j - t) \right| + \frac{|c|}{2n} \max_{t\in[0,\pi/n]} \sum_{j=0}^{2n-1} \left| (-1)^{j+1} \sin nt \right| = \lambda_n^* + |c| \qquad (c \in R).$$

ТЕОРЕМА 5. При тригонометрическом интерполировании в узлах (6) константа Лебега λ_n^*, соответствующая функциям (23)-(25), вычисляется по формуле

$$\lambda_n^* = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} ctg\,\frac{2j-1}{4n}\pi \qquad (n \in N). \tag{31}$$

Из теоремы 3 и (22)-(25) следует, что $\lambda_n^*(t)$ является непрерывной, четной, π/n - периодической функцией и на концах интервала периодичности $(0, \pi/n)$ принимает равные значения, т.е. $\lambda_n^*(0) = \lambda_n^*(\pi/n) = 1$. Более того в середине интервала (при $x = \pi/2n$) ее производная обращается в нуль и меняет знак. Действительно,

$$(\lambda_n^*(t))' = \left(\frac{\sin nt}{2n} \sum_{j=1}^{n} (ctg\,\frac{t_{j-1} + t}{2} + ctg\,\frac{t_j - t}{2}) \right)' =$$

$$= \frac{1}{n} \left(\sin nt \cdot \sum_{j=1}^{n} \frac{\sin(t_j - \pi/2n)}{\cos(t - \pi/2n) - \cos(t_j - \pi/2n)} \right)' =$$

$$= \frac{1}{n} \left(n \cos nt \cdot \sum_{j=1}^{n} \frac{\sin(t_j - \pi/2n)}{\cos(t - \pi/2n) - \cos(t_j - \pi/2n)} + \right.$$

$$\left. + \sin nt \cdot \sin(t - \pi/2n) \cdot \sum_{j=1}^{n} \frac{\sin(t_j - \pi/2n)}{(\cos(t - \pi/2n) - \cos(t_j - \pi/2n))^2} \right)$$

и $\left(\lambda_n^*(\pi/2n)\right)' = 0$. Теперь из представления (25) функции Лебега $\lambda_n^*(t)$ при $t = \pi/2n$ получим (31) (сравни с (20)):

$$\lambda_n^* = \max_{t\in[0;\pi/n]} \lambda_n^*(t) = \lambda_n^*(\pi/2n) = \frac{1}{2n} \sin(n \cdot \frac{\pi}{2n}) \cdot$$

$$\cdot \sum_{j=1}^{n} (ctg\,\frac{\pi j/n - \pi/2n}{2} + ctg\,\frac{\pi(j-1)/n + \pi/2n}{2}) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} ctg\,\frac{2j-1}{4n}\pi .$$

ТЕОРЕМА 6. Тригонометрический интерполяционный полином (2), имеющий минимальную норму в $L_2[0,2\pi]$, является также многочленом, имеющим минимальную норму в $C[0,2\pi]$.

Используя (16), (25) и (30), вначале сравним на периоде функции Лебега $\lambda_n^{-c}(t)$ (для определенности $c>0$) и $\lambda_n^*(t)$ $(c=0)$ из семейства F:

$$\lambda_n^{-c}(t)-\lambda_n^*(t)=\frac{\sin nt}{2n}\left[\sum_{j=1}^{n^*}(ctg\frac{t_{j-1}+t}{2}+ctg\frac{t_j-t}{2})+\right.$$

$$\left.+\sum_{j=n^*+1}^{n}(ctg\frac{t_{j-1}+t}{2}-ctg\frac{t_j-t}{2})+2c(n-n^*)\right]-\frac{\sin nt}{2n}\sum_{j=1}^{n}(ctg\frac{t_{j-1}+t}{2}+ctg\frac{t_j-t}{2})=$$

(32)

$$=\frac{\sin nt}{2n}\left\{\sum_{j=n^*+1}^{n}\left[(ctg\frac{t_{j-1}+t}{2}-ctg\frac{t_j-t}{2})-(ctg\frac{t_{j-1}+t}{2}+ctg\frac{t_j-t}{2})\right]+2c(n-n^*)\right\}=$$

$$=\frac{\sin nt}{n}\left(\sum_{j=n^*+1}^{n}c-\sum_{j=n^*+1}^{n}ctg\frac{t_j-t}{2}\right)=\frac{\sin nt}{n}\sum_{j=n^*+1}^{n}\left(c-ctg\frac{t_j-t}{2}\right).$$

Из определения n^* (см. (30)) следует, что для всякого $j\in[n^*+1,n]$ $c-ctg\frac{t_j-t}{2}>0$ $\left(t\in(0,\pi/n);\ c>0\right)$.Теперь из (32) легко следует

(33) $$\lambda_n^{-c}(t)>\lambda_n^*(t)\ \left(\forall\ t\in(0,\pi/n);\ \lambda_n^{-c}(0)=\lambda_n^*(0)=\lambda_n^{-c}(\pi/n)=\lambda_n^*(\pi/n)=1\right).$$

Переходя в (33) к супремуму по переменной t на периоде получим $\lambda_n^{-c}>\lambda_n^*$ $(c>0)$. Аналогичное неравенство имеет место и при отрицательных значениях c: $\lambda_n^c>\lambda_n^*$ $(c<0)$. А при $c=0$ (см. (23) и (27)) имеем: $\lambda_n^0=\lambda_n^*$.

5. О функции Лебега классического полинома (4). В этом разделе получено явное (безмодульное) представление функции Лебега $\lambda_n(t)$ классического интерполяционного полинома (4) и через него найдено точное значение константы Лебега λ_n (см. (20)).

ТЕОРЕМА 7. Функция Лебега полинома (4) имеет вид

(34) $$\lambda_n(t)=\frac{\sin(n+0{,}5)t}{2n+1}\left[\sum_{j=1}^{n}\left(\cos ec\frac{t_{j-1}+t}{2}+\cos ec\frac{t_j-t}{2}\right)+\cos ec\frac{t_n+t}{2}\right],$$

а соответствующая $\lambda_n(t)$ константа Лебега λ_n выражается формулой

$$\lambda_n=\frac{1}{2n+1}\left(1+2\sum_{j=1}^{n}\cos ec\frac{2j-1}{4n+2}\pi\right).$$

При доказательстве данной теоремы используются методы нахождения и исследования функции Лебега, примененные в разделах 3 и 4, поэтому ниже многие выкладки будут пропущены.

Известно, что

(35) $$\lambda_n(t)=\sum_{k=0}^{2n}\left|l_0(t_k-t)\right|\qquad\left(l_0(u)=\frac{2}{2n+1}D_n(u)=\frac{1}{2n+1}\cdot\frac{\sin(n+0{,}5)u}{\sin 0{,}5u}\right).$$

Используя равенство $l_0(t_0-t)=l_0(t_{2n+1}-t)$, перепишем (35) в более удобном виде

$$\lambda_n(t)=\sum_{j=1}^{2n+1}\left|l_0(t_j-t)\right|\quad\left(t_j=\frac{2\pi}{2n+1}j;\quad j=\overline{1,2n+1}\right)$$

и упростим его:

$$\lambda_n(t)=\frac{2}{2n+1}\sum_{j=1}^{2n+1}\left|D_n(t_j-t)\right|=\frac{1}{2n+1}\sum_{j=1}^{2n+1}\frac{\left|\sin\left(\pi j-\frac{2n+1}{2}t\right)\right|}{\left|\sin\frac{t_j-t}{2}\right|}=$$

(36)

$$=\frac{\left|\sin\frac{2n+1}{2}t\right|}{2n+1}\cdot\sum_{j=1}^{2n+1}\left|\cos ec\frac{t_j-t}{2}\right| \qquad \left(\lambda_n(t_j)=1;\ j=\overline{1,2n+1}\right).$$

Откуда, используя поведение функции $y=\cos ec\frac{u}{2}$ $\left(u\in(0,2\pi)\right)$, получим следующие более простые выражения для функции Лебега (36) на ее основном периоде $(0,2\pi/(2n+1))$:

(37) $$\lambda_n(t)=\frac{\sin\frac{2n+1}{2}t}{2n+1}\cdot\sum_{j=1}^{2n+1}\cos ec\frac{t_j-t}{2},$$

(38) $$\lambda_n(t)=\frac{\sin\frac{2n+1}{2}t}{2n+1}\left[\sum_{j=1}^{n}\left(\cos ec\frac{t_{j-1}+t}{2}+\cos ec\frac{t_j-t}{2}\right)+\cos ec\frac{t_n+t}{2}\right].$$

(38) является непрерывной, $2\pi/(2n+1)$-периодической, четной функцией и на концах интервала периодичности $(0,2\pi/(2n+1))$ принимает одинаковые значения, равные единице. Более того, в точке $t=\pi/(2n+1)$ ее производная $\lambda_n'(t)$ обращается в нуль и принимает положительные значения при $t\in(0,\pi/(2n+1))$, следовательно, она является точкой максимума $\lambda_n(t)$:

$$\lambda_n=\max_{t\in[0,2\pi/(2n+1)]}\lambda_n(t)=\lambda_n(\pi/(2n+1)=$$

$$=\frac{\sin(\frac{2n+1}{2}\cdot\frac{\pi}{2n+1})}{2n+1}\left[\sum_{j=1}^{n}\left(\cos ec\frac{1}{2}(t_{j-1}+\frac{\pi}{2n+1})+\cos ec\frac{1}{2}(t_j+\frac{\pi}{2n+1})\right)+\cos ec\frac{t_n+\pi/(2n+1)}{2}\right]=$$

$$=\frac{1}{2n+1}\left[2\sum_{j=1}^{n}\cos ec\frac{\pi(2j-1)}{2(2n+1)}+\cos ec\frac{\pi}{2}\right]=\frac{1}{2n+1}\left(1+2\sum_{j=1}^{n}\cos ec\frac{2j-1}{4n+2}\pi\right).$$

Заключение. Доказанные в работе теоремы 1-7 являются новыми и они позволяют ответить на многие вопросы, оставшиеся открытыми в теории интерполирования 2π-периодических функций по произвольному числу равномерно распределенных на периоде узлов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Зигмунд А*. Тригонометрические ряды. Т. 2. – М.: Мир, 1965. – 537 с.
2. *Шакиров И.А.* Квадратурные формулы для сингулярного интеграла со сдвигом и их приложения // Дифференциальные уравнения. – 1991. – Т. 27. - №4. – С. 682-691.
3. *Дзядык В.К.* Аппроксимационные методы решения дифференциальных и интегральных уравнений. – Киев: Наук. думка, 1988. – 304 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии С.Н. Тимергалиевым.
Поступила в редакцию 5.03.09 г.

РАЗДЕЛ 2
Конструирование колесных машин, силовых установок и их эксплуатация

УДК 621.313.001.57

ВЫБОР РЕЖИМА ИСПЫТАНИЯ ДВС И ИНФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ

А.Х. Хайруллин, *д.т.н.;* Л.А. Галиуллин
Камская государственная инженерно-экономическая академия

Рассмотрены режимы испытаний двигателей внутреннего сгорания. Определена структурная схема системы испытания ДВС.

Свойства двигателя внутреннего сгорания, как динамической системы, описываются набором внешних скоростных характеристик (ВСХ) – зависимостей изменения основных параметров работы от частоты вращения (угловой скорости). В состав ВСХ входят следующие характеристики (как функции частоты вращения) [1]:

- расход топлива;
- расход воздуха;
- эффективные мощность и крутящий момент, развиваемые на валу двигателя;

Различают полную и частичные ВСХ. Полную характеристику получают при обеспечении максимального наполнения цилиндров двигателя воздухом (максимальной топливоподаче) при постоянной нагрузке на валу. Частичные характеристики – соответственно при неполной топливоподаче. При этом важным является тот факт, что значения частичных характеристик лежат внутри области, ограниченной значениями полной характеристики [2].

Также нужно учесть, что для получения адекватных ВСХ необходимым условием является постоянство положения органа, управляющего топливоподачей. Величиной, характеризующей топливоподачу и управляющее воздействие со стороны водителя, является степень открытия рейки топливного насоса в процентах. Эта величина более удобна для восприятия и интерпретации, чем угол поворота в градусах [3].

Выбор режима испытания сводится к обеспечению такого режима работы двигателя, при котором его свойства представлены более полно. Такому режиму соответствует режим полной топливоподачи. Это связано в первую очередь с максимально широким частотным диапазоном работы двигателя и максимальной работой инерциальных сил и сил трения.

Таким образом, в качестве режима испытания выбирается режим работы двигателя при полной топливоподаче. При этом необходима разработка механизма принятия решения о достаточном обеспечении такого режима.

Высокая степень оснащения современных электронных систем управления рабочим процессом ДВС первичными преобразователями определяет насыщенность информационных потоков между электронным блоком управления (ЭБУ), датчиками и исполнительными механизмами. ЭБУ на основе сигналов, поступающих с первичных преобразователей (датчиков), определяет режим работы двигателя (холостой ход, мощностной режим) и формирует управляющие воздействия на исполнительные механизмы.

Исходя из состава ВСХ, можно определить перечень сигналов датчиков и исполнительных механизмов системы управления двигателем, содержащих в себе необходимую инфор-

мацию для косвенной оценки каждого параметра (рис. 1). При этом информация может содержаться как в величине сигнала (в основном, в напряжении), так и частоте изменения, длительности.

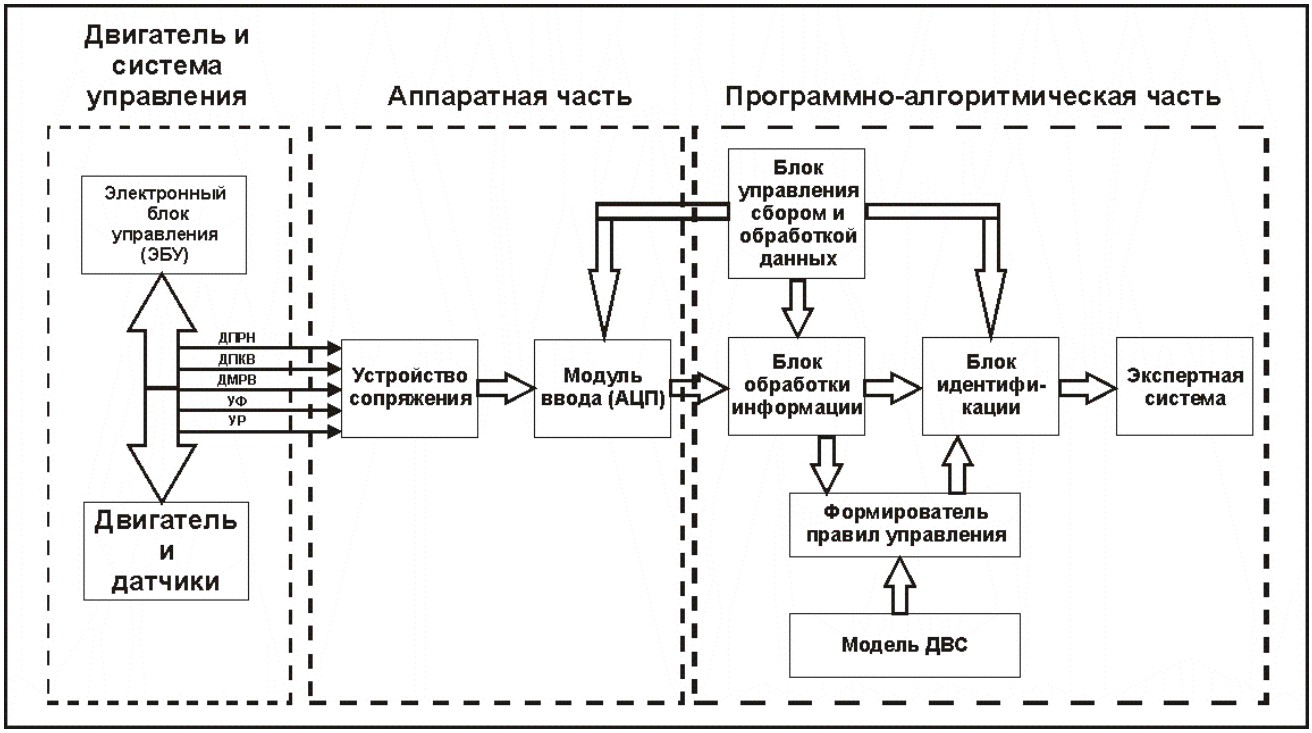


Рисунок 1 - Блок-схема системы испытания

ДПРН - информация с датчика положения рейки топливного насоса;
ДПКВ - информация с датчика положения коленчатого вала;
ДМРВ - информация с датчика массового расхода воздуха;
УФ - сигналы управления форсунками;
УР - сигналы управления рейкой топливного насоса

Для определения функции изменения эффективной мощности и крутящего момента на валу необходимо получить функцию изменения угловой скорости вращения $\varphi = \omega(t)$, где ω – угловая скорость, t – время. Такая информация содержится в нескольких сигналах, в частности, в сигналах управления впрыском топлива. Использование этих сигналов нецелесообразно, так как время появления управляющих импульсов зависит от частоты вращения вала двигателя и может изменяться относительно положения верхней мертвой точки цилиндров в соседних циклах [5].

Таких недостатков лишен сигнал датчика положения коленчатого вала. Он представляет собой синусоидальный сигнал, напряжение и частота которого есть функция частоты вращения вала двигателя [4].

Электронный блок управления в определенный момент времени замыкает линию на «массу», чем формирует отрицательный импульс. Длительность этого импульса соответствует времени открытия форсунки и связана с расходом топлива следующим соотношением [4]:

$$G_T = t_{впр} \cdot k \cdot N \cdot i \frac{60}{2 \cdot 10^6},$$

где G_T – расход топлива (кг/ч); $t_{впр}$ – длительность впрыска одной форсунки (мс); k – коэффициент впрыска форсунки (г/с); N – частота вращения ДВС (об/мин); i – число цилиндров.

Информация о расходе воздуха содержится в сигнале датчика массового расхода воздуха. Выходное напряжение датчика связано с количеством воздуха, прошедшим через датчик.

Таким образом, для построения ВСХ достаточно обрабатывать информацию с пяти сигналов системы управления. Структурная схема системы испытания представлена на рис. 1.

При этом надо учитывать, что система измерения не должна влиять на работу системы управления двигателем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Статистика автомобильного транспорта: учебник / *И.М. Алексеева, О.И. Ганченко, Е.В. Петрова*. - М.: Издательство «Экзамен», 2005. - 352 с.

2. *Гирявец А.К.* Теория управления автомобильным бензиновым двигателем. - М.: Стройиздат, 1997 – 173 с.

3. Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн. Кн. 1. Теория рабочих процессов: учебник / *В.П. Луканин, К.А. Морозов, А.С. Хачиян* и др.; Под ред. *В.Н. Луканина*.-2-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. шк., 2005 - 479 с.

4. Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн. Кн. 2. Динамика и конструирование: учебник./ *В.Н. Луканин, И.В. Алексеев, М.Г. Шатров* и др.; Под ред. *В.Н. Луканина* и *М.Г. Шатрова*.- 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Высш. шк., 2005 - 400 с.

5. Конструкция автомобиля. Том IV. Электрооборудование. Системы диагностики. Учебник для вузов / *С.В. Акимов, В.А. Набоких, Ю.П. Чижков*; Под. общей ред. доктора техн. наук, профессора *А.Л. Карунина* - М.: Горячая линия-Телеком, 2005. - 480 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии С.В. Дмитриевым.
Поступила в редакцию 1.04.09 г.

УДК 629.113

ВЫСОКОМОМЕНТНЫЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ВАРИАТОР В КОНСТРУКЦИИ БЕССТУПЕНЧАТОЙ КОРОБКИ ПЕРЕДАЧ ГРУЗОВОГО АВТОМОБИЛЯ

В. В. Волошко, И. Р. Мавлеев, *к.т.н.*
Камская государственная инженерно-экономическая академия

Предложена разработанная авторами кинематическая схема высокомоментного дифференциального гидромеханического вариатора. Разработана конструкция бесступенчатой КП грузового автомобиля с высокомоментным дифференциальным гидромеханическим вариатором.

Введение. Бесступенчатые коробки передач позволяют оптимально сочетать характеристики двигателя с различными режимами эксплуатации автомобиля. Однако максимальный диапазон преобразования существующих механических бесступенчатых передач находится в пределах 5,5÷6,0, что не обеспечивает требуемый диапазон преобразования трансмиссии грузового автомобиля. Также бесступенчатые коробки передач до сих пор не нашли широкого применения в трансмиссиях грузовых автомобилей из-за имеющихся в них существенных недостатков по сравнению механическими ступенчатыми коробками (размер, масса, КПД, производственные расходы и т.п.).

Высокомоментный дифференциальный гидромеханический вариатор, используемый в конструкции бесступенчатой коробки передач, позволяет решить следующие задачи:

- увеличение максимального значения передаваемого трансформированного крутящего момента;
- повышение КПД механизма и уменьшение габаритных размеров за счет возможности работы при высоких значениях давления;
- обеспечение автоматического, без использования систем управления, регулирования вращающего момента на выходном валу в зависимости от изменения внешней нагрузки и диапазоне регулирования грузовых автомобилей.

Высокомоментный дифференциальный гидромеханический вариатор (ВГМВ). Высокомоментный дифференциальный гидромеханический вариатор предназначен для автоматического бесступенчатого преобразования вращательного движения между валом двигателя и валом рабочего органа машин и механизмов с целью обеспечения оптимального режима совместной работы двигателя и вариатора при изменяющейся произвольно величине внешней нагрузки на рабочем органе. Кинематическая схема ВГМВ, представленная на рисунке 1, применима в трансмиссии грузовых автомобилей, обладает большим коэффициентом трансформации и способна работать при высоких значениях давления жидкости, свыше 20 МПа.

Корпус *12* высокомоментного дифференциального гидромеханического вариатора опирается на подшипники, установленные в заполненном маслом картере *20*. Для компенсации температурных расширений масла картер имеет расширительный бачок *21*. Первая дифференциальная ступень вариатора представляет собой механический дифференциальный механизм, составленный из входного вала *1*, сателлитов *2*, выходного звена *3* и водила *4*. Вторая дифференциальная ступень представляет собой гидромеханический дифференциальный преобразователь, имеющий два планетарных ряда, один из которых образован кинематическими звеньями многошестеренного гидронасоса *9*, состоящего из коронного колеса *4*, соединенного внутренним зацеплением с сателлитами *5*, а второй – кинематическими звеньями многошестеренного гидромотора *10* с двухвенцовыми сателлитами *7-7'*, шестерни *7* внутреннего зацепления которых связаны с коронным колесом *6*, а наружного зацепления *7'* - с центральной солнечной шестерней *8*. Гидронасос и гидромотор имеют впускные *15* и *18*, выпускные *14* и *19* окна, число которых равно числу сателлитов гидронасоса и гидромотора.

В гидравлический кольцевой канал *22* установлен автоматический перепускной клапан *16* и управляемый клапан *17*. Между водилом *12* и картером *20* установлена муфта

свободного хода *11*, на впускных окнах гидронасоса установлен фильтр *13*, в нижней части картера *20* установлен теплообменник *23*.

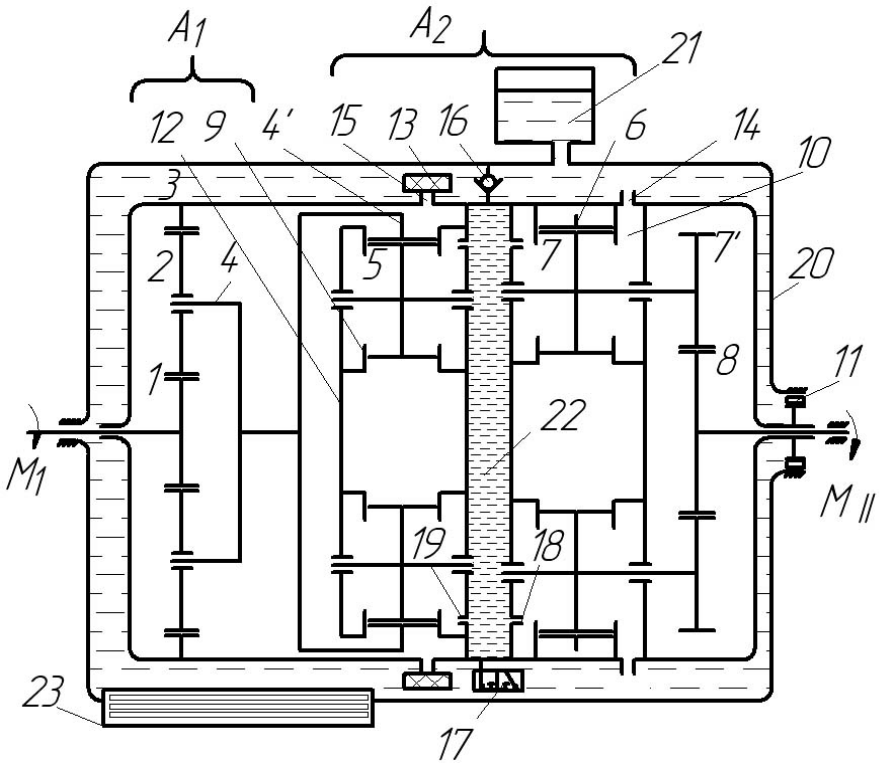


Рисунок 1 – Кинематическая схема ВГМВ:

A_1 – механический дифференциальный механизм; A_2 – гидромеханический дифференциальный преобразователь; 1 – входное звено дифференциального механизма, оно же входной вал вариатора; 2 – сателлиты; 3 – коронное колесо дифференциального механизма A_1; 4 – водило дифференциального механизма A_1, оно же входное звено гидромеханического дифференциального преобразователя; 4' – ведущее коронное колесо гидронасоса; 5 – сателлиты гидронасоса; 6 – коронное колесо гидромотора; 7-7' – двухвенцовый сателлит; 8 – центральная солнечная вал-шестерня; 9 – гидронасос; 10 – гидромотор; 11 – муфта свободного хода; 12 – водило (корпус) вариатора; 13 – фильтр; 14 и 19 – соответственно выпускные окна гидромотора и гидронасоса; 15 и 18 – соответственно впускные окна гидромотора и гидронасоса; 16 – автоматический перепускной клапан; 17 – управляемый клапан; 20 – картер вариатора; 21 – расширительный бачок; 22 – кольцевой канал; 23 – теплообменник

При неподвижном водиле *12* вращающий момент M_1 от внешнего источника энергии передается на входное звено *1* дифференциального механизма A_1, которое вращается с частотой вращения n_1, и через сателлиты *2* передается на водило дифференциала *4*, кинематического звена *4-4'*. При этом звено *4-4'* вращается в ту же сторону, что и входное звено *1*. Вращение звена *4-4'* и сателлитов *5* создает поток рабочей жидкости, определяемый параметрами уравнения

(1) $$M_{4-4'} = M_{ГН} = \frac{p_н V_{ГН}}{2\pi},$$

где $M_{4-4'} = M_{ГН}$ – момент на входном валу гидронасоса, Н·м; $p_н$ – давление жидкости, МПа; $V_{ГН}$ – рабочий объем гидронасоса, м^3.

Отличительной особенностью гидромашин с шестернями внутреннего зацепления является наличие гидростатического момента на водиле. На рисунке 2 представлена схема для определения гидростатического момента. Проекции криволинейных поверхностей зубчатых венцов, на которые давит поток жидкости, сводятся к прямоугольной площадке длиной *L* и шириной *b*. Равнодействующая сил давления жидкости *F* направлена

перпендикулярно прямой *AB* и создает неуравновешенный гидростатический крутящий момент на водиле

(2) $$M_{ГС} = FH\ ,$$

где *H* – плечо действия силы *F*, м.

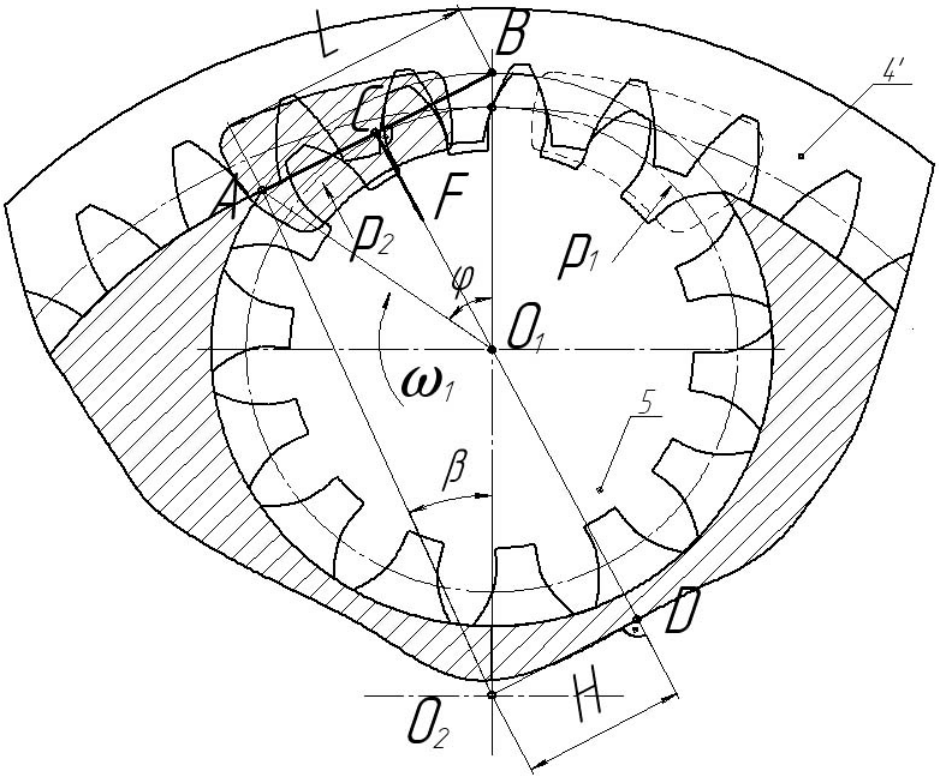


Рисунок 2 – Схема для определения гидростатического момента

В то же время на коронном колесе момент равнодействующих сил давления равен нулю, так как вектор равнодействующих сил давления проходит через ось вращения коронного колеса.

В общем случае величина силы *F* равна

(3) $$F = p_н S = p_н L b\ ,$$

где $p_н$ – давление жидкости, МПа; *L* – длина хорды, проходящей через точки *A* и *B*, м; *b* – ширина зуба, м.

Окончательно значение гидростатического момента на водиле равно

(4) $$M_{ГС} = M_{ГН}\frac{R_{w4'}}{R_{w5}} = M_{ГН} i_{54'}\ ,$$

где $i_{54'}$ – передаточное число гидронасоса.

При ведущей коронной шестерни $M_{ГС} = M_{ГН}$.

Водило *12* воспринимает реактивный момент со стороны механического дифференциального механизма A_1 равный $M_{12A1} = -M_1 i_{13}$, направленный в сторону, противоположную направлению вращения входного звена *1*.

При использовании зубчатого насоса с шестернями внутреннего зацепления с двумя и более ведомыми колесами момент, подведенный к шестерне *4'* (момент гидронасоса), воспринимается моментами сопротивления, действующими на шестернях гидронасоса *4'* и *5*. При этом момент сопротивления на звене *5* определяет значение реактивного момента на водиле *12*, который равен $M_{12A2} = -\frac{M_5^{'}}{r_5}(r_{4'} - r_5) = M_5^{'}(i_{54'} - 1)$. На водило *12* также действует

неуравновешенный гидростатический момент, образующийся давлением потока рабочей жидкости, равный $M_{ГСА2} = M_{ГН} = -M_1(1-i_{13})$.

Значение момента сопротивления на звене *5* определяется из уравнения $M_{ГН} = M_{4'}^{'} + M_5^{'} i_{54'}$ и коэффициента перераспределения моментов в гидронасосе $\lambda_H = \dfrac{M_{4'}^{'}}{M_5^{'}}$.

Т.е. $M_5^{'} = \dfrac{M_{ГН}}{\lambda_H + i_{54'}}$.

Сумма моментов M_{12A1}, M_{12A2} и $M_{ГСА2}$ равна $\sum M_{12} = M_{12A1} + M_{12A2} + M_{ГСА2} =$

$= \dfrac{M_1}{\lambda_H + i_{54}}\left(\lambda_H + i_{54} - (1-i_{13})(1-i_{54})\right)$ и имеет направление, совпадающее с направлением вращения входного звена *1*. Этот момент является опорным и определяет максимальный коэффициент трансформации исходя из условия равновесия водила *12*, при действии на него суммарного реактивного момента со стороны гидромотора.

Поток рабочей жидкости через выпускные окна гидронасоса *19* попадает в кольцевой канал *22* и через впускные окна гидромотора *18* – в его рабочие полости, образованные впадинами шестерен *6* и *7*. Крутящий момент на выходном валу гидромотора равен

(5) $$M_{ГМ} = \frac{p_H V_{ГМ}}{2\pi} = M_{ГН} i_г = -M_1(1-i_{13}) i_г = M_{7-7'} = \frac{M_{II}}{i_{7'8}},$$

где p_H – давление жидкости, МПа; $V_{ГМ}$ – рабочий объем гидромотора, м^3; $i_г = \dfrac{M_{ГМ}}{M_{ГН}} = \dfrac{V_{ГМ}}{V_{ГН}}$ – гидравлическое передаточное число; $M_{7-7'}$ – момент на выходном валу гидромотора, Н·м; M_{II} – момент на выходном валу вариатора, Н·м; $i_{7'8}$ – передаточное число зубчатого зацепления между шестернями *7'* и *8*.

При наличии сопротивления на выходном валу гидромотора возникают реактивные моменты на водиле, направленные в сторону, противоположную вращению входного вала. При подаче рабочей жидкости в рабочие полости зубчатого гидромотора с шестернями внутреннего зацепления с двумя и более сателлитами, так же как и в гидронасосе, возникают моменты сопротивления на шестернях *6* и *7*. При этом момент сопротивления на звене *6* определяет значение реактивного момента от гидромотора на водиле *12*, который равен $M_{12ГМ1} = -\dfrac{M_6^{'}}{r_6}(r_6 - r_7) = M_6^{'}(i_{67} - 1)$. При дальнейшей передаче крутящего момента с зубчатого венца *7'* на центральную солнечную шестерню *8* возникает реактивный момент, равный $M_{12ГМ2} = M_{ГМ}(1 - i_{7'8})$. Аналогично гидронасосу, в гидромоторе с шестернями внутреннего зацепления так же действует неуравновешенный гидростатический момент, образующийся давлением потока рабочей жидкости, направленный в сторону вращения входного вала и равный $M_{ГС2} = -M_{7-7'} i_{76}$. В результате действия этого момента суммарный реактивный момент со стороны гидромотора на водиле *12* уменьшается на эту величину и равен $\sum M_{12ГМ} = M_{12ГМ1} + M_{12ГМ2} + M_{ГС2} = M_1 i_{13} i_г \left[\dfrac{1-i_{67}}{\lambda_M + i_{67}} + 1 - i_{7'8} - i_{76}\right]$.

Передаточные числа кинематических звеньев вариатора определяются исходя из условия равновесия водила *12* при заданном коэффициенте трансформации $\sum M_{12} = \sum M_{12ГМ}$ или

$$\frac{\lambda_H + i_{54'} - (1-i_{13})(1-i_{54'})}{\lambda_H + i_{54'}} = i_{13} i_г \left[\frac{1-i_{67}}{\lambda_M + i_{67}} + 1 - i_{7'8} - i_{76} \right].$$

Водило *12*, являющееся общим для двух дифференциальных ступеней, при наличии момента сопротивления на выходном валу *8* $M_C = -M_{II}$, находится в состоянии равновесия и число оборотов его $n_{12} = 0$, а число оборотов выходного вала вариатора $n_{II} = \frac{n_I}{K}$ (*K* – коэффициент трансформации). При $|M_C| > |-M_{II}|$ разница моментов на водиле *12* воспринимается муфтой свободного хода *11*. При уменьшении числа оборотов выходного вала под действием нагрузки, превышающей расчетную, до $n_{II} = 0$ давление в кольцевой полости растет до величины давления срабатывания автоматического перепускного клапана *16* и разность расходов жидкости через гидронасос и гидромотор перетекает из кольцевого канала *22* во внутреннюю полость корпуса *20*. Ввиду значительного повышения температуры рабочей жидкости при перетекании ее через щели клапана *16* такой режим работы допускается кратковременно в процессе трогания транспортного средства с места.

При уменьшении нагрузки на выходном валу *II* реактивный момент на водило *12* со стороны гидромотора уменьшается, поток гидравлической мощности уменьшается в то время, как механический суммарный момент ΣM_{12}, образуемый работой дифференциальных ступеней A_1 и A_2, при постоянном числе оборотов входного вала *I* осуществляет передачу мощности по параллельному механическому потоку мощности. Разница между суммарным моментом и реактивным моментом приводит к вращению водила *12* в ту же сторону, что входной *I* и выходной *II* валы, и число оборотов выходного вала *II* возрастает от $n_{II} = \frac{n_I}{K}$ до $n_{II} = n_I$, что и определяет диапазон автоматического регулирования вариатора $i_{var} = 1/i_{зад} \div 1$. При этом происходит перераспределение потоков мощности по гидравлическому и механическому контуру и при $n_{II} = n_I$ вся мощность передается по механическому контуру.

Конструкция бесступенчатой коробки передач грузового автомобиля тягача. В качестве прототипа для расчета основных параметров высокомоментного гидромеханического вариатора, схема которого изображена на рисунке 1, был принят седельный тягач КАМАЗ-5460. Исходные данные для расчета:

- передаточное число первой ступени КП – 13,86;
- передаточное число высшей ступени КП – 0,84;
- максимальный момент двигателя 1470 Н·м;
- номинальная мощность двигателя 265 кВт;
- передаточное число главной передачи – 5,11;
- статический радиус колеса – 0,478 м.

Предварительный расчет показал, что для обеспечения максимального коэффициента трансформации необходимо значительно увеличить размеры корпуса вариатора, поэтому целесообразнее применять дополнительно к вариатору двухступенчатый демультипликатор, который к тому же обеспечивал бы наличие в трансмиссии ускоряющей передачи и движение задним ходом.

Расчет передаточных чисел демультипликатора необходимо проводить в следующей последовательности:

1. Определяем необходимое максимальное передаточное число трансмиссии для преодоления максимального дорожного сопротивления:

(6) $$U_{тр\max} = \frac{\psi_{\max} G_a r_к}{M_{e\max} \eta_{тр}},$$

где ψ_{max} – максимальный коэффициент дорожного сопротивления; G_a – полный вес автопоезда, Н; $r_к$ – кинематический радиус колеса, м; M_{emax} – максимальный крутящий момент двигателя, Н·м; $\eta_{тр}$ – КПД трансмиссии.

2. Определяем минимальное передаточное число трансмиссии для обеспечения движения автопоезда с максимальной скоростью:

(7) $$U_{тр\min} = 0{,}105\frac{n_V r_к}{V_{\max}},$$

где n_V – частота вращения коленчатого вала двигателя при движении с максимальной скоростью, об/мин; V_{max} – максимальная скорость движения автопоезда, м/с.

3. Задаем передаточное число ускоряющей передачи демультипликатора $U_{дв}$ и по значению $U_{трmin}$ определяем передаточное число главной передачи:

(8) $$U_0 = \frac{U_{тр\min}}{U_{дв}}.$$

4. Задаем максимальный коэффициент трансформации вариатора K_{max} исходя из максимально допустимых габаритных размеров корпуса КП и определяем передаточное число низшей ступени демультипликатора:

(9) $$U_{дн} = \frac{U_{тр\max}}{U_0 K_{\max}}.$$

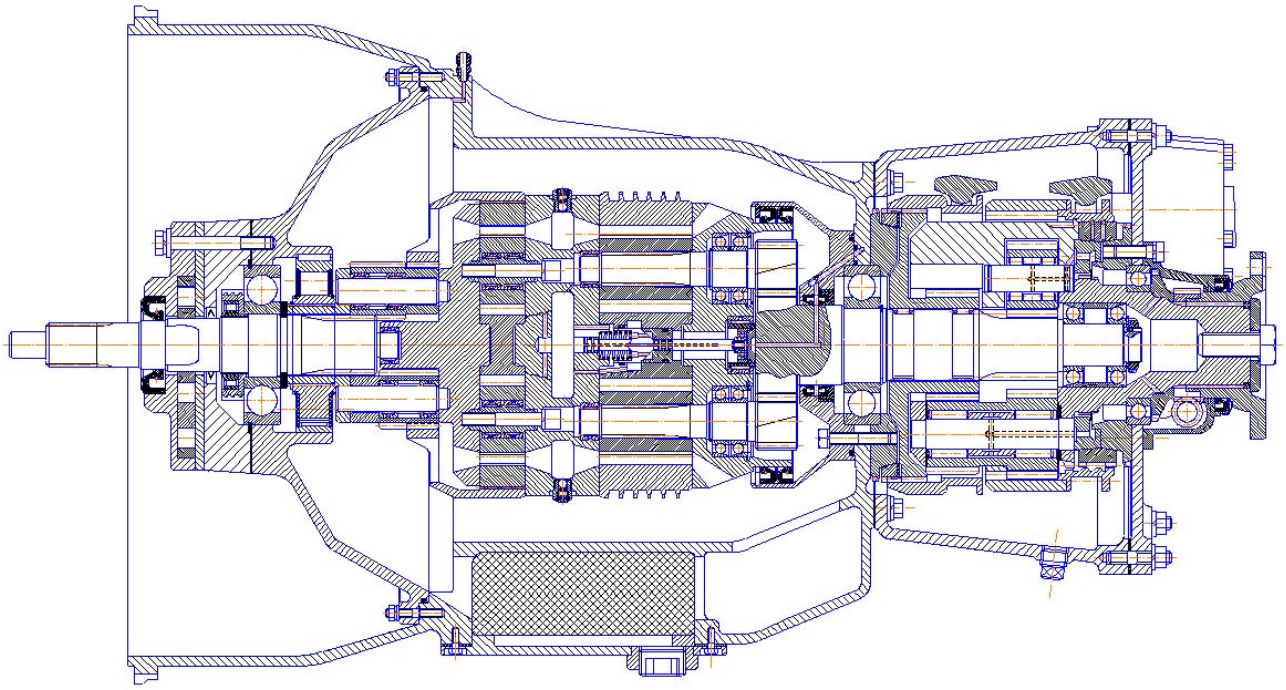


Рисунок 3 – Конструкция бесступенчатой автоматической КП автомобиля КАМАЗ-5460

Задавшись максимальным коэффициентом трансформации вариатора необходимо определить основные параметры кинематических звеньев вариатора. Расчет показал, что в заданные габаритные размеры существующей КП можно вписать высокомоментный гидромеханический вариатор со следующими параметрами:

- передаточное число дифференциального механизма на входе вариатора i_{13} = -3,0;
- передаточное число дифференциального гидронасоса $i_{4'5}$ = 0,31;
- передаточное число дифференциального гидромотора i_{67} = 3,55;
- передаточное число зубчатого зацепления на выходе гидромеханического вариатора $i_{7'8}$ = -2,29;
- гидравлическое передаточное число $i_г$ = 0,766;

- модуль гидронасоса $m_н$ = 6,0 мм;
- модуль гидромотора $m_м$ = 6,0 мм;
- ширина зубьев гидронасоса $b_н$ = 43 мм;
- ширина зубьев гидронасоса $b_м$ = 92 мм;
- передаточное число понижающей передачи демультипликатора $U_{дн}$ = 1,95;
- передаточное число повышающей передачи демультипликатора $U_{дв}$ = 0,84;
- передаточное число главной передачи U_0 = 5,11.

Конструкция бесступенчатой коробки передач с высокомоментным гидромеханическим вариатором седельного тягача КАМАЗ-5460 представлена на рисунке 3.

Заключение. Сравнительный анализ состава конструкций автоматических коробок передач, клиноцепных и торроидных вариаторов, выпускаемых современной автомобильной промышленностью разных стран, показывает высокую степень конструкторско-технологической преемственности по отношению к существующему производству зубчатых передач и гидромашин, высокую степень унификации, значительно меньшую стоимость материалов и трудозатрат и, соответственно, гораздо более низкую стоимость.

В автомобилестроении высокомоментные дифференциальные гидромеханические вариаторы, используемые в качестве автоматических трансмиссий грузовых автомобилей, при совместной работе с двигателем позволяют последнему, при изменяющейся во всем диапазоне внешней нагрузке, работать в области режима равных мощностей, что приводит к оптимальной степени использования мощности и, соответственно, к значительному уменьшению расхода топлива. Достигаемые технические результаты обуславливают многофункциональное использование предлагаемого изобретения во всех областях машиностроения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Башта Т.М., Руднев С.С., Некрасов Б.Б. и др.* Гидравлика, гидромашины и гидроприводы. - М.: Машиностроение, 1982. - 423 с.

2. *Гуськов В.В.* Гидропневмоавтоматика и гидропривод мобильных машин. Объемные гидро- и пневмомашины и передачи. - Мн.: Высшая школа, 1987. 310 с.

3. *Кожевников С.Н.* Теория механизмов и машин. - М.: Машиностроение, 1969. - 584 с.

4. *Волошко В.В., Мавлеев И.Р.* Анализ распределения силового потока в зубчатых гидромашинах // Проектирование и исследование технических систем. – Выпуск 10. - 2007. – С. 137-144.

5. *Волошко В.В., Мавлеев И.Р.* Патент на изобретение №2298125 (РФ). Дифференциальный гидромеханический вариатор, 2007, №12.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Ф. Д. Байрамовым.
Поступила в редакцию 16.02.09 г.

УДК 629.113

ШЕСТНАДЦАТИСТУПЕНЧАТАЯ КОРОБКА ПЕРЕМЕНЫ ПЕРЕДАЧ ДЛЯ ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ БОЛЬШОЙ ГРУЗОПОДЪЕМНОСТИ

В.В. Волошко, А.Р. Кашапов
Камская государственная инженерно-экономическая академия

Проведен анализ существующих конструкций коробок перемены передач автомобилей большой грузоподъемности и авторами предложена конструкция коробки передач с применением дифференциальной конструкции делителя и демультипликатора с интегрированной в нем задней передачей планетарного типа.

Введение. Рост грузооборота автомобильного транспорта, расширение междугородних и международных перевозок, необходимость снижения себестоимости автотранспортных работ обуславливают потребность в дальнейшем расширении типажа, совершенствовании конструкции и увеличении выпуска автомобилей и автопоездов большой грузоподъемности с полной массой 16…52 тонны. Создание таких транспортных средств с высокими технико-экономическими показателями является сложной научной задачей.

Одним из важнейших узлов автомобиля, влияющих на технико-экономические показатели (топливно-экономические; тягово-динамические; срок службы двигателя и трансмиссии; комфортабельность и безопасность движения; легкость и простота управления), является коробка перемены передач.

Основная часть. Наибольшее распространение на автомобилях большой грузоподъемности получили коробки передач третьего поколения «Экосплит» фирмы «Цанрадфабрик».

С начала производства коробок передач «Экосплит» в 1979 году более 1000000 автомобилей были оборудованы коробками передач этого типа. Для закрепления успеха происходило дальнейшее совершенствование и в результате коробка передач «ЦФ – Экосплит» стала легче и компактнее, менее шумной, имеющей лёгкое переключение передач и поэтому выгодно отличается от продукции других фирм.

Одной из коробок передач серии «Экосплит» является 16-ступенчатая коробка передач ZF16S151, которая состоит из следующих основных узлов: основного четырехступенчатого редуктора, переднего двухступенчатого делителя передач и демультипликатора. Все передачи переднего хода в основном редукторе включаются синхронизаторами, задняя передача зубчатой муфтой. Демультипликатор – планетарный, автоматически переключается с помощью пневматического клапана муфтовым синхронизатором при перемещении рычага переключения передач от положения низшего диапазона к положению высшего диапазона.

Конструкция коробки перемены передач ZF16S151 имеет недостатки, заключающиеся в интенсивном износе синхронизатора делителя при его переключении, который срабатывает в четыре раза чаще, чем каждый синхронизатор основной коробки, в разрыве потока мощности в результате выключения сцепления при переключении делителя, и соответственно, в уменьшении коэффициента использования мощности двигателя, в интенсивном износе сцепления, в уменьшении КПД коробки и комфортабельности.

С целью устранения указанных недостатков, а также для уменьшения габаритов и веса коробки перемены передач произведена разработка конструкции коробки перемены передач, с измененными конструкциями делителя и демультипликатора.

Изменение конструкции коробки перемены передач осуществлено за счет использования в конструкции делителя дифференциального механизма с положительным внутренним передаточным числом, меньшим единицы, а также замены демультипликатора коробки прототипа на демультипликатор с интегрированной в ней планетарной задней передачей, разработанный с использованием патентов РФ – RU 2253781 C2; RU 2254507 C2 (патентовладелец - Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт) . На рисунке 1 изображена разработанная авторами 16-ступенчатая коробка передач для грузовых автомобилей большой грузоподъемности.

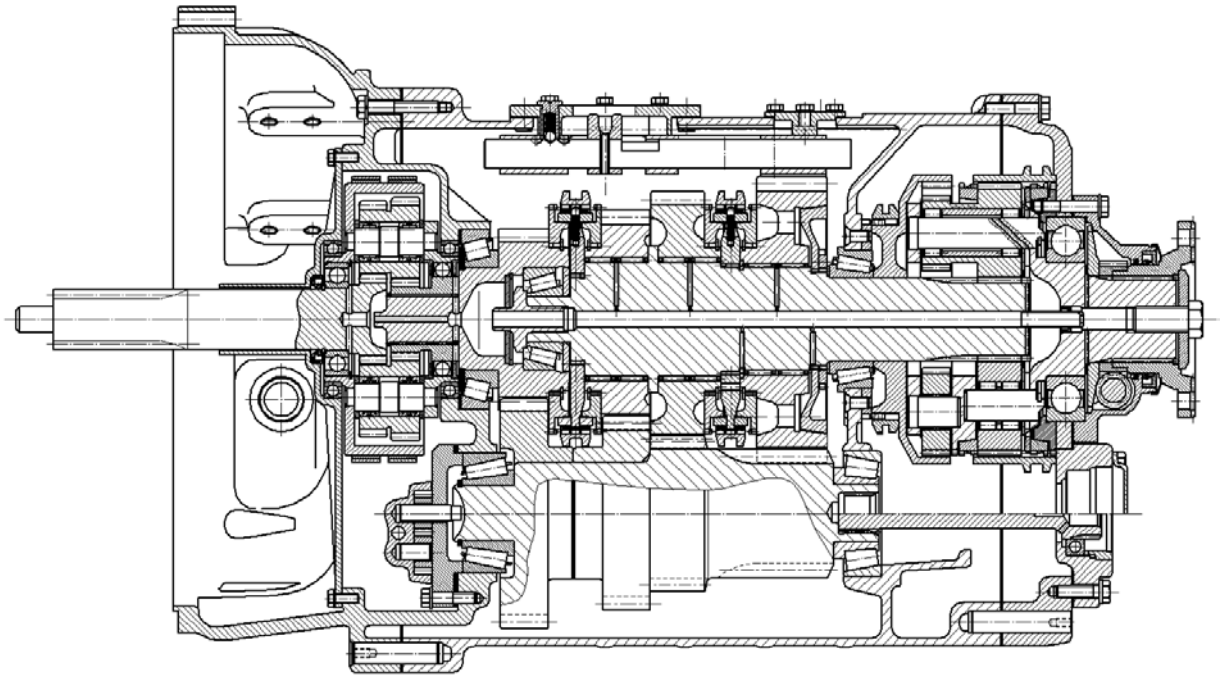


Рисунок 1 – Шестнадцатиступенчатая коробка перемены передач

Использование в качестве делителя ускоряющего дифференциального механизма с внутренним положительным передаточным числом 0,75…0,85 создает следующие преимущества:

1. Дифференциальный механизм при ведущем солнечном колесе самоблокируется и осуществляет передачу крутящего момента на выходном валу, равном моменту на входном, что подстраховывается работой муфты свободного хода, установленной между водилом и выходным солнечным колесом и не допускающей проскальзывание входного и выходного валов.

2. При переключении передач отпадает необходимость выключения сцепления, так как само переключение осуществляется торможением водила дифференциального механизма.

3. Переключение происходит без разрыва потока мощности, плавность переключения осуществлена регулировкой скорости торможения с помощью последовательного включения двух ленточных тормозов с пневматическим приводом.

4. Плавное быстрое переключение передач крайне важно при эксплуатации автомобиля на несвязанных грунтах.

5. Быстрота переключения обуславливается временем срабатывания пневматического привода ленточных тормозов, при котором осуществляется гашение инерции вращающихся валов и шестерен КПП и одновременное изменение крутящего момента на выходном звене делителя.

6. Ленточные тормоза преодолевают необходимую величину крутящего момента, равную 0,15-0,25$М_{дв}$, а при переходе от высшей к низшей передаче – дополнительным $М_{ин}$ от сил инерции вращающихся деталей КПП.

7. Уровень давления воздуха в приводе системы управления коробки перемены передач не превышает 0,5-0,7МПа. ввиду небольшой величины тормозных сил.

8. Уменьшаются габаритные размеры и вес коробки перемены передач за счет укорочения промежуточного и вторичного валов основной коробки более чем на 100 мм, а также за счет изменения конструкции демультипликатора.

Демультипликатор с интегрированной в нем планетарной задней передачей в отличие от прототипа и демультипликатора по патентам РФ – RU 2253781 C2; RU 2254507 C2, которые имеют две передачи (пониженная, прямая), реализует три передачи (пониженная, прямая, задняя) и дает следующие преимущества:

1. Демультипликатор, в котором переключение передач осуществляется за счет замыка-

ния коронного колеса на корпус коробки передач или на водило, по сравнению с демультипликатором, который используется в коробке перемены передач фирмы «Цанрадфабрик», имеет меньшие габаритные размеры с соответствующим уменьшением веса коробки передач.

2. Интегрированная в демультипликатор задняя передача уменьшает осевой размер коробки передач, увеличивает количество задних скоростей, что позволяет более рациональный выбор задней передачи при движении автомобиля по несвязанным поверхностям (песок, снег, грязь), при одновременном увеличении надежности и долговечности и, как следствие, позволяет расширить типаж автомобилей, в которых может быть применена данная коробка передач.

Осевой габарит разработанной коробки передач, равный 756 мм, на 16% меньше, чем у аналогичной коробки передач ZF 16S151 фирмы «Цанрадфабрик», имеющей осевой габарит 900 мм.

Заключение. В результате изменения конструкции коробки перемены передач прототипа достигнут технический результат, целью которого являлось улучшение топливно-экономической и тягово-динамической характеристик, повышение срока службы трансмиссии и двигателя, комфортабельность и безопасность движения, легкость и простота управления, уменьшение габаритного размера и веса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин: учеб. для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: «Наука», 1988. – 640 с.

2. Конструирование и расчет автомобиля */ П.П.Лукин, Г.А.Гаспарянц, В.Ф.Родионов.* – М.: Машиностроение, 1984. – 376 с.

3. *Косенков А.А.* Устройство автоматических коробок передач и трансмиссий. – Ростов н/Д.: Феникс, 2003. – 416 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Ф. Д. Байрамовым.
Поступила в редакцию 16.02.09 г.

УДК 629.113

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ВОСЬМИСТУПЕНЧАТАЯ КОРОБКА ПЕРЕДАЧ ДЛЯ ПЕРЕДНЕПРИВОДНОГО ЛЕГКОВОГО АВТОМОБИЛЯ

В.В. Волошко, Р.А. Фокин
Камская государственная инженерно-экономическая академия

Проведен анализ существующих конструкций планетарных коробок передач, предложена разработанная авторами восьмиступенчатая планетарная коробка передач для легкового автомобиля с применением универсального многопоточного дифференциального механизма (УМДМ).

Введение. Современные автоматические коробки передач (АКП) легковых автомобилей имеют тенденцию к увеличению количества ступеней и одновременному уменьшению количества управляемых элементов. Увеличение количества ступеней вызвано стремлением приблизить тяговую характеристику автомобиля к идеальной (бесступенчатой) и обеспечить лучшие скоростные и экономические показатели. Уменьшение количества управляемых элементов обусловлено необходимостью снижения металлоемкости, упрощения системы управления АКП и становится возможным благодаря подбору более совершенных кинематических схем, реализующих большее количество ступеней при меньшем количестве управляемых элементов.

Основная часть. В проблемной лаборатории ИНЭКА разработана автоматическая восьмиступенчатая коробка передач для переднеприводного автомобиля малого класса. Данная АКП имеет восемь передач переднего хода и две передачи заднего. Современное автостроение предусматривает повышение числа ступеней заднего хода до 2-х с целью обеспечения выбора более высокой передачи при движении автомобиля задним ходом по дороге с несвязанной поверхностью (например, АКП фирмы Мерседес). Основным достоинством разработанной АКП является реализация восьми ступеней переднего хода при малом количестве управляемых элементов, большинство из которых являются неподвижными управляемыми элементами.

Все планетарные коробки передач принято классифицировать по количеству степеней свободы, которыми они обладают. По числу степеней свободы в выключенном положении АКП подразделяются на коробки с двумя, тремя и четырьмя степенями свободы.

Для получения вполне определенного передаточного числа в коробке передач необходимо иметь только одну степень свободы. Все остальные должны быть сняты путем наложения связей.

Следовательно, число степеней свободы коробки передач равно числу наложенных связей плюс единица.

В настоящее время используются трехстепенные и четырехстепенные АКП.

С точки зрения управления наиболее предпочтительными являются планетарные коробки передач с двумя степенями свободы, поскольку в этом случае при переключении передачи нужно выключить один элемент управления и включить один элемент управления. Но в этом случае каждый элемент управления можно использовать только на одной передаче и, следовательно, число передач должно быть равно числу элементов управления. Кроме того, в коробке передач с двумя степенями свободы количество планетарных рядов должно быть равно количеству передач, реализуемых этой коробкой, без учета прямой передачи.

В планетарной коробке передач с тремя и четырьмя степенями свободы один и тот же элемент управления используют на нескольких передачах. Но использование АКП с четырьмя степенями свободы предполагает увеличение числа планетарных рядов свыше трех, что ведет к усложнению конструкции и системы управления, так как необходимо включать одновременно три элемента управления.

В таблице 1 приведено минимально необходимое количество элементов управления для заданного числа передач.

Таблица 1 – Минимальное необходимое количество элементов управления

Число степеней свободы	Минимальное число элементов управления ПКП при числе передач								
	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Две	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Три	4	4	4	5	5	5	5	6	6
Четыре	4	5	5	5	5	5	5	6	6

Из анализа таблицы 1 следует, что ПКП с двумя степенями свободы более перспективны при числе $Z \leq 4$. Здесь при одинаковом количестве элементов управления обеспечивается более простая конструкция механизма управления ПКП.

При числе $Z > 4$ ПКП с тремя степенями свободы являются более приемлемыми, так как позволяют использовать минимальное количество фрикционных элементов при допустимом усложнении системы управления.

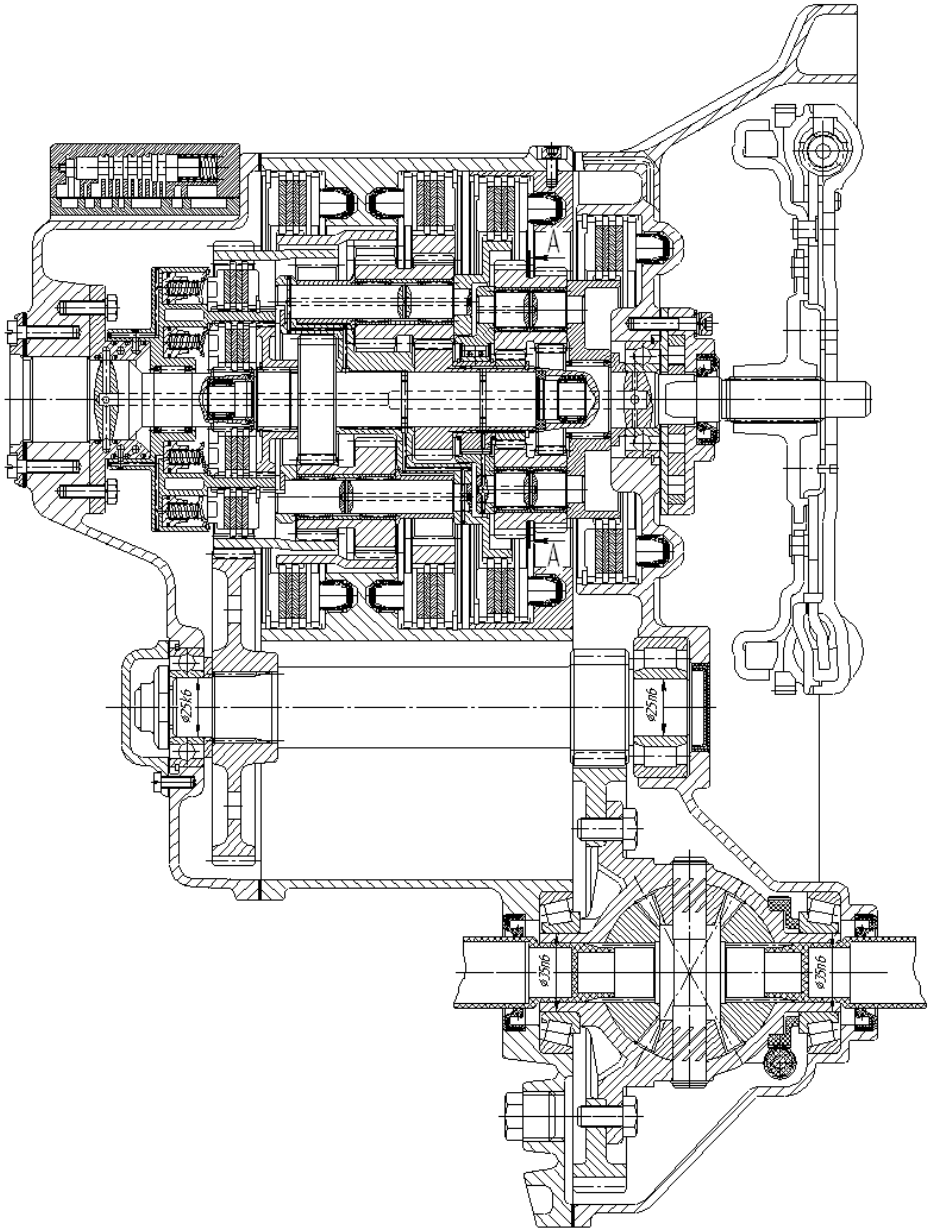


Рисунок 1 – Автоматическая восьмиступенчатая коробка передач для переднеприводного легкового автомобиля

Разработанная АКП представляет из себя универсальный многопоточный дифференциальный механизм в сочетании с дифференциальным делителем, удваивающим количество передач, реализуемых УМД, и при блокировке обеспечивающим прямую и повышенную передачи.

В отличие от схем, предложенных в [2], в разработанной АКП решено было отказаться от синхронизатора, который увеличивает диапазон и удваивает количество передач. Его роль выполняет упомянутый дифференциальный делитель. Преимущества дифференциального делителя перед синхронизатором очевидны: он уменьшает осевые габариты АКП, позволяет уменьшить время переключения передач, легче поддается автоматизации переключения, позволяет автоматически переключать передачи последовательно с первой по восьмую, что делает возможным более рациональным выбор любой из восьми передач, подходящей для данных условий движения, в то время как в схеме с синхронизатором необходимо предварительно выбрать диапазон работы АКП (повышающий или понижающий) и лишь затем осуществляется автоматическое переключение в рамках заданного диапазона, т. е. выбрать можно только из четырех передач любого диапазона.

Кроме того, по сравнению с АКП для заднеприводного автомобиля, предложенной в [2], разработанная АКП имеет меньшее количество элементов управления – шесть против семи.

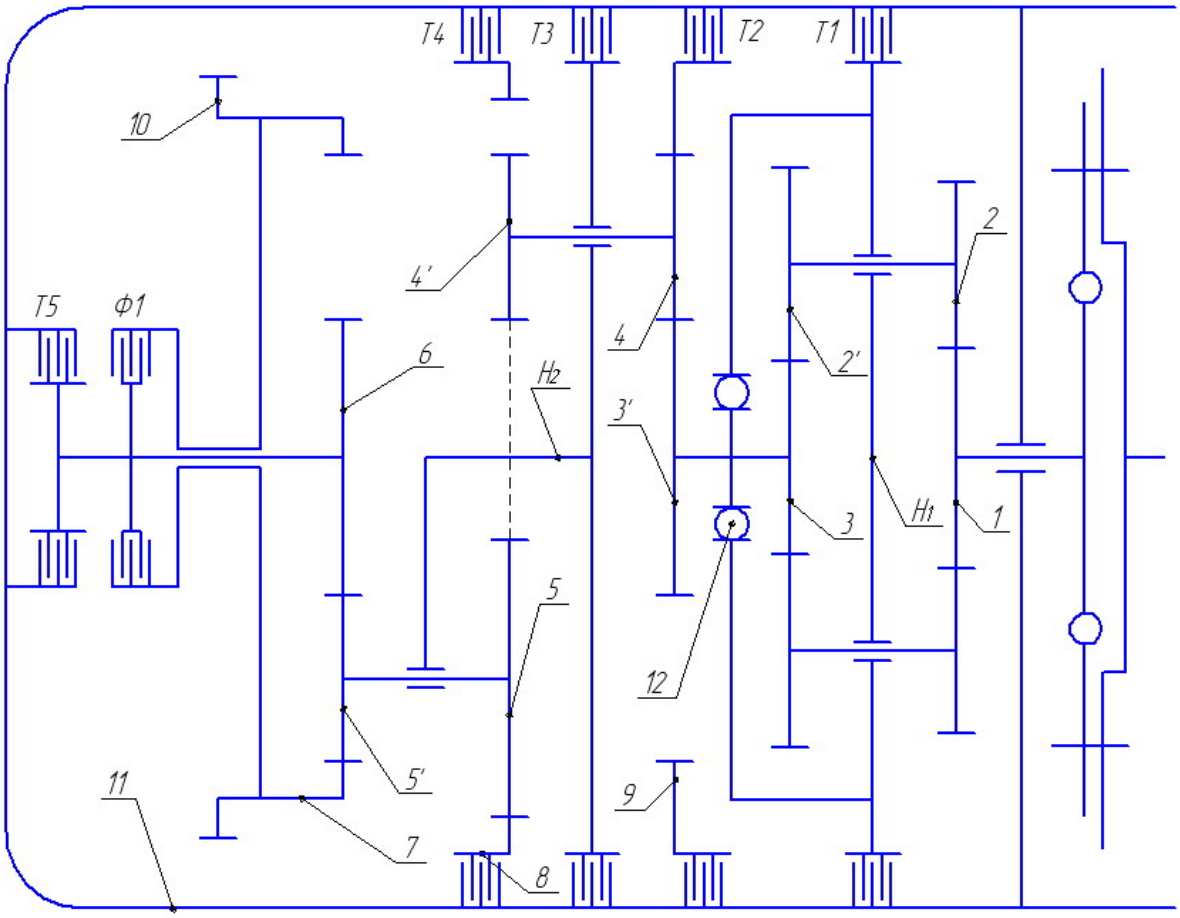


Рисунок 2 – Кинематическая схема коробки передач на основе УМДМ

Настоящая АКП характеризуется переменным числом степеней свободы. УМДМ имеет две степени свободы, т. е. для получения закона движения необходимо включить один элемент управления. При задействованном тормозе Т1 дифференциального делителя и одним из тормозов Т2,Т3,Т4,Т5 или блокирующей муфты Ф1 число степеней свободы равно трём, число одновременно задействованных элементов управления – два, при отпущенном

тормозе Т1 и включении одного из вышеуказанных тормозов или блокирующей муфты Ф1- число степеней свободы равно двум и, соответственно, число одновременно включенных элементов равно единице.

Разработанная АКП содержит картер 11, входное звено 1, выходное звено 10, одну фрикционную блокирующую муфту Ф1, пять фрикционных тормозов Т1, Т2, Т3, Т4, Т5, универсальный многопоточный дифференциальный механизм, состоящий из звеньев 3^1,4-4^1,5-5^1,6 и водила Н2, дополнительный повышающий планетарный ряд (делитель) с положительным внутренним передаточным отношением, меньшим единицы, который состоит из ведущей солнечной шестерни 1, водила Н1 с двухвенцовыми сателлитами 2-2', выходной солнечной шестерни 3 и муфты свободного хода (МСХ) 12, установленной между солнечной шестерней 3 и водилом Н1.

При включенном тормозе Т1 останавливается водило Н1 и выходное звено 3 делителя вращается с числом оборотов более высоким, чем число оборотов входного звена 1 АКП соответственно внутреннему передаточному числу делителя. При отключении тормоза Т1 муфта сводного хода (МСХ) автоматически блокирует делитель и выходное звено 3 вращается с числом оборотов входного звена 1 АКП.

Включение блокирующей фрикционной муфты Ф1 осуществляет блокирование УМЛМ, что обеспечивает его вращение как жёсткий вал совместно с выходным валом делителя 3-3^1 на прямой и повышающей передачах.

В конструкции АКП также предусмотрено применение двухмассового маховика, что позволяет полностью исключить передачу от двигателя в АКП высокочастотных колебаний, вызываемых неравномерностью вращения коленчатого вала.

В таблице 2 показана последовательность включения элементов управления АКП при переключении передач.

Таблица 2 – Последовательность включения элементов управления АКП при переключении передач

Пере-дача	Передаточное число	Заторможенные звенья					
		Т1	Т2	Т3	Т4	Т5	Ф1
1	3,625			X			
2	2,719	X		X			
3	2,071		X				
4	1,813					X	
5	1,554	X	X				
6	1,359	X				X	
7	1,000						X
8	0,750	X					X
з. х. 1	4,250				X		
з. х. 2	3,438	X			X		

Применение только фрикционных тормозов позволяет снизить расход масла в системе управления за счет исключения потерь масла в зазорах между вращающимися звеньями при подводе масла к фрикционной блокирующей муфте. Во фрикционных тормозах управляющий бустер неподвижен относительно картера АКП, что абсолютно исключает потери расхода масла. При этом снижается мощность, отбираемая у двигателя на подачу масла под давлением в гидросистему АКП. Это дает возможность установить масляный насос меньшей мощности, т. е. фактически увеличить коэффициент использования мощности автомобиля. Кроме того, в виду неподвижности фрикционных тормозов исключается влияние центробежной силы на закон нарастания силы давления на фрикционные накладки, т.е. увеличивается плавность включения управляемых элементов, а, следовательно, и

плавность хода автомобиля.

Заключение. Разработанная АКП имеет высокие значения КПД на всех передних передачах (0,945-0,965) и приемлемые КПД на задних передачах (0,91-0,92). Высокий КПД обеспечивается благодаря рациональной кинематической схеме, при которой поток мощности разделяется на два потока: часть мощности передает водило УМДМ, осуществляющее переносное движение и имеющее КПД, близкий к единице, и часть мощности передается короткими кинематическими цепями в относительном движении. Современные методы обработки шестерен позволяют достичь КПД зубчатого зацепления 0,985 (шлифованные шестерни), поэтому КПД разработанной АКП близок к КПД, развиваемому механическими коробками передач.

Таким образом, разработанная АКП позволяет улучшить технико-экономические показатели автомобиля, благодаря вышеназванным преимуществам по сравнению с существующими АКП, а также обеспечивает общие преимущества, характерные для автоматических коробок передач: удобство управления автомобилем, высокая плавность хода и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Косенков А.А.* Устройство автоматических коробок передач и трансмиссий. – Ростов-на-Дону: Изд-во Феникс. 2003. – 416 с.

2. *Харитонов С.А.* Автоматические коробки передач. – М.: Изд-во Астрель АСТ. 2003. – 335 с.

3. *Волошко В.В., Тумреев В.Ю.* Универсальный дифференциальный механизм в качестве схемы ступенчатой автоматической коробки передач // Межвуз. научный сб. «Проектирование и исследование технических систем».– Наб.Челны: Изд-во КамПИ.– 2005.– Вып. 6. С. 112-118.

4. *Волошко В. В., Салахов И. И.* Автоматические коробки передач на базе универсального многопоточного дифференциального механизма, // Межвуз. научный сб. «Проектирование и исследование технических систем». – Наб.Челны: Изд-во ИНЭКА.– 2007. – Вып. 10. – С. 82-86.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Ф. Д. Байрамовым.
Поступила в редакцию 16.02.09 г.

УДК 621.836:681.518.54 (04)

РАЗРАБОТКА КОНЦЕНТРАТОРА МИКРОЗАГРЯЗНЕНИЙ КАРТЕРНОГО МАСЛА ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ОБКАТКИ ДВИГАТЕЛЯ

В.А. Чивилихин, Ф.Г. Карих, *д.т.н.;* Р.А. Арслангараев
Камская государственная инженерно-экономическая академия

Дано описание устройства и принципа работы концентратора микрозагрязнений машинного масла. Его использование позволяет проводить контроль износа трущихся пар механизмов по степени загрязнения масла элементами узлов трения в процессе их эксплуатации.

Введение. Существующие методы контроля износа трущихся пар при диагностике состояния двигателя в процессе стендовых испытаний основаны на использовании спектрального анализа обкаточного масла. При этом прямое определение состава загрязнений в таком масле позволяет определить лишь степень его суммарного загрязнения контролируемыми элементами без привязки к конкретной трущейся паре. Такая ограниченность возможностей спектрального анализа обусловлена низкой чувствительностью используемых методов при определении низких концентраций контролируемых микрозагрязнений.

Основная часть. В данной работе эта проблема решается путем концентрирования микроэлементов, загрязнивших обкаточное масло, путем разработки концентратора микрозагрязнений картерного масла. Концентрирование загрязнений в обкаточном масле позволяет обеспечить контроль содержания микроэлементов с привязкой к конкретной трущейся паре. Концентрирование достигается решением ряда задач, основными из которых являются:

– обеспечение монодисперсности получаемых аэрозолей;

– обеспечение полноты испарения монодисперсного аэрозоля;

– обеспечение полноты сбора частиц сухого остатка с учетом их возможных потерь в каждой из фракций продуктов конденсата (вода, эфиры, смолы, битумы) в камере охлаждения.

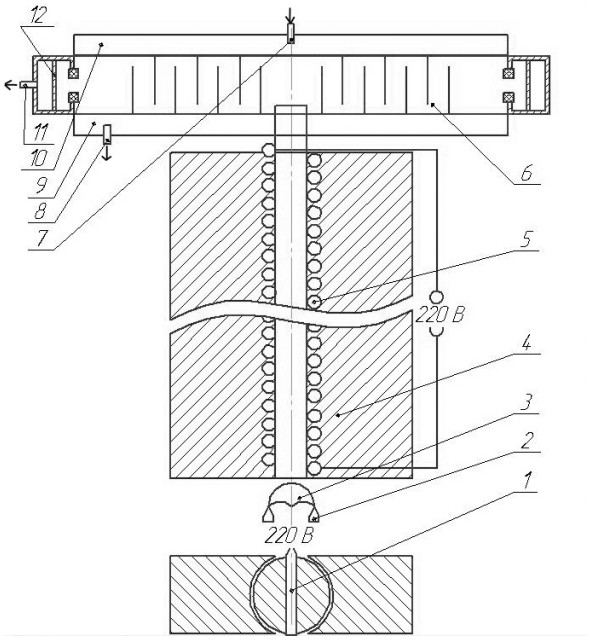
Первая задача решается выбором оптимального способа получения аэрозоля. Наиболее широкое распространение в технике получения аэрозолей получили пневматические, центробежные, ультразвуковые и струйные способы. Пневматические, как и центробежные способы, не обеспечивают монодисперсность частиц аэрозоля. Ультразвуковые характеризуются сложностью техники получения аэрозоля. Струйные характеризуются сложностью предотвращения переохлаждения отдельных зон плазмохимического реактора. Наиболее высокую монодисперсность и распределение частиц в реакторе обеспечивает струйно-центробежный.

Поэтому решение второй задачи обеспечивается применением струйно-центробежной подачи аэрозоля в осевом направлении реактора. С целью снижения энергетического расхода в реакторе рационально введение в него уже воспламененного аэрозоля, что достигается использованием высоковольтного факельного разряда, отличающегося, например, от дугового разряда постоянного тока более обширной плазменной зоной.

Полнота сбора продуктов, получаемых в плазмохимическом реакторе, осуществляется в камере охлаждения, где реализуется конденсация всех фракций. Обеспечено эффективное охлаждение верхней поверхности нижней полости холодильной камеры, предотвращающее наличие газовых прослоек.

Возможные потери частиц сухого остатка в продуктах конденсата требуют использования спектральных методов контроля состава микрозагрязнений во всех образующихся жидких фракциях[1]. Контроль основной массы частиц сухого остатка, осажденных на фильтре, осуществляется посредством его последующего озоления [2]. Возможные потери частиц, уносимых отходящими газами, контролируются методом [3].

Вариант разработанного концентратора схематически представлен на рис. 1.



1 – струйно-центробежная форсунка [4];
2 – электроды;
3 – высоковольтный факельный разряд [5];
4 – плазмохимический реактор с резистивным нагревателем [6];
5 – нихромовый нагреватель;
6 – камера охлаждения;
7 – штуцер ввода воды;
8 – штуцер сброса воды;
9 – нижняя полость системы охлаждения;
10 – верхняя полость системы охлаждения;
11 – газоотвод;
12 – фильтр

Рисунок 1 - Концентратор микрозагрязнений картерного масла

Концентратор микрозагрязнений картерного масла рассчитан на подачу масла через струйно-центробежную форсунку 1, образующую поток аэрозоля. При использовании высоковольтного факельного разряда 2 в качестве поджига потока аэрозоля 3 обеспечивается прогрев и воспламенение частиц аэрозоля, направляемых в плазмохимический реактор 4 аксиально оси плазменного потока, где полнота осушения частиц масла реализуется посредством нихромового нагревателя 5. Продукты конденсации масла, собираемые в камере охлаждения 6, подвергают спектроаналитическому контролю [1], как и твердые частицы, осаждаемые на фильтре 7, пиролизуемом в процессе озоления. Масса твердых частиц, собранных на фильтре, в зависимости от марки масла, содержащего различные присадки, и степени загрязнений, матричным элементом которых является железо, находится в интервале от 15-20 мг до 100-200 мг при подаче в концентратор двух граммов масла. При этом учет содержания элементов, являющихся компонентами присадок, позволяет оценить качество обкатки по концентрации железа. Контроль изменения соотношения железа и элементов присадок, возможное в осевших частицах в продуктах конденсата и унесенных отходящим газом, обеспечивает правильность измерений степени износа трущихся пар. Проходящие через фильтр 7 газы направляют в газопровод 8, связанный со спектроаналитическим оборудованием, для контроля возможных микрозагрязнений, уносимых из камеры охлаждения потоком отходящего газа.

Вид концентратора совместно с используемой спектроаналитической установкой, позволяющей контролировать состав отходящих газов в реальном времени, показан на рис. 2.

Рисунок 2

Заключение. Совместное решение указанных задач позволяет оптимизировать параметры установки по осушению аэрозоля с возможностью разработки концентратора микрозагрязнений картерного масла. Разработанный концентратор микрозагрязнений позволяет отделять элементы присадок и продукты износа трущихся деталей в виде частиц сухого остатка. Отделение масла, являющегося растворителем продуктов износа, обеспечивает повышение чувствительности спектрального анализа по определению содержания контролируемых микроэлементов на несколько порядков.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кюрегян С. К.* Атомный спектральный анализ нефтепродуктов. - М.: Химия, 1985. - 320 с.
2. *Тёрёк Т., Мика Й., Гогуш Э.* Эмиссионный спектральный анализ. Часть 2. – Мир, 1982. - 464 с.
3. *Пат. №2090867 РФ*. МКИ 6 G 01 21/85. – Способ спектроаналитического определения состава дымов. / *Карих Ф.Г., Карих А.Ф.* (РФ). – 94028135/25. Заяв. 18.07.94. Опубл. 21.12.97. Бюл. №26 // Открытия. Изобретения. 1997. № 26. С. 73.
4. *Карих Ф.Г., Чивилихин В.А., Арслангараев Р.А.* Гидродинамика разрушения струи обкаточного масла при использовании струйно-центробежной форсунки // Материалы межвузов. научно-производ. конф. г. Наб. Челны, 2008. - С. 43-46.
5. *Пат. № 2085871 РФ.* МКИ 6 G 01 J 3/10. – Устройство для возбуждения спектра. / *Карих Ф.Г.* (РФ). – 94000909/25. Заявлено 10.01.94. Опубл. 11.12.97. Бюл. 21 //Открытия. Изобретения. 1997. - С. 352.
6. *Гарифзянов Г.Г., Гарифзянова Г.Г.* Выделение редких металлов при плазмохимическом пиролизе нефтяных остатков // Химия и технология топлив и масел. - 2006. - № 2. - С. 24-25.

Статья представлена к публикации членом редколлегии М.П. Соколовым.
Поступила в редакцию 11.03.09 г.

УДК 629.113

ОЦЕНКА ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОПОРНЫХ РЕАКЦИЙ НА ВЕДУЩИХ КОЛЁСАХ АВТОМОБИЛЕЙ

А.Ю. Барыкин, *к.т.н.*
Камская государственная инженерно-экономическая академия

Предложена расчётная методика для определения вертикальных реакций на ведущих колёсах для случаев движения по косогору или переезда через препятствие. Приведены экспериментальные данные, подтверждающие достоверность метода.

Введение. Значения вертикальных реакций на ведущих колёсах являются одними из определяющих факторов при оценке возможности реализации тяговых сил в различных условиях движения. Однако вопросы изменения реакций при поперечном крене автомобиля являются малоисследованными, что требует разработки достоверной методики расчёта вертикальных сил в контакте колеса с опорной поверхностью.

И.А. Левиным в работе [1] указывалось на целесообразность исследования влияния перераспределения опорных реакций в различных условиях движения на блокирующие свойства трансмиссии. Позднее С.А. Шуклин в работе [2] отметил необходимость учёта перераспределения веса по колёсам из-за бокового крена и реального соотношения коэффициентов сцепления при расчёте коэффициента блокировки. Им была предложена следующая формула для предварительного определения коэффициента блокировки, исходя из практических условий реализации максимальных сил сцепления колёс с грунтом:

$$k_б = k_n \cdot \frac{\varphi^* + f_k^{0*}}{\varphi^{**} + f_k^{0**}},$$

где $k_n = G_k^* / G_k^{**}$ - коэффициент перераспределения веса по колёсам моста (в [2] рекомендовано принимать $k_n = 1{,}5...2{,}0$; φ - коэффициент сцепления; f_k^0 - коэффициент сопротивления качению в ведомом режиме колеса).

А.И. Гришкевич в книге [3] приводит характерные значения коэффициентов перераспределения реакций между осями, находящиеся в пределах 1,05…1,6 для случаев разгона с максимальным ускорением, преодоления предельных подъёмов, торможения на спуске. Следует отметить, что для перераспределения реакции между колёсами одной оси С.А. Шуклин в [2] приводит бóльшие значения (указаны выше), что указывает на важность учёта последних. Предварительный анализ приведенных допущений показывает, что их совокупность может оказать значительное влияние на величину определяемого целесообразного $k_б$.

Кроме того, учёт перераспределения реакций в [2] является, по определению самого автора работы, предварительным и не проверяемым аналитически. Диапазон значений коэффициента перераспределения веса по колёсам, предложенный в [2], подтверждает необходимость качественной оценки влияния различных факторов воздействия.

Рассмотрим изменение вертикальных реакций R_z в общем случае (рис. 1). Реакция на загруженном колесе для автомобиля, движущегося по косогору (переезжающего одним из колёс через единичное препятствие) и находящегося под воздействием других, перечисленных выше факторов, определится по формуле:

$$R_{z1}^{\Sigma} = R_{z1} + \Delta R_{z1}^{кос} \pm \Delta R_{z1}^{цб\Sigma} \pm \Delta R_{z1}^{аэро\Sigma} \pm \Delta R_z^{\alpha} \pm \Delta R_z^{дин}, \quad (1)$$

где R_{z1}^{Σ} - вертикальная статическая реакция на колесе моста для автомобиля, находящегося на горизонтальной поверхности, без учёта внешних воздействий; $\Delta R_{z1}^{кос}$ - изменение реакции вследствие движения по косогору или наезда на пороговое препятствие; $\Delta R_{z1}^{цб\Sigma}$ - изме-

нение реакции вследствие поворота или движения по криволинейной траектории; $\Delta R_{z1}^{аэро\Sigma}$ - суммарное изменение реакции вследствие движения в воздушной среде; ΔR_z^{α} - изменение реакции вследствие движения на подъём или спуск; $\Delta R_z^{дин}$ - изменение реакции вследствие движения с ускорением (замедлением).

Две последние составляющие одинаковы для колёс одного моста и характеризуют перераспределение нагрузок между мостами. Поэтому их можно не учитывать при расчёте коэффициента блокировки межколёсного дифференциала. Их следует принимать во внимание для нахождения точного значения вертикальной реакции на колесе, а также при расчёте коэффициента блокировки межосевого дифференциала [4].

Соответственно, для разгруженного колеса:

$$R_{z2}^{\Sigma} = R_{z2} - \Delta R_{z2}^{кос} \mp \Delta R_{z2}^{цб\Sigma} \mp \Delta R_{z2}^{аэро\Sigma} \pm \Delta R_z^{\alpha} \pm \Delta R_z^{дин}.$$

Два первых слагаемых в формуле (1) могут быть представлены в виде:

$$R_{z1} + \Delta R_{z1}^{кос} = R_{z1}^{П} + \Delta R_{z1}^{Пкос} + R_{z1}^{Н} + \Delta R_{z1}^{Нкос},$$

где $R_{z1}^{П}$, $R_{z1}^{Н}$ - составляющие реакции R_{z1} от подрессоренной и неподрессоренной частей соответственно; $\Delta R_{z1}^{Пкос}$, $\Delta R_{z1}^{Нкос}$ - изменения составляющих реакции R_{z1} вследствие нахождения на косогоре или переезда опорного препятствия.

Предлагается определять перечисленные составляющие в следующем виде:

(2) $$R_{z1}^{П} + \Delta R_{z1}^{Пкос} = \frac{G_{Пi} \cdot (0{,}5 \cdot B_a + \Delta_ш + \Delta_п)}{B_a} \cdot \left(1 + Sin(\beta_k + \psi_k)\right),$$

$$R_{z1}^{Н} + \Delta R_{z1}^{Нкос} = \frac{G_{Нi} \cdot (0{,}5 \cdot B_a + \Delta_ш)}{B_a} \cdot \left(1 + Sin(\beta_k)\right),$$

$$R_{z1} + \Delta R_{z1}^{кос} = \frac{G_{Пi} \cdot (0{,}5 \cdot B_a + \Delta_ш + \Delta_п)}{B_a} \cdot \left(1 + Sin(\beta_k + \psi_k)\right) + \frac{G_{Нi} \cdot (0{,}5 \cdot B_a + \Delta_ш)}{B_a} \cdot \left(1 + Sin(\beta_k)\right).$$

Аналогично получаем для разгруженного колеса:

(3) $$R_{z2} - \Delta R_{z2}^{кос} = R_{z2}^{П} - \Delta R_{z2}^{Пкос} + R_{z2}^{Н} - \Delta R_{z2}^{Нкос} = \frac{G_{Пi} \cdot (0{,}5 \cdot B_a - \Delta_ш - \Delta_п)}{B_a} \cdot \left(1 - Sin(\beta_k + \psi_k)\right) + \frac{G_{Нi} \cdot (0{,}5 \cdot B_a - \Delta_ш)}{B_a} \cdot \left(1 - Sin(\beta_k)\right).$$

где B_a - колея автомобиля; β_k - угол косогора; ψ_k - угол крена подрессоренной части (автомобиля); $G_Н$ - вес неподрессоренной части; $G_П$ - вес подрессоренной части; $\Delta_ш$ - линейная деформация шины; $\Delta_п$ - линейное смещение подрессоренной части.

Угол крена подрессоренной части ψ_k удобнее выразить через угол косогора β_k и параметры автомобиля. Угловая жёсткость подвески может быть найдена по выражению [5]:

(4) $$C_{\psi} = M_{\psi} / \psi,$$

где M_{ψ} - момент гравитационного крена, определяемый для случая движения по косогору в виде:

$$M_{\psi} = Y \cdot h + G_{Ai} \cdot h \cdot tg(\beta),$$

где Y - боковая сила. Если силу Y рассматривать как составляющую веса автомобиля при движении на косогоре, пренебрегая центробежными силами, то:

$$Y = G_{Ai} \cdot tg(\beta).$$

Тогда:

(5) $$M_{\psi} = 2 \cdot G_{Ai} \cdot h \cdot tg(\beta).$$

Заменяя в формуле (4) момент крена выражением (5) и находя угол крена из формулы (4), получим:

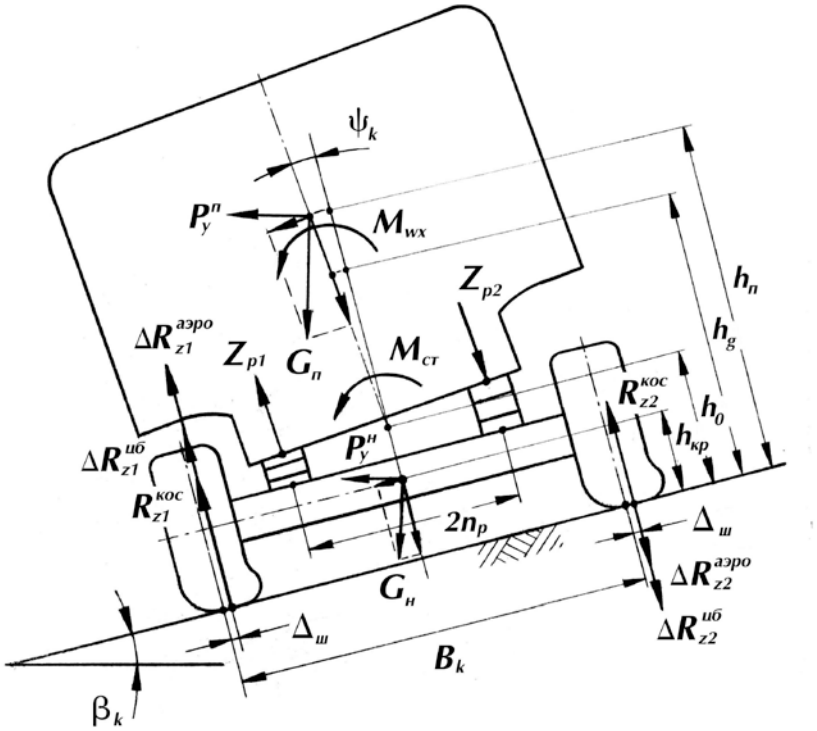


Рисунок 1 - Схема распределения нагрузки в поперечной плоскости

$$\psi = \frac{2 \cdot G_{Ai} \cdot h \cdot tg(\beta)}{C_{\psi}},$$

или, с учётом выражения для C_{ψ}, приведенного в [5]:

$$\psi = \frac{2 \cdot G_{Ai} \cdot h \cdot tg(\beta)}{C_p \cdot n_p^2 + C_{cm}},$$

где $2 \cdot n_p$ - расстояние между упругими элементами подвески; C_p - угловая жёсткость подвески; C_{cm} - угловая жёсткость стабилизатора.

По формулам (2, 3) можно с достаточной точностью определить отношение вертикальных реакций и для случая преодоления порогового препятствия, если вместо угла косогора использовать понятие угла наклона моста автомобиля (для зависимой подвески), которое находится по формуле:

$$\beta_н = arctg(r_д / (B_A \cdot k_{пор})),$$

где $k_{пор}$ - коэффициент порога, принимаемый в зависимости от высоты порогового препятствия, преодолеваемого автомобилем. Так, в соответствии с данными [6] можно принять следующие расчётные значения $k_{пор}$:

$k_{пор} = 1{,}25 \ldots 2{,}00$ для автомобиля высокой проходимости;

$k_{пор} = 6{,}67$ для неполноприводного автомобиля.

Отношение суммарных реакций R_{z1}^{Σ} и R_{z2}^{Σ} предлагается представлять коэффициентом относительного перераспределения вертикальных реакций k_R:

$$k_R = R_{z1}^{\Sigma} \big/ R_{z2}^{\Sigma} .$$

Влияние перераспределения вертикальных реакций на изменение φ будет заметным для углов косогора, близких к максимальным. Однако оно имеет лишь теоретическое значение и не несёт принципиального смысла из-за высоких значений $k_{б\,max}$, которые так или иначе могут быть получены только при жёсткой блокировке распределяющего механизма. Следует отметить, что максимальные значения угла косогора будут ограничены величиной, приводящей к боковому опрокидыванию или потере управляемости из-за бокового скольжения колёс.

Рисунок 2 - Измерение значений опорных реакций

Определение значений опорных реакций на ведущих колёсах производилось с помощью динамометра образцового переносного на сжатие типа ДОС-5 системы Токаря № С-371 ГОСТ 9500-60 и индикатора типа ИЧ ГОСТ 577-68 (твёрдый сплав на камнях, класс I). Техническая характеристика измерительного комплекта приведена в табл. 1. Исследование проводилось для автомобиля Нива ВАЗ-2121 при заданных паспортных значениях полной нагрузки и давления в шинах. Определение углов крена подрессоренной и неподрессоренной частей производилось косвенным путём, через задаваемые значения колеи и вертикального линейного перемещения колеса.

Таблица 1 - Характеристики измерительного комплекса

№ п/п	Параметр	Размерность	Значение
1	Предел измерений на сжатие	кН	49,05
2	Цена деления индикатора	мм	0,1
3	Пределы измерений индикатора	мм	0…10
4	Допустимые вариации показаний в процентах от измеряемого усилия	%	0,5

На рис. 3 показаны характеристики вертикальных реакций на задних колёсах при углах крена неподрессоренной части, изменявшихся в пределах 5…15^0., где R_{1t}, R_{2t} - расчётные значения реакций на загруженном и разгруженном колёсах, R_{1e}, R_{2e} - экспериментальные результаты. На рис. 4 приведены характеристики коэффициента относительного перераспределения вертикальных реакций в зависимости от угла крена, где k_{Re} - экспериментальное значение, k_{Rt} - теоретическое. Был проведен корреляционный анализ полученных результатов с целью оценки тесноты связи и её достоверности. Результаты расчётов приведены в табл. 2, где δ_{cp} - относительная погрешность теоретических значений, R - коэффициент парной корреляции, σ_r - дисперсия коэффициента корреляции, $(|R|/\sigma_r) \geq 3$ - условие достоверности связи с доверительной вероятностью $0{,}95$.

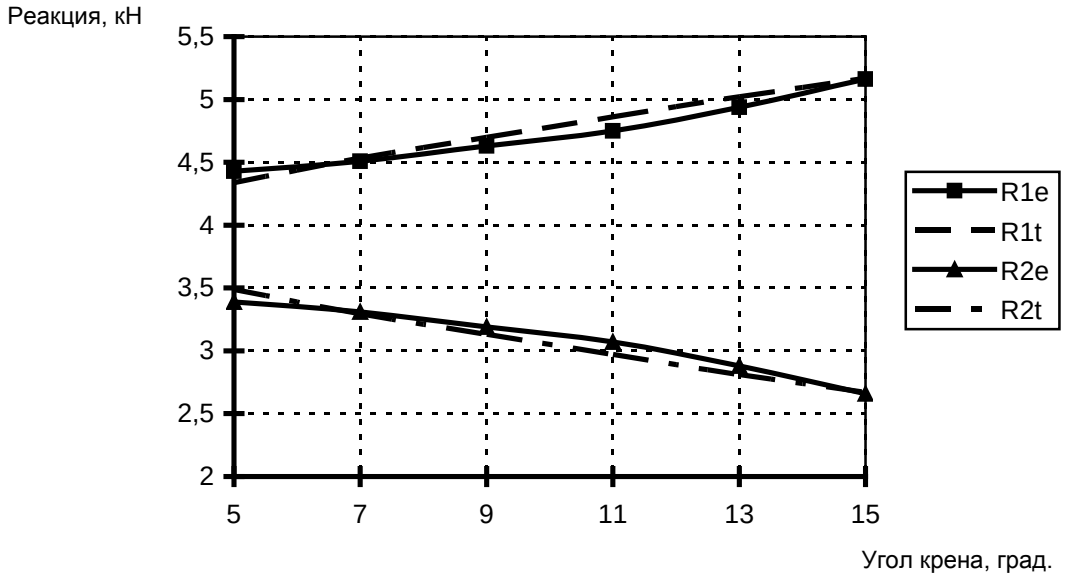


Рисунок 3 - Изменение вертикальных реакций

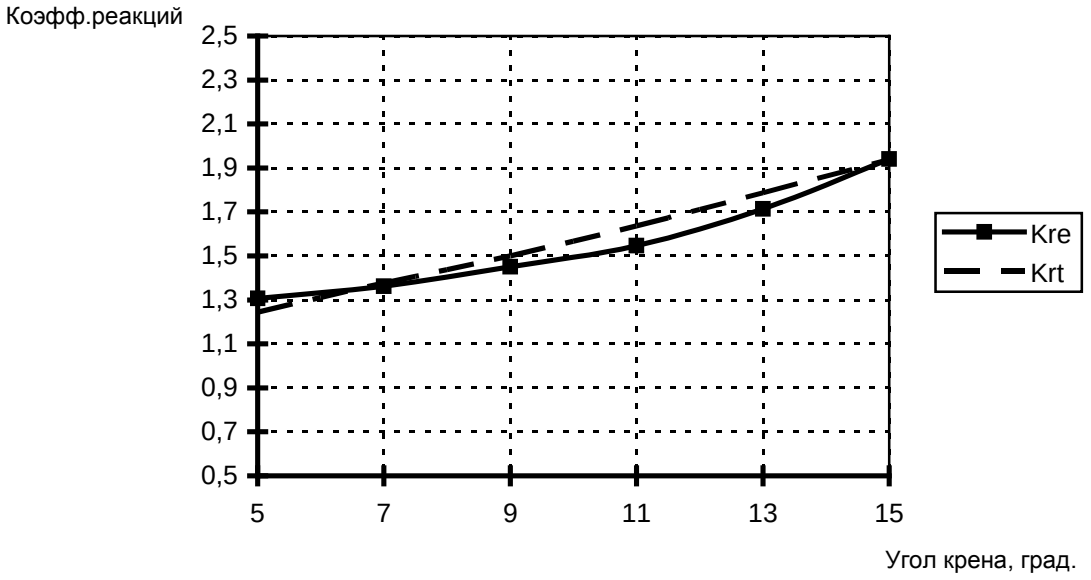


Рисунок 4 - Изменение коэффициента перераспределения реакций

Таблица 2 - Анализ достоверности результатов

№ п/п	Параметр	δ_{cp}, %	R	σ_r	$(\lvert R\rvert/\sigma_r) \geq 3$
1	R_{1t}	1,39	0,9759	0,0213	45,81>>3
2	R_{2t}	1,86	0,9760	0,0212	46,06>>3
3	k_{Rt}	-	0,9779	0,0195	50,05>>3

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

✓ Предложенная методика расчёта вертикальных реакций на ведущих колёсах при боковом крене автомобиля является достоверной и позволяет существенно уточнить оценку необходимой степени блокирования привода;

✓ Полученные результаты позволяют утверждать, что учёт перераспределения реакций является необходимым при расчёте коэффициента блокировки привода, а также и при других расчётах, требующих точных значений вертикальных реакций колёс.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Левин И.А.* О рациональной степени блокировки дифференциалов многоприводного автомобиля. // Автомобильная промышленность. - 1964. - № 3. - С. 14-17.
2. *Шуклин С.А.* Исследование влияния схемы привода на некоторые технические показатели трёхосного автомобиля. // Автореферат дисс. ... канд. техн. наук. - М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1968. - 20 с.
3. *Гришкевич А.И.* Автомобили: теория: Учебник для вузов. - Мн.: Высш. шк., 1986. - 208 с.: ил.
4. *Барыкин А.Ю.* Основы теории современных дифференциалов. - Наб. Челны: КамПИ, 2001. – 277 с: ил.
5. *Литвинов А.С., Ротенберг Р.В., Фрумкин А.К.* Шасси автомобиля. Конструкция и элементы расчёта. - М.: Машгиз, 1963. - 504 с., ил.
6. *Литвинов А.С., Фаробин Я.Е.* Автомобиль: теория эксплуатационных свойств. - М.: Машиностроение, 1989. – 240 с., ил.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Ф.Д. Байрамовым.
Поступила в редакцию 2.12.08 г.

УДК 621.313.001.57

ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ СТРУКТУРЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ИСПЫТАНИЙ ДВС

А.Х. Хайруллин, *д.т.н.;* Л.А. Галиуллин
Камская государственная инженерно-экономическая академия

Рассмотрены методы и средства испытаний двигателей внутреннего сгорания. Определены задачи для построения автоматизированной системы испытаний ДВС.

В современном обществе острый характер приобретают проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов. Автомобильный транспорт потребляет более 30% производимых нефтепродуктов, а затраты на топливо составляют около 20% себестоимости любого продукта [1].

Не менее острой проблемой является загрязнение окружающей среды, причем на долю автотранспорта приходится больше половины вредных воздействий.

Развитие современного двигателестроения происходит по пути улучшения экономических, экологических и эксплуатационных показателей двигателей. Это связано, в первую очередь, с применением электронных систем управления — систем впрыска топлива и управления зажиганием, что позволяет значительно снизить токсичность и энергопотребление транспортных средств [2].

В процессе эксплуатации автомобиля неизбежно происходит износ и старение его узлов и агрегатов, что приводит к ухудшению его экономических, экологических и эффективных показателей. В этой связи для поддержания двигателя в исправном состоянии и для своевременного выявления отклонения параметров, приводящих к ухудшению экономических, экологических и эффективных показателей его работы, ведущее место принадлежит системе испытаний ДВС, ее научной обоснованности и совершенству [1, 5].

В настоящее время существует ряд методов и средств испытаний двигателя внутреннего сгорания, в основе которых находятся различные аспекты и закономерности его работы. Наибольшее распространение получили мотортестеры и системы встроенной диагностики.

Устройства, реализующие возможности самодиагностики, направлены на выявление неисправностей электронного блока и датчиков системы управления двигателем.

Мотортестеры обладают набором собственных датчиков, способны измерять различные параметры работы систем двигателя и реализовывать тестовые режимы диагностики.

При этом указанные устройства обладают слабыми возможностями для оценки общего состояния ДВС и предназначены, в основном, для поиска и локализации неисправностей или мест отказов уже по факту их возникновения.

Оценка общего состояния двигателя проводится по эффективным показателям его работы, к которым относятся эффективные момент и мощность на валу двигателя, расход топлива и воздуха, угол опережения зажигания, содержание вредных веществ в отработавших газах. Работа систем, реализующих указанный подход, основана на тормозных и бестормозных методах.

Тормозные методы подразумевают использование специальных нагрузочных стендов с беговыми барабанами. Такой метод не нашел широкого распространения в связи с высокой стоимостью оборудования.

Бестормозные методы более просты и не требуют использования специальных тормозных устройств. При этом измеряется угловое ускорение при разгоне двигателя без внешней нагрузки от минимально устойчивой частоты вращения до максимальной за счет резкого открытия дроссельной заслонки (рейки топливного насоса – в дизельных двигателях). Такой метод позволяет проводить диагностику в реальных условиях эксплуатации, а оснащение современных ДВС электронными системами управления – увеличить количество контролируемых параметров.

Недостатками систем, реализующих бестормозной метод, являются невысокая точность, связанная с необходимостью численного дифференцирования функции изменения угловой скорости вращения, неполнота и узкий диапазон частот вращения получаемых характеристик [3, 4].

Таким образом, встает задача разработки системы испытания современного двигателя внутреннего сгорания с учетом его особенностей и в реальных условиях эксплуатации по его скоростным характеристикам для своевременного выявления отклонения параметров, приводящих к ухудшению экономических, экологических и эффективных показателей работы двигателя.

Это достигается путем решения следующих задач:

1. Определение структуры системы испытания ДВС для реальных условий эксплуатации. Выбор режима испытания.

2. Определение минимально необходимого состава датчиков и исполнительных механизмов системы управления двигателем, сигналы которых содержат в себе необходимую информацию для определения характеристик ДВС.

3. Разработка алгоритмов и программного обеспечения обработки информации, гарантирующих высокую точность вычисления эффективных показателей работы двигателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Статистика автомобильного транспорта: Учебник / *И.М. Алексеева, О.И. Ганченко, Е.В. Петрова*. - М.: Издательство «Экзамен», 2005. - 352 с.

2. *Гирявец А.К.* Теория управления автомобильным бензиновым двигателем. - М.: Стройиздат, 1997 - 173с.

3. Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн. Кн. 1. Теория рабочих процессов: Учеб./ *В.П. Луканин, К.А. Морозов, А.С. Хачиян* и др.; Под ред. *В.Н. Луканина*.-2-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. шк., 2005 - 479 с.

4. Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн. Кн. 2. Динамика и конструирование: Учеб./ *В.Н. Луканин, И.В. Алексеев, М.Г. Шатров* и др.; Под ред. *В.Н. Луканина* и *М.Г. Шатрова*.- 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Высш. шк., 2005 - 400 с.

5. Конструкция автомобиля. Том IV. Электрооборудование. Системы диагностики. Учебник для вузов / *С.В. Акимов, В.А. Набоких, Ю.П. Чижков*; Под. общей ред. доктора техн. наук, профессора *А.Л. Карунина*. - М.: Горячая линия - Телеком, 2005. - 480 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии С.В. Дмитриевым.
Поступила в редакцию 5.03.09 г.

РАЗДЕЛ 3
Технология машиностроения

УДК 621.746.6

СВОЙСТВА ПРИМЕНЯЕМЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Р.Р. Калимуллин, Р.Ш. Садриев, И.М. Родькин, Т.В. Астащенко
Камская государственная инженерно-экономическая академия, ОАО «КАМАЗ»

Представлены составы и свойства широко применяемых сталей для зубчатых колес в автомобилестроении. Показаны преимущества сталей, выплавляемых методом прямого восстановления из высокочистой шихты. Приведены сравнительные свойства стали 20ХГНМТА и аналога импортной стали 20CrMn5.

Введение. До настоящего времени сталь является важнейшим техническим материалом, и повышение ее свойств является задачей, обуславливающей технический прогресс машиностроения.

Разносторонний подход к основным требованиям, предъявляемым к материалам для изготовления зубчатых колес, свидетельствует о том, что их выбор должен обеспечивать надежную работу изделия в течение расчетного срока службы с учетом реальных условий эксплуатации (нагрузка, рабочая среда, температура, давление и т.д.). В мировой практике для изготовления таких деталей широко применяют легированные низкоуглеродистые цементуемые стали. К примеру, наиболее широкое применение на предприятиях автомобилестроения – УРАЛАЗ, ЯМЗ, КАМАЗ и др. имеют низкоуглеродистые легированные стали марок 15ХГН2ТА и 20ХГНМТА (табл. 1). Так, в условиях КАМАЗа объем использования этих сталей составляет более 22 тыс. тонн в год, а именно стали 15ХГН2ТА ~ 4080 тн. и стали 20ХГНМТА ~ 18.000 тн. Из указанных сталей изготавливают детали 143 наименований; в том числе из стали 15ХГН2ТА - детали двигателя и коробки передач; из стали 20ХГНМТА - детали редуктора, раздаточной коробки и мостов. В связи с изложенным основное внимание уделено вышеупомянутым маркам стали.

Опыт применения таких сталей показывает, что требования, предъявляемые к ним, и способы производства оказывают существенное влияние на эксплуатационные характеристики деталей.

Анализом 294 плавок стали 20ХГНМТА различных поставщиков установлено ее соответствие нормативным документам по содержанию всех химических элементов (рис. 1).

Выявлено, что наиболее стабильными свойствами обладает сталь, поставляемая Оскольским металлургическим комбинатом (ОЭМК). На данном комбинате для выплавки стали используют высококачественную шихту. Это позволяет повысить чистоту выплавляемой стали по таким примесям, как сера, фосфор, медь и др., а также по остаточным легирующим элементам (бор, вольфрам, ванадий и др.), не предусмотренными химическим составом стали, попадающими в нее за счет использования металлолома.

Анализ химического состава стали 15ХГН2ТА, используемой для деталей коробки передач, показывает, что содержание основных химических элементов - углерода, марганца, кремния, хрома, никеля и титана не превышает значений, указанных в ГОСТ 4543-71 (рис. 2). В то же время содержание молибдена (примесь) в ряде случаев превысило нормативные значения – вместо содержания ≤ 0,15% максимальное содержание его достигало 0,31%.

Использование сталей 15ХГН2ТА и 20ХГНМТА в производстве показывает, что они обладают и химической неоднородностью, что свидетельствует об изменении температуры ми-

нимальной устойчивости аустенита микроучастков с высоким и низким содержанием легирующих элементов.

Таблица 1 - Химический состав сталей 15ХГН2ТА и 20ХГНМТА

Марка стали	Содержание химических элементов, %									Примечание
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	Mo	S	P	
15ХГН2ТА	0,13-0,18	0,1-1,0	0,7-1,0	0,7-1,0	1,4-1,8	0,03-0,09	≤ 0,15	≤ 0,025	≤ 0,025	ГОСТ 4543-71
20ХГНМТА	0,18-0,23	0,17-0,37	0,8-1,1	0,8-1,1	0,8-1,1	0,03-0,09	0,2-0,3	≤ 0,025	≤ 0,025	ТУ 14-1-3324 и ТУ 14-1-5528

Контроль макроструктуры стали 20ХГНМТА в соответствии с ГОСТ 10243 выявил в металлопрокате ликвационный квадрат (ЛК), центральную пористость (ЦП), точечную неоднородность (ТН) и другие дефекты, но их степень проявления не превышала требований нормативно-технической документации (табл. 2).

Таблица 2 - Макроструктура стали 20ХГНМТА

Вид дефекта	Фактически	Требования ТУ
Центральная пористость	0-2,0	≤ 3,0
Точечная неоднородность	0,5-1,5	≤ 3,0
Общая пятнистая ликвация	0-1,0	≤ 1,0
Краевая пятнистая ликвация	0-1,0	≤ 1,0
Подусадочная ликвация	0-0,5	≤ 1,0
Подкорковые пузыри	0-0,5	Не допускается
Межкристаллические трещины	0-1,0	Не допускается
Светлая полоска	0-0,5	Не оговаривается
Ликвационный квадрат	0-1,5	≤ 3,0

Рациональный выбор стали подразумевает обязательный учет всего комплекса свойств и особенно важнейшей характеристики сталей – прокаливаемости.

Контроль прокаливаемости стали 20ХГНМТА (рис. 3), выплавляемой различными меткомбинатами, показал, что ее величина составляет $П\frac{35-46}{9}$ (г. Челябинск), $П\frac{35-44}{9}$ (г. Златоуст) и $П\frac{35-38}{9}$ (г. Старый Оскол). Сталь производства г. Златоуста имеет более стабильную прокаливаемость в сравнении с г. Челябинском. На основе анализа качества 294 плавок стали зафиксировано, что наиболее стабильными свойствами (химический состав, механические свойства, прокаливаемость) обладает сталь производства ОЭМК (г. Старый Оскол), в которой дополнительно отсутствует и ликвационный квадрат, отрицательно сказывающийся на надежности шестерен в эксплуатации.

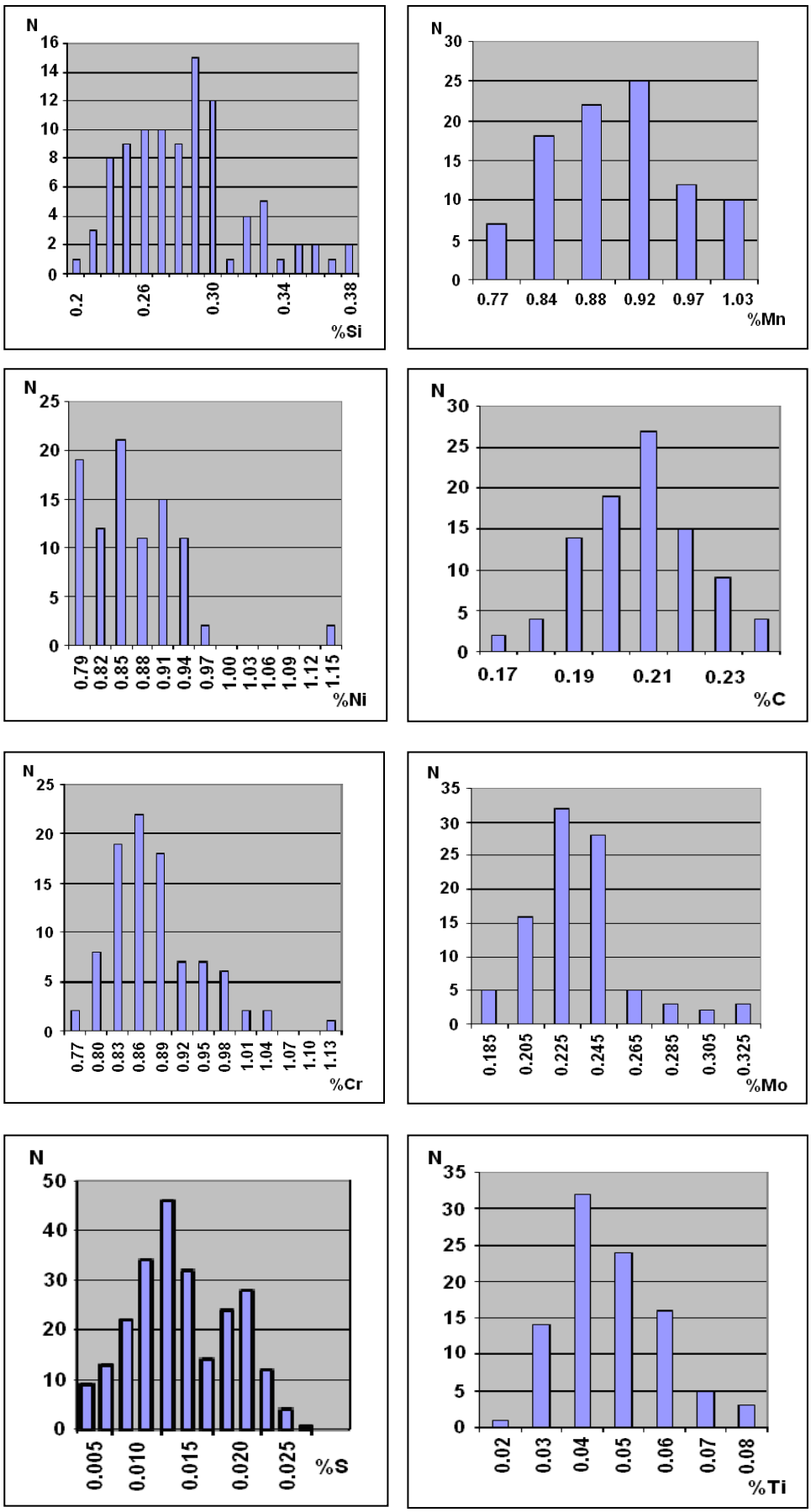


Рисунок 1 - Частота (N,%) распределения испытанных плавок (294 шт.) стали 20ХГНМТА по содержанию химических элементов [1]

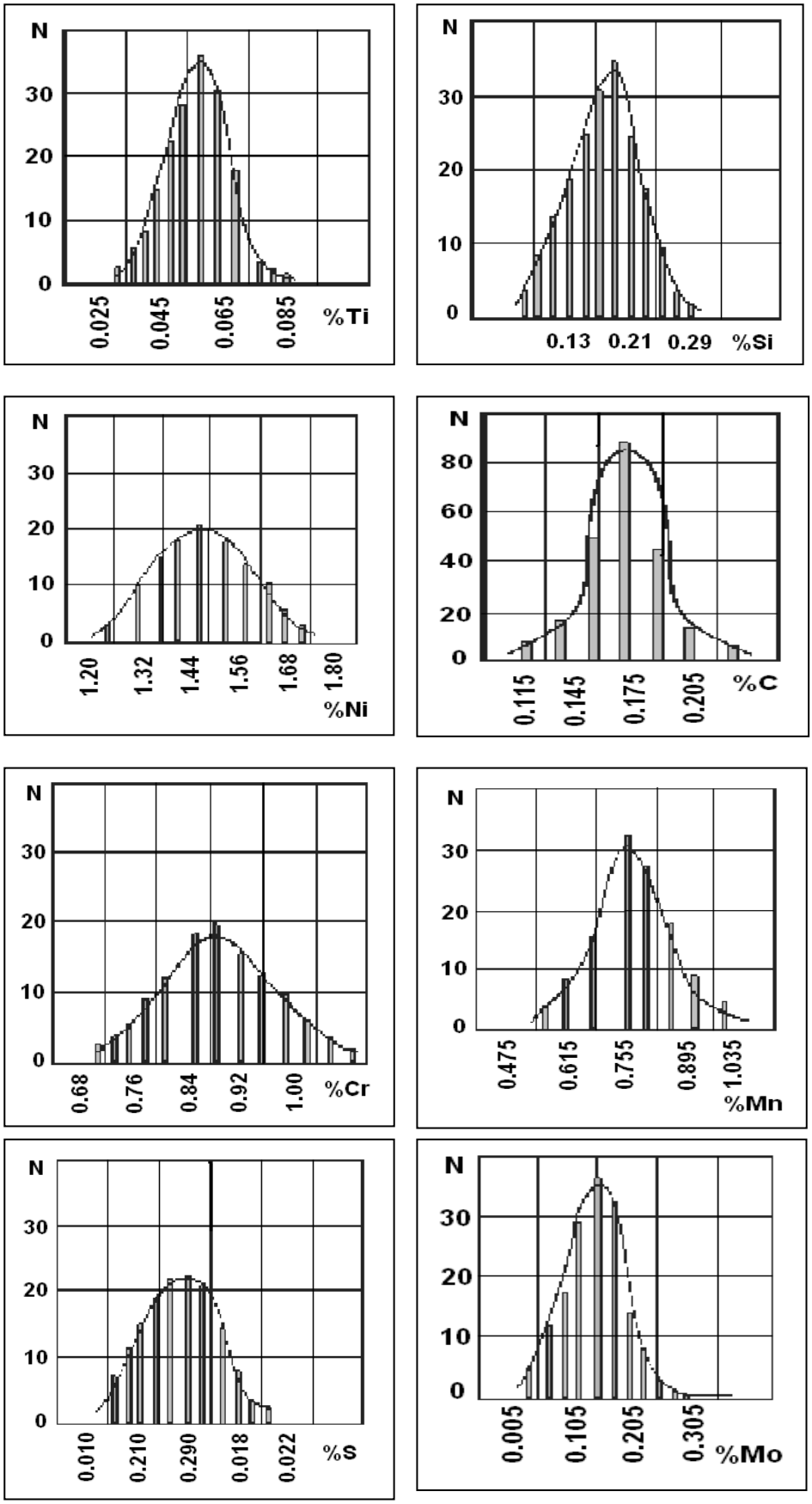


Рисунок 2 - Частота (N, %) распределения испытанных плавок (312 шт.) стали 15ХГН2ТА по содержанию химических элементов [1]

Известно, что на прокаливаемость стали оказывает влияние химический состав, величина зерна, исходная структура, технология производства стали (технология выплавки, кристаллизации, химическая микронеоднородность и т.д.) и другие факторы [2].

Проведенный сравнительный анализ прокаливаемости цементуемых легированных сталей, применяемых для изготовления зубчатых колес и валов коробок передач различных механизмов в стране и за рубежом, выявил, что по рассматриваемому показателю свойств наблюдаются существенные отличия (табл.3). Видно, что аналог стали 20CrMn5 (Германия), производимой по ТУ 14-1-5561-2008 на ОЭМК (г. Старый Оскол), имеет более узкую полосу прокаливаемости по отношению к стали 20ХГНМТА. Это свидетельствует о том, что к данной марке стали предъявляются более высокие требования к химическому составу, по механическим свойствам и прокаливаемости, которые, в конечном счете, положительно влияют на весь комплекс свойств стальных изделий, необходимых в условиях длительной эксплуатации [3].

Таблица 3 - Свойства стали 20ХГНМТА

Марка, ТУ	Профиль, Ø мм	Данные	Механические свойства			Прокаливаемость			
			$\sigma_т$ кг/мм^2	$\sigma_в$ кг/мм^2	$a_в$ кгс·м/см^2	Твердость (HRC) на глубине, мм			
			Не менее			5	9	15	40
20ХГНМТА, ТУ14-1-5509-05	Ø 110	Свойства по ТУ	>120	>130	>8	38-44	30-40	24-38	≤ 30
		Опытные	120	130	10,4	40-42	33-37	28-34	25-29

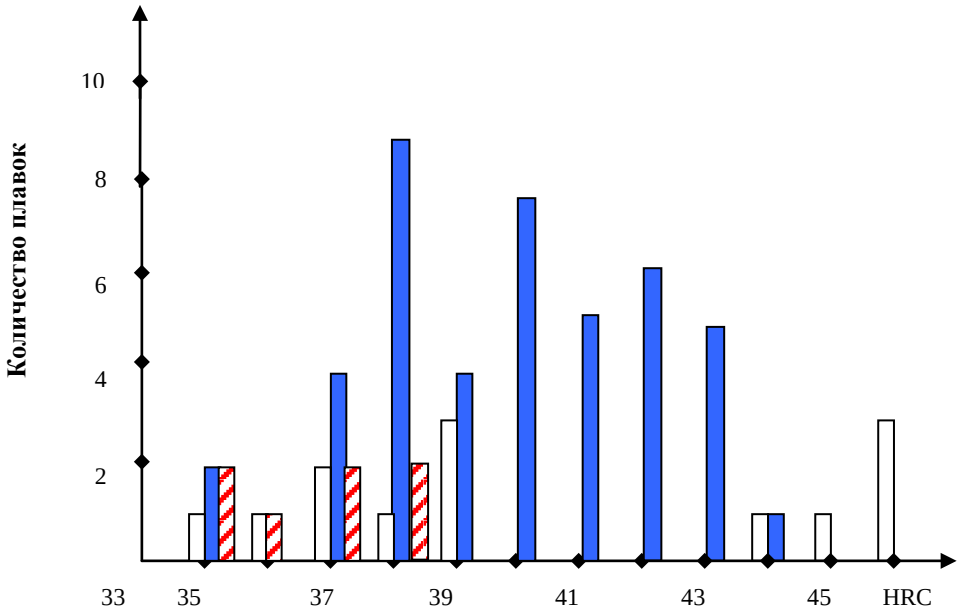


Рис. 3. Прокаливаемость (П $\frac{HRC_{Ý}}{9}$) стали 20ХГНМТА, выплавленной металлургическими заводами г. Челябинска (□), г. Златоуста (■) и г. Ст. Оскол (▨)

ЛИТЕРАТУРА

1. *Астащенко В.И., Шибаков В.Г.* Технологические методы управления структурообразованием стали при производстве деталей машин. – М.:Academia, 2006. – 328 с.

2. *Качанов Н.Н.* Прокаливаемость стали. – М.: «Металлургия», 1978. – 192 с

3. «Подбор альтернативных материалов для шестерен и валов КП 154» Отчет НИР (Этап 2)/*В.Г. Козлов, С.С. Соловейчик, В.Е. Боровикова.* – ДГТ ОАО «КАМАЗ», 2006. – 23 с.

Статья представлена к публикации В.И. Астащенко.
Поступила в редакцию 14.04.09 г.

УДК 658.012

РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ БАЗЫ ПРЕЦЕДЕНТОВ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАРШРУТОВ В КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Ш.А. Хамадеев

Камская государственная инженерно-экономическая академия

В статье для решения задачи нахождения комплексной оценки вариантов технологических маршрутов предложено использовать базу прецедентов. Разработаны внутреннее и внешнее представление знаний о возникавших ранее прецедентах в виде структуры базы прецедентов и семантических правилах.

Введение. Формирование альтернативных технологических маршрутов в КШП является трудоемкой задачей по причине необходимости анализа большого количества возможных вариантов. Для решения подобных задач широко применяются комбинаторные методы, основанные на упорядоченном переборе наиболее перспективных вариантов. Однако и в этом случае количество вариантов, подлежащих рассмотрению, остается большим, что предъявляет к нахождению решения высокие требования по временным и ресурсным затратам.

В связи с этим, для решения поставленной задачи авторами предлагается комплексный подход на основе совместного применения метода ветвей и границ и иерархической модели с нечеткими предикатами. Для этого предлагается использование вывода по прецедентам - метод принятия решений, в котором используются знания о ранее возникавших ситуациях или случаях (прецедентах). При рассмотрении новой проблемы (текущего случая) отыскивается похожий прецедент. Вместо того, чтобы каждый раз искать решение с начала, можно попытаться использовать решение, принятое в сходной ситуации, возможно, адаптировав его к текущему случаю [1].

На первом этапе для формирования ранжированного списка альтернативных вариантов технологических маршрутов задача решается с помощью метода ветвей и границ. На втором этапе производится анализ полученных результатов и формируются прецеденты для отсева подмножеств множества допустимых решений, не содержащих оптимальных решений, для первого этапа.

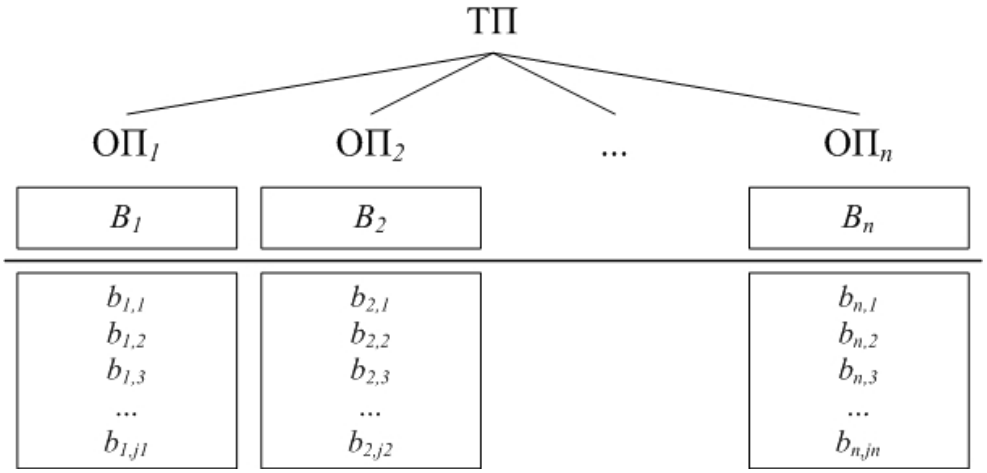


Рисунок 1 - Реализация операций

1. Представление исходных данных. Исходными данными для решения задачи формирования альтернативных вариантов технологических маршрутов являются:

❖ иерархическое представление технологического процесса, содержащее все основные операции $ТП = \{O_1, O_2, ... O_n\}$, где n - количество операций в ТП;

❖ множество оборудования $A = \{ОБ_1, ОБ_2, ..., ОБ_m\}$, где m — количество единиц обору-

дования;

❖ значение характеристик оборудования и его эксплуатации для оценки.

Введем понятие множества $B_1...B_n$, где $B_i = \{b_{i,1}, b_{i,2}, ..., b_{i,j}\}$ — это множество оборудования j, реализующее i-ю операцию. Все множества B являются подмножествами А - $B_i \subseteq A, i = \overrightarrow{1,n}$ (рис. 1).

Согласно [2], внутрицеховой технологический маршрут представляет собой последовательность прохождения заготовки по производственным участкам цеха при выполнении технологического процесса изготовления детали, т. е. структуру маршрута можно описать как $TM(элементB_1, элементB_2, ..., элементB_n)$.

Для нахождения оптимального маршрута необходимо рассмотреть все возможные альтернативные варианты прохождения заготовки, т. е. все комбинации элементов множеств B_i. В общем случае все альтернативные варианты выглядят следующим образом:

$$TM_i = b_{1,j1}, b_{2,j2}..., b_{n,jn}$$

2. Формирование комплексного критерия оценки. Для выбора рационального маршрута необходимо провести его комплексную оценку. Для решения данной задачи предложена методика оценки технологического маршрута по комплексному критерию на основе метода анализа иерархий [3]. Для комплексной оценки используются независимые показатели вариантов и весовые коэффициенты, учитывающие степень взаимного влияния показателей.

В результате анализа КШП для оценки оборудования были выделены следующие независимые показатели:

- время выполнения (состоящее из основного и вспомогательного времен) — P_1;
- производительность (количество обработанных заготовок в норму времени) — P_2;
- стоимость использования оборудования (включает затраты на электроэнергию, стоимость эксплуатации оборудования в норму времени, затраты на обслуживающий персонал и т. д.) — P_3;
- надежность (качественный показатель, оценивающий безотказность варианта реализации техпроцесса) — P_4;
- оценка экологичности (показатель, характеризующий соответствие нормам экологичности) — P_5;
- оценка условий труда (показатель, характеризующий соответствие нормам условий труда) — P_6.

Так как оценочные показатели являются независимыми друг от друга и их значения имеют разный порядок (например, время выполнения — 1000 минут и 1400000 рублей), предлагается использовать относительную шкалу 1...10, где 1 — это минимальное, а 10 — максимальное допустимые значения.

С помощью метода Саати [3] рассчитывается вектор приоритетов $(\omega_1...\omega_6)$ и формируется оценочная функция. По условиям задачи комплексный критерий оптимальности технологического маршрута имеет вид:

(1) $$F = \omega_1 P_1 + \omega_2 P_2 + \omega_3 P_3 + \omega_4 P_4 + \omega_5 P_5 + \omega_6 P_6 \to min$$

Для оценки верхней границы целевой функции используются производственные ограничения.

Результатом анализа оценки согласно выбранной методике является список технологических маршрутов, ранжированный по значению комплексной оценки. На первой позиции списка будет находиться искомый оптимальный по комплексному критерию маршрут.

3. Пример комплексной оценки технологических маршрутов. Для примера рассмотрим технологический процесс «Шестерня», который состоит из трех основных операций:

- подготовительная (резка заготовок) — $ОП_1$;
- формоизменяющая (штамповка) — $ОП_2$;
- завершающая (очистка поверхности поковки) — $ОП_3$.

Для реализации операций было выбрано следующее оборудование, представленное в таблице 1.

Таблица 1 - Список оборудования для реализации операций технологического процесса «Шестерня»

Подготовительная $ОП_1$	Формоизменяющая $ОП_2$	Завершающая $ОП_3$
$B_{1,1}$	$B_{2,1}$	$B_{3,1}$
$B_{1,2}$	$B_{2,2}$	$B_{3,2}$
$B_{1,3}$	—	$B_{3,3}$

В качестве примера, для оценки оборудования было выбрано четыре характеристики, их значения представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Показатели оборудования в условных единицах

$B_{n,n}$	Характеристики			
	A_1, время реализации	A_2, стоимость	A_3, экологичность	A_4, условия труда
$B_{1,1}$	300	250	20	20
$B_{1,2}$	270	200	19	21
$B_{1,3}$	290	230	21	20
$B_{2,1}$	600	300	18	20
$B_{2,2}$	700	350	20	19
$B_{3,1}$	400	270	21	20
$B_{3,2}$	420	290	20	20
$B_{3,3}$	380	260	19	18

Значения характеристик для дальнейшего расчета необходимо перевести в относительные величины. Для каждого показателя выбирается диапазон с максимальным и минимальным значениями:

- показатель «время реализации»: [100... 1600 единиц];
- показатель «стоимость»: [100... 1000 единиц];
- показатели «экологичность» и «условия труда»: [10... 100 единиц].

Значения каждого показателя в условных единицах переводятся в относительные значения нового диапазона [1... 10] (таблица 3).

Таблица 3 - Относительные значения показателей оборудования

$B_{n,n}$	Характеристики			
	A_1	A_2	A_3	A_4
$B_{1,1}$	1,4	1,7	1,2	1,2
$B_{1,2}$	1,2	1,2	1	1,3
$B_{1,3}$	1,3	1,5	1,3	1,2
$B_{2,1}$	3,4	2,3	0,9	1,2
$B_{2,2}$	4	2,8	1,2	1
$B_{3,1}$	2	2,9	1,3	1,2
$B_{3,2}$	2,2	2,3	1,2	1,2
$B_{3,3}$	2,9	1,8	1	0,9

С помощью метода анализа иерархий [3] были получены следующие весовые коэффициенты {3,15; 1,88; 0,41; 0,41}(λ = 4,01, ИС=0,0035, ОС=0,0039). Весовые коэффициенты с помощью формулы (1) позволяют дать комплексную оценку выбранному оборудованию.

Зададим производственные ограничения на показатели технологического маршрута:

- продолжительность маршрута не должна превышать 1100;
- стоимость маршрута не должна превышать 670;
- показатель экологичности маршрута не должен быть выше 60;
- показатель условий труда не должен превышать 60.

Эти значения также необходимо перевести в относительные величины (6,7; 6,4; 5,6; 5,6)

По заданным ограничениям (1) комплексная оценка маршрута не должна превышать значение 37,35.

Представим все возможные технологические связи оборудования в виде графа (рис. 2).

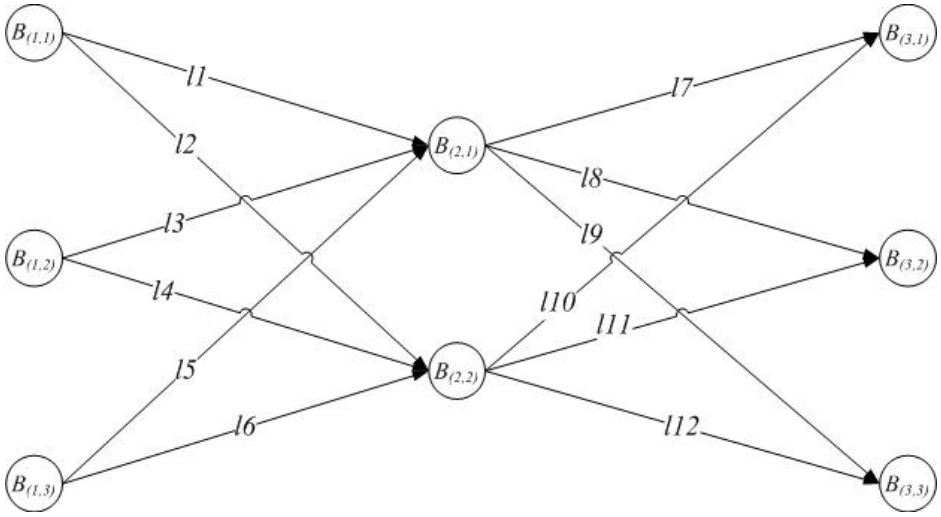


Рисунок 2 - Граф связности оборудования

Расчет комплексных оценок всех возможных вариантов маршрутов производится на основании (1). Для приведенного примера были получены результаты, представленные в таблице 4.

Таблица 4 - Результаты комплексной оценки

Номер ТМ	Маршрут	Комплексная оценка	Удовлетворяет ограничению?
1	*2*	*3*	*4*
ТМ1	l1-l7	37,39	да
ТМ2	l1-l8	35,83	да
ТМ3	l1-l9	35,37	да
ТМ4	l3-l7	35,4	да
ТМ5	l3-l8	33,84	да
ТМ6	l3-l9	33,38	да
ТМ7	l5-l7	36,61	да
ТМ8	l5-l8	35,06	да
ТМ9	l5-l9	34,59	да
ТМ10	l2-l10	38,58	нет
ТМ11	l2-l11	40,13	нет
ТМ12	l2-l12	38,11	нет
ТМ13	l4-l11	38,14	нет
ТМ14	l4-l10	36,59	да
ТМ15	l4-l12	36,12	да
ТМ16	l6-l11	39,36	нет
ТМ17	l6-l10	37,8	нет
ТМ18	l6-l12	37,34	да

После ранжирования по комплексной оценке список результатов имеет вид, представленный в таблице 5.

Таблица 5 - Результаты ранжирования

Ранг	Номер ТМ	Комплексная оценка	Удовлетворяет ограничению?
1	ТМ6	33,38	да
2	ТМ5	33,84	да
3	ТМ9	34,59	да
4	ТМ8	35,06	да
5	ТМ3	35,37	да
6	ТМ4	35,4	да
7	ТМ2	35,83	да
8	ТМ15	36,12	да
9	ТМ14	36,59	да
10	ТМ7	36,61	да
11	ТМ18	37,34	да
12	ТМ1	37,39	да
13	*ТМ17*	*37,8*	*нет*
14	*ТМ12*	*38,11*	*нет*
15	*ТМ13*	*38,14*	*нет*
16	*ТМ10*	*38,58*	*нет*
17	*ТМ16*	*39,36*	*нет*
18	*ТМ11*	*40,13*	*нет*

Анализ полученных результатов показал, что все маршруты, которые включают в себя связи $l6$, $l4$ и $l12$, находятся на нижних позициях ранжированного списка, имеют низкие комплексные оценки и не удовлетворяют заданному ограничению. Маршруты, содержащие связь $l3$, занимают первые позиции и являются перспективными.

Имеет смысл при следующем поиске оптимального маршрута для технологического процесса аналогичной структуры (резка заготовок, штамповка, очистка поверхности поковки) не рассматривать бесперспективные маршруты со связями $l6$, $l4$ и $l12$.

Для подтверждения был рассмотрен технологический маршрут «Шестерня» с добавлением трех новых единиц оборудования. Анализ показал, что в данном случае связи $l6$, $l4$ и $l12$ не повлияли на выбор оптимального маршрута.

При других весовых коэффициентах {1,88; 3,15; 0,41; 0,41} (λ = 4, $ИС$ = 0,0017, $ОС$ = 0,0018) были получены близкие значения комплексных оценок, следовательно, значением важности весовых коэффициентов при отсеве бесперспективных связей можно пренебречь. Следовательно, можно сделать вывод, что при прочих равных условиях маршруты, содержащие связи $l6$, $l4$ и $l12$, с вероятностью 1 не будут являться оптимальными.

Для рассмотренного примера отсев указанных связей на первом этапе увеличит эффективность нахождения оптимального варианта на 56%.

4. Структура базы прецедентов. Для сохранения полученных знаний о нерациональных связях необходимо формализовать и сохранить их в базе прецедентов. При формировании нового шаблона следует учесть следующие характеристики маршрута:

- структура технологического процесса;
- характеристики объекта обработки;
- бесперспективные связи.

Авторами предложено заносить в базу прецедентов только бесперспективные связи, так как характеристики оборудования не являются статическими и со временем имеют свойство ухудшаться, что в дальнейшем может исказить оптимальное решение.

За основу структуры базы прецедентов было взято иерархическое представление технологического процесса (Технологический процесс: Операции). Уровень «Операция» так же характеризуется определенными признаками (s1, s2, s3, s4....). При формировании прецедента, помимо структурных характеристик технологического процесса, необходимо учитывать и характеристики объекта обработки (p1, p2, p3, ...).

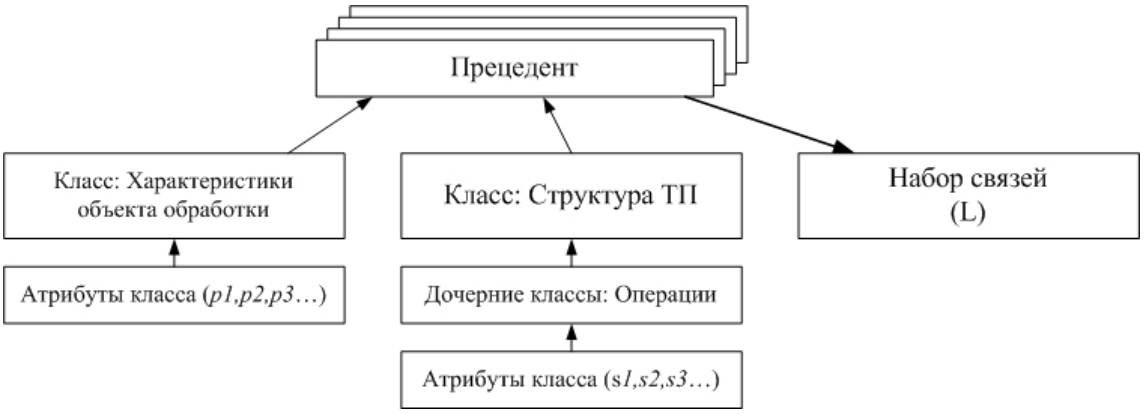


Рисунок 3 - Общая структура прецедентов

Таким образом, общая структура базы прецедентов представляет собой древовидную иерархию, в основании которой находится набор прецедентов. Каждый прецедент определяется двумя основными классами - «Характеристики объекта обработки» и «Структура технологического процесса». Класс «Структура ТП» в соответствии с иерархией технологического процесса определяется набором дочерних классов «Операции». Каждый класс в иерархии содержит набор атрибутов, определяющих этот класс (рис. 3).

Помимо характеризующих параметров, каждый прецедент должен иметь выходной показатель — *L*, перечень связей между рабочими местам, информацию о которых следует поместить в базу прецедентов.

Для рассматриваемого в статье примера прецедент будет иметь структуру, представленную на рисунке 4.

Рисунок 4 - Структура прецедента для примера

5. Семантические правила. На основании выбранной структуры внутреннего представления знаний составляется внешнее представление знаний - алгоритмы поиска решений задачи. Представление знаний должно как можно меньше зависеть от предметной области и

позволять легко пополнять содержимое базы. Этим требованиям удовлетворяют семантические правила типа ЕСЛИ... ТО. [4]

В общем случае такие правила имеют вид:

<номер правила>
ЕСЛИ
Условие 1: <атрибут> — <значение> И
Условие 2: <атрибут> — <значение> И
…
ТО
Действие 1: <атрибут> — <значение> И
Действие 2: <атрибут> — <значение> И
...

Правило для описанного в примере прецедента будет иметь следующий вид:

Прецедент 1
ЕСЛИ
«ТП содержит *3* операций» и
«Характер ОП1 = *Подготовительная*» и
«Тип ОП1 = *Резка заготовок*» и
«Характер ОП2 = *Формоизменяющая*» и
«Тип ОП2 = *Штамповка*» и
«Характер ОП3 = *Завершающая*» и
«Тип ОП3 = *Очистка поверхности поковки*» и
«Масса заготовки < *15*» и
«Тип заготовки = *пруток*» и
«Тип поковки = *круг*» и
«Габариты поковки (Диаметр, длина) < *150, 400*»

ТО
«Отсев связи $B_{1,2}$-$B_{2,2}$» и
«Отсев связи $B_{3,2}$-$B_{2,2}$» и
«Отсев связи $B_{2,2}$-$B_{3,3}$»

Вывод. Использование комплексного метода, основанного на накоплении знаний о ранее возникавших случаях в базе прецедентов, позволяет повысить эффективность нахождения оптимального технологического маршрута кузнечно-штамповочного производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Карпов Л.Е., Юдин В.Н.* Адаптивное управление по прецедентам, основанное на классификации состояний управляемых объектов // http://www.citforum.ru/consulting/BI/karpov/

2. ГОСТ 14.004-83 Технологическая подготовка производства.

3. *Симонова Л.А., Руднев М.П.* Интегрированное информационное обеспечение процесса управления технологическими маршрутами в рамках ERP-системы. – М.: Academia, 2005.

4. *Балтрашевич В.Э.* Реализация инструментальной экспертной системы. - СПб.: Политехника, 1993.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Ф.Д. Байрамовым.
Поступила в редакцию 23.04.09 г.

УДК 621:65.011.56

СИСТЕМА ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ В БАЗЕ ЗНАНИЙ ИНСТРУМЕНТООБЕСПЕЧЕНИЯ

Л.А. Симонова, *д.т.н.;* И.В. Костюк, И.В. Головнич
Камская государственная инженерно-экономическая академия

Предложена система хранения данных в базе знаний информационного сопровождения инструментообеспечения на машиностроительном предприятии, а также новый подход к системе кодирования инструмента.

Введение. Система инструментообеспечения предприятия является интегрированной системой сопровождения инструмента на протяжении всего его жизненного цикла. В соответствии с CALS-технологией система инструментообеспечения должна хранить всю информацию о принимаемых решениях, характеристиках на каждом этапе жизненного цикла инструмента. Процедуры хранения, последовательность документооборота должны быть прописаны в стандартах предприятия и включать в себя следующие этапы: подготовка производства – изготовление (закупка), восстановление инструментария – прием, хранение, выдача инструментария – доставка инструментария потребителю – анализ и контроль всей системы инструментообеспечения.

После проведения тщательного анализа стандартов предприятия ОАО «КАМАЗ» выявлено, что часть стандартов не соответствует современным требованиям сопровождения по всему жизненному циклу изделия и не могут быть автоматизированы, наблюдается полное расхождение среди потребителей инструмента в порядке расчета потребности в инструментарии и формах предоставления информации о необходимом инструменте, нет единой базы данных, в которой должна храниться вся информация об инструменте, деталях, техпроцессах изготовления деталей, неудовлетворительное планирование и контроль исполнения заказов, отсутствует система оптимизации расходов и запасов инструментария и обратная связь с рабочими местами из-за списания инструмента после попадания его в инструментально-раздаточные кладовые (ИРК).

Решение этих проблем позволит снизить удельное потребление инструмента по ОАО «КАМАЗ», ускорить оборачиваемость запасов, сократить время оснащения инструментом проектируемых технологических процессов (сейчас это занимает порядка 60 дней), оптимизировать затраты на логистику.

Формирование системы хранения в базе знаний. При внедрении автоматизированной информационной системы необходим кардинальный пересмотр порядка взаимодействия всех участников процессов инструментообеспечения, сокращение цепочки формирования документов и т.д. Поэтому создание информационной системы невозможно без пересмотра действующих на предприятии стандартов, которые регламентируют работу инструментального хозяйства. При современном подходе к автоматизированным информационным системам инструментообеспечения, обеспечивающим интеграцию и взаимодействие подсистем между собой, необходима также база знаний для формирования качественной оценки решений при выполнении всех основных алгоритмов управления инструментообеспечением; хранения, сжатия, быстрого доступа и записи всех данных, участвующих в межмодульном процессе обмена информацией.

Используемая база знаний должна создать единое пространство данных, требуемое для обмена информацией (Рисунок 1) как в рамках самой автоматизированной системы инструментообеспечения, так и на предприятии в целом.

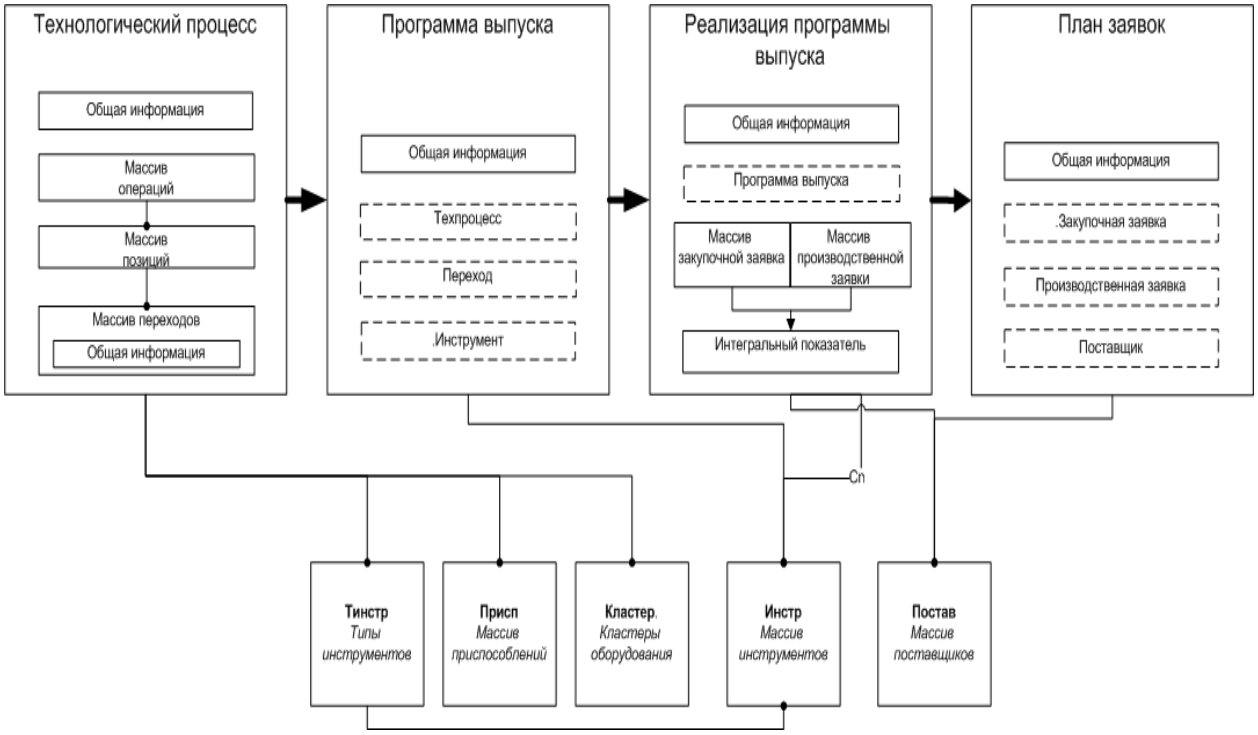


Рисунок 1 - Схема хранимых данных в базе знаний

Ведение сводной спецификации инструментообеспечения предприятия и единого документооборота требует ведения кодификации решений, принимаемых на каждом этапе жизненного цикла данного инструмента. Кодификатор инструмента предполагает хранение в защищенной части базы данных с исключительными правами доступа. Заполнение данных кодификатора выполняется выделенным компонентом базы знаний на основании экспертной оценки принятого решения.

Процесс кодификации производится непрерывно во времени компонентом кодификации базы знаний.

В основу методики кодификации инструмента был заложен кодификатор, состоящий из двух основных частей: статической и динамической.

Статическая часть кодификатора основывается на нормативном документе производственного предприятия, являющегося заказчиком внедряемой системы инструментообеспечения. Статическая часть кодификатора является цифровым кодом, характеризующим технико-экономические свойства изделия. Данный код присваивается каждому инструменту при его создании и остается неизменным на протяжении всего его жизненного цикла. Статическая часть кодификатора обозначается С.# и состоит из семи основных частей и имеет представленную структуру. Заполнение каждой части кодификатора выполняется на основании информации в базе данных (Рисунок 2).

С.1. Код организации (подразделения) разработчика данного инструмента. Данная часть содержит код подразделения и отдела.

С.2. Эксплуатационно-конструкторская характеристика. Группа, подгруппа, вид, разновидность, к которым принадлежит данный инструмент.

С.3. Порядковый регистрационный номер инструмента в базе данных системы. Является уникальным идентификатором, отличающим его от других инструментов

С.4. Код сплава или материала, из которого изготовлен данный инструмент

С.5. Тип инструмента.

С.6. Вид исполнения инструмента.

С.7. Резервная часть.

Рисунок 2 - Пример заполнения статической части кодификатора

Динамическая часть кодификатора обеспечивает непрерывную информационную поддержку поставок и жизненного цикла. Динамическая часть формируется на всех стадиях жизненного цикла инструмента. Присвоение динамической части кодификатора выполняется непрерывно во времени и независимо от человека. Динамическая часть обозначается Д.#1.#2, где #1 – номер части динамического кодификатора, #2 – номер элемента динамической части.

На начальной стадии, еще при формировании программы выпуска деталей, инструменту присваивается **первая часть**: общие данные по жизненному циклу инструмента (**Д.1.1**), код технологического процесса (**Д.1.2**), коды операций, на которых его планируют использовать (**Д.1.3**), данные по нормам времени, заложенным на данный инструмент (**Д.1.4**), данные по оборудованию, на котором используется инструмент (**Д.1.5**). На рисунке 3 приведен пример заполнения этой части кодификатора.

После формирования закупочных заявок и заявок по производству программы выпуска деталей инструменту присваивается **вторая часть**: код поставщика инструмента (**Д.2.1**) или код производственного участка (**Д.2.2**).

Код технологического процесса и код операции, а также код поставщика (производителя) могут поменяться в любой момент времени, что будет зафиксировано в кодификаторе.

Важной составляющей динамической части кодификатора является **третья часть,** определяющая этап жизненного цикла логистики поставки инструмента или логистики его производства. Третья часть при логистике поставок инструмента содержит следующие данные:

Рисунок 3 - Пример заполнения динамической части кодификатора

Д.3.1. Код поставки, в которую включен данный инструмент.
Д.3.2. Код срочности поставки.
Д.3.3. Код транспортной компании.
Д.3.4. Дата покупки инструмента.
Третья часть при производстве инструмента содержит следующие данные:
Д.3.1. Код производственного заказа.
Д.3.2. Код срочности производства.
Д.3.3. Код оборудования.
Д.3.4. Дата изготовления инструмента.

Изготовлением инструмента информационное сопровождение инструмента не заканчивается. В четвертой части указывается информация по месту использования инструмента. Четвертая часть содержит следующие данные:

Д.4.1. Код цеха потребителя.
Д.4.2. Код оборудования цеха, использующего данный инструмент.
Д.4.3. Код ответственного за инструмент.
Д.4.4. Код обрабатываемого материала.
Д.4.5. Время работы инструмента.

База знаний каждый момент времени будет содержать массив информации по технологическим процессам, используемых в настоящее время, разрабатываемых для реализации в будущем или устаревших и неиспользуемых. Массив технологических процессов хранится в следующем виде:

ТП{Общ.инф., Ор, Поз, Пер},

где Общ.инф.- информация по технологическому процессу; Ор{…} – массив операций; Поз{…} – массив позиций технологического процесса; Пер{…} – массив переходов технологического процесса.

Каждый из вышеперечисленных множеств хранится в базе знаний независимо от технологического процесса. Массив переходов технологического процесса хранится в следующем виде:

Пер {Общ.инф., ТИнст, Кластер , Присп},

где Общ.инф. – общая информация по переходам; ТИнстр.{…} – массив типов инструментов системы; инструментообеспечения; Кластер{…} – массив кластеров используемого в производстве обрабатывающего оборудования; Присп {…}– массив используемого в переходе специализированного или универсального приспособления.

Таким образом, в базе знаний ведется привязка использованных ранее или вновь разрабатываемых переходов к определенной модели инструмента. В случае если в базе знаний будут иметься идентичные операции, но привязанные к различным инструментам, то обе операции будут храниться независимо с отличными идентификаторами. При добавлении нового технологического процесса с такой операцией автоматизированная система будет выбирать вариант с наиболее последней датой реализации.

При добавлении нового технологического процесса база знаний автоматически формирует новую программу выпуска деталей. Программа выпуска представляет собой в базе знаний массив:

ПВ{Общ.инф., ТП, Пер, Инстр(C_n),},

где Общ.инф. – общая информация по программе выпуска; ТП – ссылка на реализуемый технологический процесс; Пер – ссылка на обеспечиваемый переход технологического процесса; Инстр(C_n) – ссылка на используемый инструмент (количеством С).

Данная программа выпуска претерпевает изменение автоматически с добавлением, изменением технологических процессов, а также операций, составляющих данный процесс, и неисправностям используемых инструментов или срывам поставок от поставщиков. Программа выпуска деталей хранится в базе знаний весь жизненный цикл инструмента и является основой для его начала. Созданная программа выпуска автоматически создает в базе знаний запись в массиве инструментов Инстр{...} по новым требуемым инструментам. Количество требуемых инструментов по переходу берется из массива переходов Пер{...}. Запись по инструменту ведется с использованием системы кодификации инструмента и состоит в начальный момент времени из кодификатора статической части и кодификатора динамической части технологического процесса и перехода.

На основании программы выпуска деталей подсистема инструментообеспечения находит оптимальный набор поставщиков для закупаемых инструментов и для производства. В базе знаний после успешного выполнения расчетов и формирования заявок дополняется массив данных реализации программы выпуска деталей:

РПВ{ПВ, ЗЗ, ЗП, ИП},

где ПВ – ссылка на программу выпуска деталей; ЗЗ{ТИнстр,C_n, Постав} – массив закупочной заявки, представляющий ссылку на определенный тип инструмента, его количество и ссылки на массив поставщиков; ЗП{ТИнстр,C_n} – массив производственной заявки, представляющей ссылку на определенный тип инструмента и его количество; ИП – полученный интегральный показатель (критерий оптимальности принятого решения).

Хранимый массив РПВ{...} является автоматически изменяемым при изменении программы выпуска деталей в базе знаний. При реализации методологии формирования закупочных заявок и заявок производства основным критерием оптимизации является интегральный показатель (целевая функция).

На основании закупочных заявок формируется план закупок инструментов и план производства инструмента, которые выражаются в базе знаний в виде массива плана заявок:

ПЗ{Общ.инф.,ЗЗ/ЗП, Постав},

где ЗЗ/ЗП - ссылка на массив закупочных или производственных заявок; Постав – ссылка на массив поставщиков(0-производство собственными силами).

На данном этапе происходит добавление второй динамической части кодификатора инструмента – код поставщика (производства).

В качестве организационного ведения базы знаний используются продукционные правила ведения, так как она обеспечивает наглядность и надежность разработанной базы знаний, а также позволяет изменение базы знаний в реальном режиме времени непосредственно пользователями системы. Основу базы знаний будут составлять фундаментальные правила организации базы знаний, являющимися неизменными и имеющими наивысший приоритет при принятии решений. Перечень фундаментальных правил формируется разработчиком. В дополнение к фундаментальным правилам в базе знаний используются пользовательские организационные правила, список которых разрабатывается разработчиками системы при интеграции системы в реальный производственный процесс. Список пользовательских организационных правил базы знаний может быть отредактирован, добавлен, удален, скопирован персоналом предприятия, имеющим соответствующие права доступа.

Продукционная модель знания — модель, основанная на правилах. Данные правила определяют процесс принятия решения системой инструментообеспечения. Список фундаментальных правил приведен в таблице 1.

Таблица 1 - Фундаментальные продукционные правила ведения базы знаний

№	ЕСЛИ	ТО
1	Добавлен новый техпроцесс	Техпроцесс новый
2	Техпроцесс удален	Операции техпроцесса удалены
3	Техпроцесс изменен	Не выполненные и не запланированные операции являются без инструмента.
4	Операция техпроцесса без инструмента	Операция новая
5	Операция техпроцесса удалена	Операция удаленная.
6	Операция техпроцесса изменена	Инструмент операции удаленный. Операция новая.
7	Операция имеет копию (не новую) в базе знаний	Операция аналогичная (номер аналогичной записать).
8	Операция новая и аналогичная	Создать новые инструменты операции по аналогичной. Операция в планировании
9	Операция новая и НЕ аналогичная	Создать новые инструменты операциям техпроцесса по нормативным документам Операция в планировании
10	Операция удаленная	Инструменты данной операции удаленные.
11	Операция удаленная и аналогичная	Удалить операцию из базы
12	Инструмент новый	Добавить в текущую программу выпуска.
13	Инструмент удаленный	Программа выпуска изменена
14	Инструмент отсутствует в программах выпуска и не удаленный	Инструмент новый
15	Время работы больше времени стойкости инструмента и в наличии	Инструмент изношен
16	Инструмент сломался и в наличии	Инструмент изношен
17	Текущая программа выпуска и новый час	Создать новую программу выпуска на основании текущей. Обнулить текущую.
18	Программа выпуска новая	Программа выпуска изменена
19	Программа выпуска изменена	Удалить из программы выпуска удаленные инструменты. План производства изменен. План закупок изменен.

Продолжение табл. 1

1	2	3
20	План производства изменен	Исключить производство удаленных инструментов.
21	План покупок изменен	Отменить покупку удаленных инструментов.
22	Инструмент произведен	Инструмент в наличии
23	Инструмент куплен	Инструмент в наличии
24	Интегральный показатель инструмента (Z) программы выпуска меньше 50%	Инструмент с ЭО решения создания
25	Интегральный показатель инструмента (Z) по программе выпуска больше 50%	Создается новый план производства инструмента. Создается новый план закупок.
26	Инструмент имеет копию в базе знаний	Инструмент аналогичный
27	Инструмент с ЭО решения создания и инструмент не аналогичный	Создается новый план закупок
28	Инструмент с ЭО решения создания и инструмент аналогичный	Решение создания аналогично копии инструмента
29	Инструмент в наличии	Операция техпроцесса выполнена. Техпроцесс изменен.
30	Вероятностный интегральный показатель инструмента (Z) плана закупки меньше 50%	Инструмент с ЭО решения выбора поставщика
31	Вероятностный интегральный показатель инструмента (Z) плана закупки больше 50%	Создается новая заявка на закупку.
32	Инструмент с ЭО решения выбора поставщика инструмент аналогичный	Выбор поставщика аналогично копии инструмента
33	Инструмент с ЭО решения выбора поставщика инструмент НЕ аналогичный	Выбор поставщика оператором
34	План производства инструмента новый и инструмент аналогичный.	Создание нового техпроцесса по копии аналогичного
35	План производства инструмента новый и инструмент НЕ аналогичный.	Создание нового техпроцесса и операции по нормативным документам

Выводы: Внедрение такой системы инструментообеспечения разрабатывается для уже существующих предприятий, поэтому очень важно сделать так, чтобы устаревшие подходы к организации производства и технологии не стали непомерным грузом при обновлении производства. Причем, как с организационной точки зрения (например, переход от функциональной к процессной структуре организации), так и с технической (применение современных технологических решений). На предприятии уже существует определенная сложившаяся система документооборота, которую нельзя отвергать полностью. Необходимо учесть, что определенные АРМы уже существуют для решения конкретных задач по инструментообеспечению и их необходимо интегрировать в общую систему, а также предлагаемую базу знаний. Необходимо предусмотреть гибкость ИС по связям набора функций и рабочих мест и возможность адаптации системным администратором при изменениях последовательности передачи документов.

ЛИТЕРАТУРА

1.*Симонова Л.А.* Методология построения интегрированного информационного обеспечения гибких производственных систем механической обработки на машиностроительных предприятиях: монография. - Санкт-Петербург: Изд.Инфо-Да, 2004. - 198 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.Х. Хайруллиным.
Поступила в редакцию 6.05.09 г.

УДК 621:65.011.56

ОРГАНИЗАЦИОННАЯ СТРУКТУРА КРУПНОГО И МАЛОГО ПРЕДПРИЯТИЯ И ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА

Д.И. Загороднев
Камская государственная инженерно-экономическая академия

Рассмотрены различные организационные структуры предприятий с характеристиками типов производств, сделаны выводы о необходимости достоверности прогнозирования рыночного спроса на те или иные изделия, а значит, заранее подготовить материально-технические средства на запускаемые в процесс изделия

Введение. Современные компании (предприятия, организации, фирмы, корпорации) в значительной мере все еще базируются на принципах организации труда, вытекающих из теории Адама Смита, созданной более 200 лет тому назад. В своем фундаментальном труде «Благосостояние нации», опубликованном в 1776 г., он сформулировал принципы организации труда в промышленности, которые оказались по-настоящему революционными для того времени. Производственный процесс предлагалось разбить на элементарные, простые задания (работы), чтобы каждое из них мог выполнять один рабочий. От него не требовалось высокой квалификации и умения выполнять работу в целом - достаточно, чтобы он специализировался на одном или нескольких простейших заданиях. Поэтому предложенные принципы были и остаются весьма эффективными в массовом производстве типовой продукции, выполняемой силами большой армии низкоквалифицированных рабочих.

За истекшее столетие появилось большое число разновидностей таких производств.

Организационная структура предприятия. Согласно ГОСТ 14.004-83, тип производства - это классификационная категория производства, выделяемая по признакам широты номенклатуры, размерности, стабильности и объема выпуска продукции [ГОСТ 14.004-83 ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА ПРОИЗВОДСТВА].

В соответствии с этим различают три типа производства: единичное, серийное и массовое.

Единичное производство - производство, характеризующееся малым объемом выпуска одинаковых изделий, повторное изготовление которых, как правило, не предусматривается.

Серийное или гибкое производство - характеризуется изготовлением изделий периодически повторяющимися партиями (сериями).

Массовое производство - это производство, характеризуемое большим объемом выпуска изделий, непрерывно изготовляемых продолжительное время, в течение которого на большинстве рабочих мест выполняется одна рабочая операция.

Каждый из перечисленных типов производства характеризуется своими особенностями, представленными в таблице 1.

Анализ работы предприятий показал, что массовое производство обеспечивает узкую специализацию исполнителей, применение высокопроизводительного оборудования, полное его использование и, следовательно, создает условия для повышения производительности труда. В этом случае затраты на подготовку производства относятся на значительное количество продукции, их удельная величина мала.

Для массового производства характерно параллельное движение предметов труда, при котором каждый предмет из партии передается на последующую операцию сразу после обработки на предшествующей операции. В этом случае отдельные предметы труда, составляющие партию, находятся одновременно (параллельно) на всех стадиях производственного процесса, т.е. непрерывно переходят из одной стадии процесса в другую. Такое движение предметов труда требует расположения оборудования строго по порядку выполнения технологического процесса. При массовом производстве ассортимент изделий ограничен.

Таблица 1 - Характеристики типов производства

№ п/п	Характерные особенности производства	Тип производства		
		Массовое производство	Мелкосерийное производство	Единичное производство
1	Потребитель	Обезличенный	Индивидуальный или обезличенный	Индивидуальный
2	Объем выпуска	Большим тиражом	Малыми партиями (сериями)	Единичный
3	Повторяемость изделия	Высокая	Малая	Не повторяется
4	Номенклатура изделий	Значительное ограничение	Ограниченная	Широкая
5	Характер выпуска изделий	Непрерывный, одной и той же модели	Периодический	Эпизодический
6	Ритм выпуска	Учащенный	Укрупненный	Отсутствует
7	Степень специализации рабочих мест	Высокая	Средняя (допустимы смешанные операции)	Отсутствует
8	Оборудование	Высокоспециализированное, автоматическое и автоматизированное	Универсальное и специальное	Универсальное с использованием некоторых видов полуавтоматов
9	Организация производства	Автоматизированные поточные линии	Частичное использование элементов потока	Поток отсутствует
10	Количество работающих в потоке	Групповое производство (с числом рабочих 40-200 чел.)	Мелкогрупповое производство (с числом рабочих 10-30 чел.)	Единичный исполнитель, либо бригада (с числом рабочих 5-10 чел.)
11	Расположение оборудования технологического процесса	По ходу однотипных рабочих мест	По группам оборудования	Группы по типам
12	Специализация рабочих мест	Узкая	Широкая	Рабочие места универсальны

Серийное производство характеризуется промежуточным (между единичным и массовым) уровнем технико-экономических показателей.

При традиционной организации производства по мере роста величины серии эти показатели улучшаются, приближаясь к соответствующим показателям массового производства. При серийном производстве должна быть организована планомерная смена изделий с обеспечением необходимой переналадки оборудования и изменением технологических параметров и режимов обработки.

Для серийного производства характерно параллельно-последовательное движение предметов труда, при котором каждый предмет труда передается на последующую операцию или секцию раньше, чем закончена обработка всей партии предметов труда на предшествующей операции.

Единичное производство характеризуется применением универсального оборудования, поскольку из-за небольшого объема выпуска изделий экономически неоправданно применение наиболее производительного специального и специализированного оборудования. Все затраты на подготовку производства относятся на единицу продукции. Для него характерно

последовательное движение предметов. Вместе с тем единичное производство характеризуется возможностью выпуска продукции широкого ассортимента.

Высокая нестабильность производственного процесса, стохастический характер поступления заявок, небольшой объем выпуска изделий при единичном и мелкосерийном производстве предполагает нетрадиционный подход к проектированию и организации таких потоков.

В зависимости от характера и масштаба выпускаемой продукции производственные процессы могут быть простыми и сложными. Продукция, изготовленная на машиностроительных предприятиях, как правило, состоит из большого количества деталей и сборочных единиц. Детали имеют разнообразные габаритные размеры, сложные геометрические формы, обрабатываются с большой точностью, для их изготовления требуются различные материалы. Всё это усложняет производственный процесс, который делится на части, и отдельные части этого сложного процесса выполняются различными цехами и производственными участками завода.

Все производственные структуры машиностроительных предприятий можно свести к следующим типам (в зависимости от их специализации):

- Заводы с полным технологическим циклом. Они имеют все заготовительные, обрабатывающие и сборочные цехи с комплексом вспомогательных и обслуживающих подразделений (ЗИЛ, КАМАЗ);
- Заводы с неполным технологическим циклом. К ним относятся заводы, получающие заготовки в порядке кооперирования от других заводов или посредников;
- Заводы (сборочные), выпускающие машины только из деталей, изготовляемых другими предприятиями, например автосборочные заводы;
- Заводы, специализирующиеся на производстве заготовок определённого вида. Они имеют технологическую специализацию (завод “Станколит”);
- Заводы подетальной специализации, производящие отдельные группы деталей или отдельные детали (завод шарикоподшипников).

Так как машиностроительные заводы представляют собой давно работающие, устоявшиеся комплексы с сформировавшейся инфраструктурой и системой внешних и внутренних связей, то они имеют определённые прочные партнёрские связи как в регионах России, так и за рубежом. Каждый завод имеет своих партнёров-поставщиков, с которыми он устанавливает взаимовыгодные связи.

Завод может заключать с посредником несколько видов сделок:

- Товарообменные или бартерные – взаимные синхронные поставки товаров и оказание услуг на равные суммы без платежей;
- Прямые закупки – это непосредственные сделки между поставщиком и потребителем. Поставки без посредника распространены при международных поставках промышленного сырья на долгосрочной основе;
- Торгово-посреднические операции в области закупок и поставок сырья подразумевают, что посредник подыскивает для завода поставщика за определённое вознаграждение;
- Биржевые сделки на биржах сырьевых товаров.

В нынешних условиях машиностроительный комплекс России широко использует производственное кооперирование. Это высокоэффективная форма сотрудничества. Существуют следующие виды кооперации:

– подрядная или кооперация-субпоставка, при которой одна сторона-подрядчик (субпоставщик) изготавливает и поставляет агрегаты, комплектующие для изготовителя готовой продукции (заказчика);

– взаимная подрядная кооперация–субпоставка, при которой обе стороны изготавливают различные кооперированные комплектующие, составные части машин, оборудования и обмениваются ими для производства готовой продукции;

– кооперированное производство, предусматривающее совместную программу выпуска единого сложного изделия. Стороны изготавливают отдельные его части и поставляют их друг другу. В этом случае возможен и совместный сбыт;

– поставки кооперированных комплектующих, частей машин и т.д., изготовленных из сырья и полуфабрикатов заказчика.

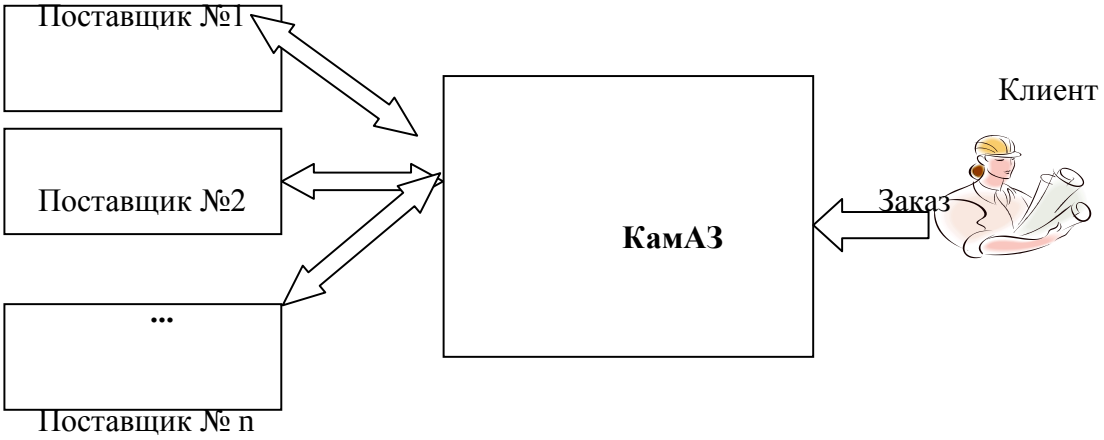


Рисунок 1 - Организационная структура ОАО «КАМАЗ»

Для малого предприятия характерно многообразие производственных связей. Кооперирование связей малого предприятия осуществляется как в сфере поставок (предусматривает обязательные поставки определенного количества, комплектность и сроки поставки комплектующих и материалов), так и в сфере производства. Это требует согласования производства работ во времени с целью обеспечения эффективного выполнения заказов.

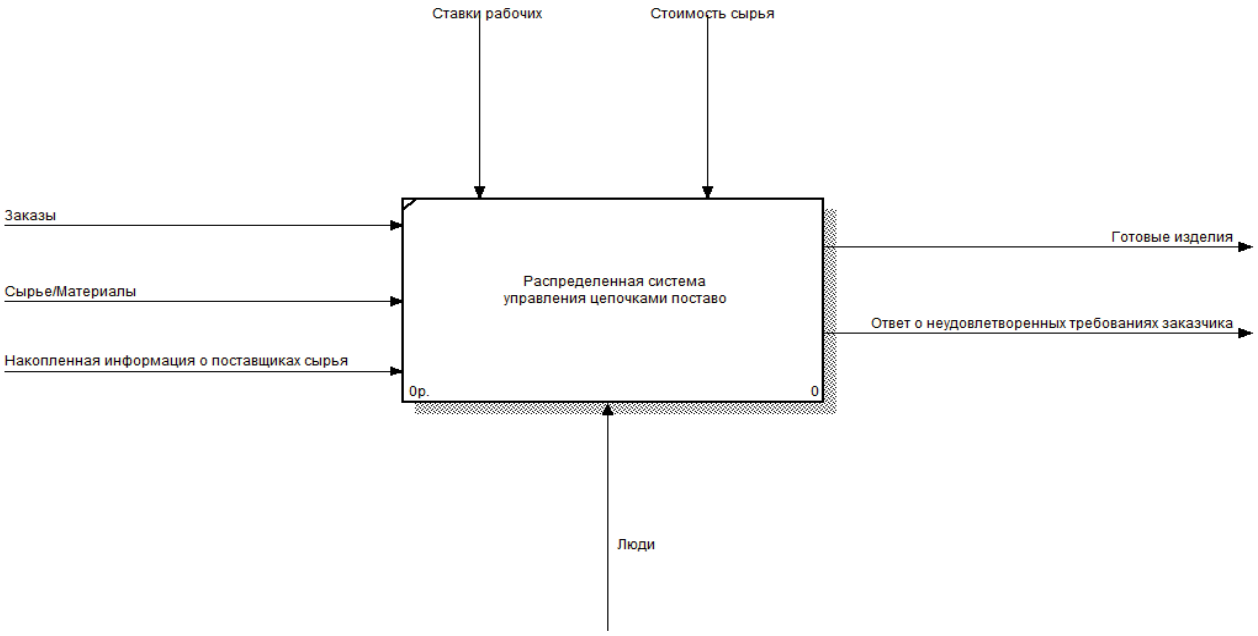


Рисунок 2 - Текущая организационная структура подрядчика

На данный момент организационная структура типового малого предприятия имеет вид, представленный на рисунке 2. Заказы от партнеров поступают, как правило, в форме заявки, получаемой по факсу или по E-mail. После предварительной проработки поступившего заказа, которая производится ручным способом, представитель предприятия согласует

стоимость и сроки выполнения с ответственным лицом со стороны заказчика. Вслед за утверждением сроков и стоимости работ заказ переходит в стадию изготовления.

На стадии изготовления выбирается удобный поставщик сырья. После получения сырья изделие поступает в производственный поток, где ожидает своей очереди на изготовление. Весь этот процесс занимает длительный период времени, часто бывают задержки в изготовлении по причине задержек в поступлении сырья.

В производственном потоке заказы движутся последовательно, хотя в большинстве случаев часть оборудования малого предприятия простаивает.

Говоря о производственном процессе, необходимо упомянуть о нередких выявлениях брака в полученном сырье вследствие отсутствия входного контроля качества. Производимая замена компонентов, не соответствующих требованиям качества, приводит к дополнительным потерям времени и нарушению производственного потока.

Выводы. Характерной чертой для современных предприятий по производству изделий нестабильного ассортимента является невозможность с необходимой достоверностью прогнозировать рыночный спрос на те или иные изделия, а значит заранее подготовить материально-технические средства на запускаемые в процесс изделия. Кроме того, одновременный запуск изделий различного ассортимента или моделей требует привлечения большого количества разнотипного дорогостоящего оборудования. Анализ работы крупных предприятий показал, что они базируются на традиционной технологии и организации технологических процессов, нацеленных на выпуск большим тиражом однотипных изделий в течение продолжительного времени.

В свою очередь предприятия по выпуску изделий малыми тиражами обладают высоким уровнем мобильности в отличие от крупных предприятий, но стоимость и трудоемкость выпускаемых изделий значительно выше из-за низкого уровня их технического обеспечения. Исходя из вышесказанного, необходим поиск новых решений в вопросе организации эффективных технологических процессов по выпуску изделий малыми партиями, нестабильного ассортимента, который позволил бы без существенных капитальных затрат снизить трудоемкость и повысить мобильность изготовления изделий различной сложности.

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.Х. Хайруллиным.
Поступила в редакцию 6.05.09 г.

УДК 658.58

МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СРОКОВ ОТКАЗА ДЕТАЛЕЙ КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНЫХ МАШИН

А.А. Малныч, В.В. Мороз, Р.Р. Файзрахманов
Камская государственная инженерно-экономическая академия

В процессе эксплуатации детали КШМ подвергаются воздействию переменных нагрузок, приводящих к возникновению и развитию усталостных трещин и впоследствии к выходу её из строя. Такой процесс носит название усталостного износа. Одним из путей предвидения и контролирования данного типа отказов является применение математических моделей, позволяющих оценить степень повреждения и время работоспособности детали.

Введение. Повышение эффективности работы ремонтной службы машиностроительного предприятия требует развития методов решения ее задач. К таким задачам можно отнести:

- прогнозирование сроков отказа деталей оборудования;
- планирование его диагностик и ремонтов;
- планирование сроков и объемов заказа запасных частей, ремонтных материалов и т.д.

Для оценки работы ремонтных служб и решения вышеизложенных задач будет являться стабилизация технического состояния оборудования, сформулированная целевой функцией деятельности ремонтных служб:

$$dA \to 0,$$

где dA – изменение технического состояния объекта.

Это позволяет сформулировать основную постановку задачи для ремонтных служб: при известных законах изменения технического состояния необходимо обеспечить минимальное изменение в техническом состоянии механизма путем выполнения рациональных ремонтных воздействий. По отношению к обслуживанию КШМ возникают ограничения, связанные с постоянным объемом выполняемых ремонтных работ и требованием качественного проведения ремонтов. Поэтому основным параметром при решении поставленной задачи и достижения оптимальной целевой функции деятельности ремонтных служб будем рассматривать срок отказа (ΔT) детали КШМ, т.е. время, которое деталь отработает в процессе ее эксплуатации [1].

Модели для прогнозирования срока отказа. Эксплуатация любой детали машины предполагает воздействие на нее большого количества различных факторов, которые вызывают ухудшение во времени ее технического состояния, что приводит к отказу. При прогнозировании ΔT возможно использование различных математических моделей. Наиболее совершенные прогнозные модели предполагают учет различных факторов, влияющих на изменение технического состояния детали в процессе ее эксплуатации, при этом ресурс детали измеряется в единицах времени (часы, сутки). К основным факторам, определяющим характер изменения технического состояния детали, можно отнести вариацию прочностных характеристик ее материала и геометрических размеров, условия эксплуатации, рабочие нагрузки. Кроме них, необходимо выделить такие факторы, как соблюдение условий технологического процесса, качество технического обслуживания и ремонта и другие. Случайный характер рассмотренных факторов приводит к случайному характеру изменения технического состояния и сроков отказа [2].

Для решения задач прогнозирования сроков отказа различными исследователями было предложено множество моделей, отличающихся видом исходной информации, методами ее анализа и формой представления результатов. Анализ рассмотренных моделей позволяет выделить ряд подобных свойств, что позволяет разработать их классификацию применительно КШМ. Любая из рассмотренных моделей в таблице 1 выполняется в два этапа. На первом определяются параметры к прогнозированию, а на втором – непосредственно осуществляется процедура прогнозирования.

Таблица 1 – Классификация прогнозируемых моделей

Тип модели	Исходная информация	Срок выполнения прогноза
Ресурсная	Данные о сроках ремонтов	Начало эксплуатации детали
Силовая	Прочностные и геометрические характеристики детали, статистика технологических нагрузок	Конец периода наблюдения
Диагностическая	Данные диагностик	Срок последней диагностики
Экспертная	Экспертная оценка ресурсов деталей	Начало эксплуатации детали

Для определения прогнозируемой даты отказа (срок отказа ΔT) будем использовать следующее выражение [3]:

$$\Delta T = t_{УП} + T_{ИР} + T_O,$$

где $t_{УП}$ – срок начала упреждения прогноза, соответствующий сроку начала эксплуатации детали;

$T_{ИР}$ – детерминированное значение использованной части ресурса детали (продолжительность эксплуатации) на начало срока выполнения прогноза;

T_O – прогнозная оценка остаточного ресурса детали.

Исходя из различных факторов, в том числе и случайного характера, влияющих на изменение технического состояния деталей, следовательно, и сроков их отказа, можно считать, что наиболее приемлемым является описание T_O. Предполагается, что значение T_O определяется с учетом вида закона распределения остаточного ресурса Z, его параметров – математического ожидания M и коэффициента вариации v, а также заданной вероятности безотказной работы $P_{(t)}$:

$$T_O = f\left[Z, M, v, P(t)\right].$$

Эти параметры определяются на основе анализа исходной информации о текущем техническом состоянии, полученные в результате проведенных диагностик, для заданной вероятности безотказной работы $P_{(t)}$. Для анализа каждого вида статистики применяется собственный математический аппарат. При этом результатом его использования является определение параметров к прогнозированию, а модели, используемые для обработки исходных данных, будут являться процедурой параметризации. Таким образом, для прогнозирования сроков отказа можно использовать типовую прогнозную модель вне зависимости от вида исходной информации.

Каждая параметризирующая модель, представленная в таблице 1, предполагает использование специфического математического аппарата.

Ресурсная параметризирующая модель. Базируется на использовании статистической информации о сроках проведения ремонтов. В общем виде данную модель можно представить так:

$$\left[Z, M, v\right] = f\begin{bmatrix} t_1 & t_2 & \dots & t_i \\ y_1 & y_2 & \dots & y_i \end{bmatrix},$$

где $t_1, t_2, ..., t_i$ – сроки проведения ремонтов детали по ее предыдущим реализациям; $y_1, y_2, ..., y_i$ – оценка технического состояния детали на момент t_i осуществления ее ремонта.

Тогда выражение для определения срока отказа для данной модели будет иметь следующий вид:

$$\Delta T = t_{УП} + T_O,$$

так как разделение $T_{ИР}$ и T_O проводить для данной модели нецелесообразно и поэтому их определяют совместно через параметры Z, M и v. А сроком начала упреждения прогноза $t_{УП}$ принимается срок последнего ремонта.

Прочностная параметризирующая модель. Применяет в своем математическом аппарате данные о технологическом процессе и конструкции машины, с целью определения нагрузок на деталь. Главной ее особенностью является математическое описание процесса накопления повреждений и использование данных о физических характеристиках в исследуемой детали. В общем виде такую модель можно представить как:

$$[Z, M, v] = f[Q(t_i), S(Q), G, \sigma],$$

где $Q(t_1)$ – особенности производственной программы, характеризующие нагрузки Q, действующие на эксплуатируемую деталь за интервал времени t_i;

G – геометрические характеристики детали;

σ – прочностные характеристики детали;

$S(Q)$ – статистика данных о нагрузках по предыдущим реализациям.

В этой модели $T_{ИР}$ определяется отдельно и является детерминированной величиной, определяемой расчетным путем. Значение T_O описывается законом распределения Z, M и v. В данной модели сроком начала упреждения прогноза $t_{УП}$ принимается срок последнего ремонта.

Диагностическая параметризирующая модель. Представляет собой математический аппарат, использующий в процессе своего функционирования данные о сроках t_i и результатах Y_i проведенных диагностик. Особенность этой модели заключается в получении значения остаточного ресурса детали на основании данных о текущем техническом состоянии. Совокупность исходных данных для этой модели представлена как «Статистика диагностик» Эту модель можно представить выражением:

$$[Z, M, v] = f[Y(t_i), S(Y, t_i)],$$

где $Y_i(t_1)$ – значение диагностируемого параметра Y_i для эксплуатируемой детали в момент времени t_i;

$S(Y, t_i)$ – статистика данных диагностик по предыдущим реализациям.

В данной модели определяется только значение T_O, описывается законом распределения Z, M и v. Сроком начала упреждения прогноза $t_{УП}$ принимается срок последней диагностики.

Экспертная параметризирующая модель. Наиболее простая из всех параметризирующих моделей. Ее параметры определяются на основании экспертных оценок ресурса детали, выдаваемых механиком цеха. Использование данной модели рационально на ранней стадии эксплуатации оборудования, когда нет достаточного количества статистической информации о ремонтах и техническом обслуживании оборудования. Эту модель можно выразить как:

$$[Z, M, v] = f[T_{\max}, T_{\min}],$$

где $T_{\max}$ – экспертная оценка максимального ресурса исследуемой детали;

$T_{\min}$ – экспертная оценка минимального ресурса исследуемой детали.

Так же как и в статистической модели, в ней $T_{ИР}$ и T_O не разделяются, и Z, M и v определяются из их совместного анализа. В данной модели сроком начала упреждения прогноза $t_{УП}$ принимается срок последнего ремонта.

Таким образом, рассмотрев четыре модели, можно сделать вывод о том, что каждая из них имеет свой подход к определению срока отказа, но при этом используются одни и те же параметры Z, M и v. Этот факт позволяет произвести сравнительный анализ эффективности использования данных моделей. Каждой из моделей соответствует собственное значение технических характеристик: точность прогноза, финансовые затраты на прогнозирование, простота использова-

ния и т.д. Поэтому именно ремонтные службы предприятия, в зависимости от квалификации своих кадров, финансовой стороны и других факторов, определяют, какую модель использовать при прогнозировании сроков отказов детали. Известно, что каждая модель имеет свои преимущества и недостатки. Экспертная модель требует минимальных финансовых затрат, но требует человека высокой квалификации и при этом не обеспечивает высокой точности прогнозирования. Прочностная и ресурсная модель полностью построена на расчетах, которые не учитывают таких факторов, как нарушение технологического процесса, перегрузка и т.д., что приводит к уменьшению срока безотказной работы детали. Самой эффективной, на наш взгляд, является диагностическая модель, она же и самая дорогая, при этом обеспечивающая наивысшую точность в прогнозировании сроков отказа детали из всех представленных моделей.

Совокупность представленных параметризирующих моделей можно объединить в рамках единой системы прогнозирования. При использовании такой системы важно узлы и детали разделить на четыре группы, соответствующие данным моделям, рисунок 1. Степень соответствия будем определять исходя из условий, в которых данная деталь работает.

Рисунок 1 – Факторы, влияющие на выбор модели для прогнозирования

На рисунке 1 представлены наиболее важные факторы, которые должны быть учтены при выборе модели для прогнозирования срока отказа детали. Идеальным случаем для ремонтных служб будет являться совместное использование параметризирующих моделей, что позволит сэкономить время и деньги и значительно повысить точность определения срока отказа деталей. Но для этого необходимо классифицировать все узлы и детали КШМ по группам, с учетом условий, которые представлены на рисунке 1. Саму классификацию необходимо начинать с первой группы – ресурсной модели.

Совместный принцип действия ресурсной, силовой, диагностической и экспертной модели для определения сроков отказа деталей КШМ в общей цепочке обслуживания оборудования ремонтными бригадами изобразим на рисунке 2.

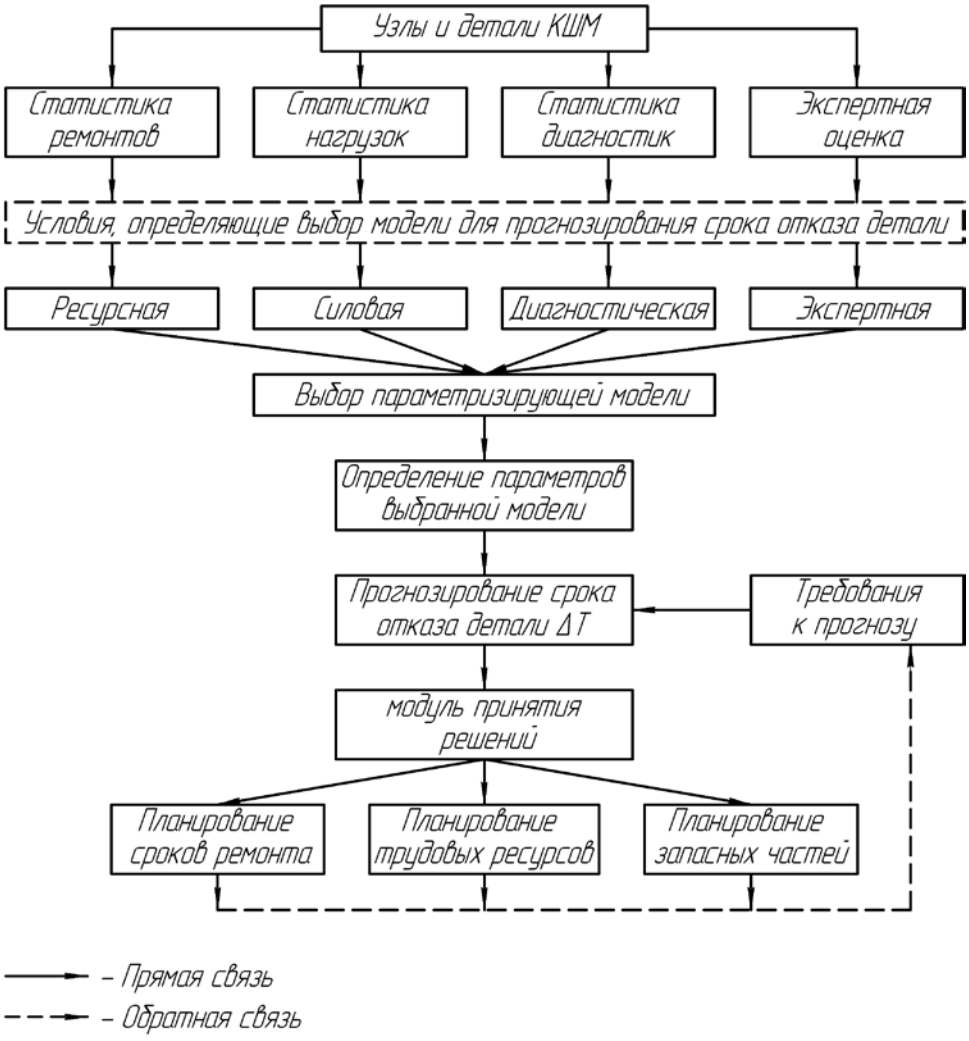


Рисунок 2 – Система прогнозирования сроков отказа деталей КШМ

Заключение. В процессе разработки системы прогнозирования сроков отказа деталей КШМ были предложены модели и их практическая значимость для проведения ремонтных работ. Разработанная система прогнозирования позволяет осуществлять обратную связь, что позволяет корректировать срок проведения ремонтных работ исходя из возможностей ремонтных бригад. Вне зависимости от вида исходной информации (данные о ремонтах, диагностиках, технологического процесса, объема выпускаемой продукции, прочностных и геометрических характеристиках детали и т.д.), используемой для определения параметров прогнозной модели процедура прогнозирования сроков отказа использует одни и те же исходные параметры для всех моделей. Это в свою очередь позволяет использовать модели как единое целое, а эффективность заключается в экономии денежных средств и времени, а также в повышении точности прогнозирования сроков отказа деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Анисимов М.И, Кудинов О.В., Украинцев Б.П.* Ремонт и монтаж кузнечно-прессового оборудования. Справочное пособие. – М.: Машиностроение, 1973. – 624 с.

2. *Михлин В.М.* Прогнозирование технического состояния машин. – М.: Высшая школа, 1976. – 288 с.

3. *Ченцов Н.А., Ченцова Н.С.* Прогнозирование сроков отказа металлургического оборудования // Металлургия и горнорудная промышленность. – 1994. - №3. – С. 75-77.

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Г. Шибаковым.
Поступила в редакцию 23.03.09 г.
УДК 658.588.2

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ДЕТАЛЯХ ДЛЯ НАДЕЖНОСТИ КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНЫХ МАШИН

А.А. Малныч, В.В. Мороз, Р.Р. Файзрахманов
Камская государственная инженерно-экономическая академия

Моделирование повреждений деталей кузнечно-штамповочных машин является отправной точкой в решении многих задач исследовательского, технологического и технико-экономического направления, связанных с повышением надежности работы оборудования и обеспечением беспрерывности технологического процесса, что предотвратит снижение технико-экономических показателей производства.

Введение. В процессе функционирования и выполнения технологического процесса производства техническое состояние деталей кузнечно-штамповочных машин (КШМ), подвергающихся непрерывным разрушающим воздействиям, ухудшается. Это обусловлено результатом воздействия технологических нагрузок и ряда других факторов, которые носят случайный характер. Данные факторы ведут к возникновению и протеканию различного вида повреждений (износа, физического старения, поломок и др.) деталей оборудования. Достигнув критического уровня, накопленные в результате процесса эксплуатации повреждения приводят к нарушению работоспособного состояния оборудования, выработке деталью ресурса, и как следствие, к ее отказу. Отказ любого элемента оборудования, в свою очередь, приводит к остановке процесса производства, ухудшая его технологические и технико-экономические показатели.

Отсутствие контроля над протеканием процессов повреждения деталей приводит к снижению уровня обеспечения надежности функционирующего оборудования. В связи с этим, к одному из первоначальных мероприятий, направленных на повышение надежности оборудования, следует отнести комплекс методов, включающих расчет деталей на износ, прочность и долговечность. Данные методы должны учитывать: выяснение основных причин потери деталями способности выполнять без повреждений заданные технологические функции, определение характера износа и поломок и влияние факторов, вызывающих повреждение деталей [1].

Особенности при моделировании повреждений в КШМ. В настоящее время для моделирования повреждений деталей КШМ используется большое количество методов и подходов, имеющих определенные особенности и базирующиеся на различной исходной статистической информации. Весь перечень методов и подходов к моделированию можно условно разбить на математическое и аналоговое моделирование. Математическое моделирование, в свою очередь, может быть разделено на структурное и полуэмпирическое. Последнее получило наибольшее распространение при решении исследовательских, технических и технико-экономических задач кузнечно-штамповочного производства.

Построению математических моделей предшествует тщательное изучение процессов, приводящих к зарождению, развитию и достижению критического уровня повреждения деталей КШМ. Скорость протекания процесса повреждения обусловлена целым рядом факторов, имеющих случайную природу. Уровень учета случайности этих факторов определяет уровень точности получаемой в результате разработки математической модели для оценки повреждений детали. Решение определенных задач надежности оборудования требует в разрабатываемых моделях повреждений обоснование определенного уровня случайности, учитываемых при разработке моделей, факторов.

При построении моделей повреждений следует учитывать тот фактор, что КШМ по принципу действия различны и подразделены на группы (рисунок 1), поэтому построение

универсальных математических моделей повреждений деталей является невозможным и требует индивидуального подхода к каждой группе оборудования.

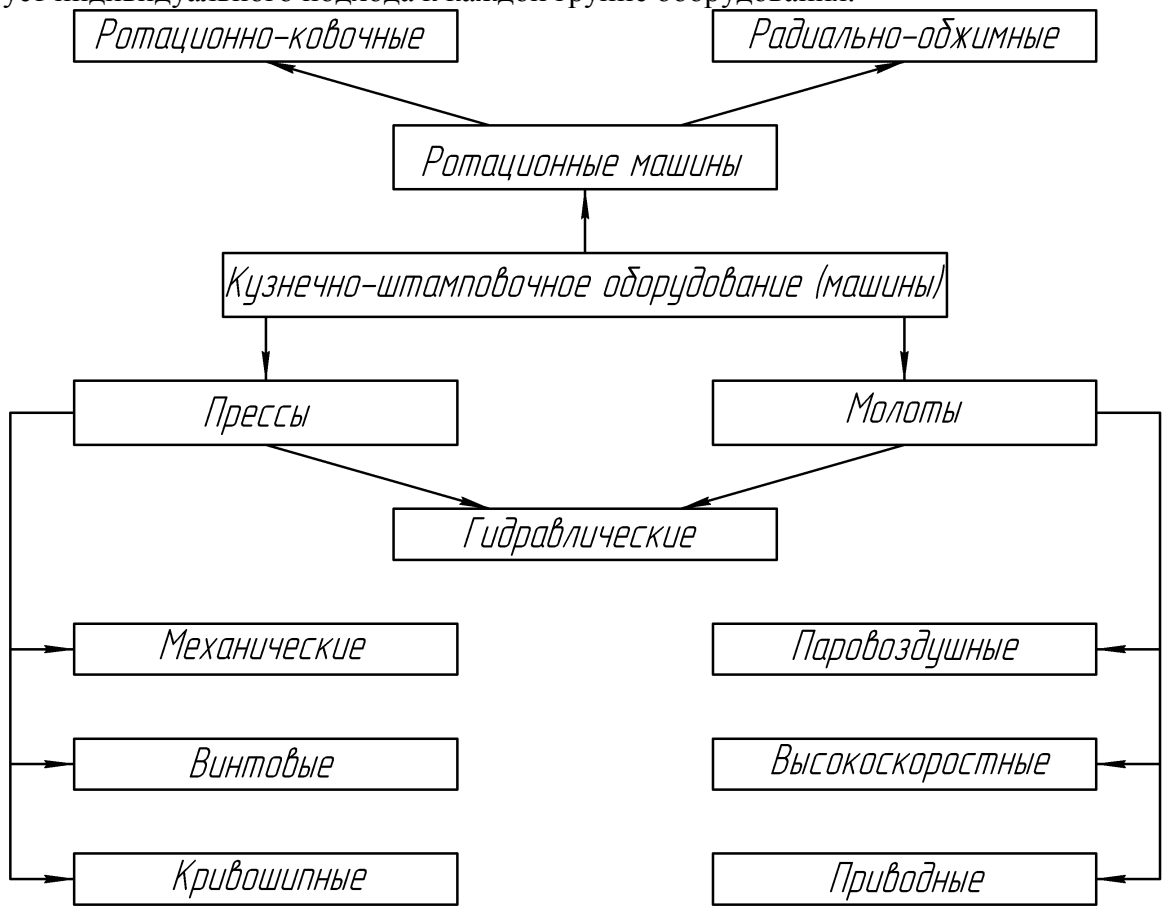


Рисунок 1 – Классификация кузнечно-штамповочного оборудования

Одним из методов обеспечения надежного функционирования деталей кузнечно-штамповочного оборудования на стадии эксплуатации, а также оценки показателей надежности на стадии проектирования, является использование математического описания (моделирования) процессов повреждения.

Наряду с решением данных задач использование математического описания процесса повреждения элементов поможет решить значительный комплекс проблем, оказывающих влияние на технические и технико-экономические показатели производства (рисунок 2).

Моделирование повреждений позволяет анализировать внутренние связи и внешние воздействия, характерные для уникальных категорий оборудования, к которым относятся КШМ. На основании общих принципов формирования отказов данные модели обеспечивают: разработку алгоритмов оценки надежности сложных изделий, учет обратных связей во взаимоотношении «технологический процесс - выходные параметры машины», оценку взаимодействия параметров машины и особенностей потери ею работоспособности. Решение перечисленных задач дает возможность разрабатывать более совершенные модели отказов разнообразных элементов (деталей, узлов, механизмов) КШМ [2].

Большинство процессов накопления повреждений в деталях КШМ происходит в течение длительных промежутков времени, т.е. имеют ярко выраженную динамику протекания. Эти процессы являются причиной отказов деталей оборудования и изменения его состояния во времени. Сам процесс изменения состояния оборудования можно легко прослеживать при помощи измерения уровня вибрации и шума на определенных частотах с последующей обработкой.

Учет в моделях повреждений большой инерционности деталей, возрастания периодичности внешних воздействий, взаимодействия обратимых и необратимых процессов, малой скорости процессов, в совокупности с адаптированными фундаментальными принципами

динамики машин и теории автоматического управления, позволят решить задачи, связанные с надежностью сложных систем, к которым относится КШМ.

Рисунок 2 – Направления использования моделирования повреждений деталей

Актуальным направлением использования моделей повреждения является разработка методов расчета предельных состояний отдельных деталей и машины в целом, а также разработка квалиметрии повреждений – методов численной оценки степени повреждения деталей, различных по своей природе и характеру [3]. Основанием для рассмотрения этого направления является экономический фактор, оценивающий последствия отказов и выступающий в качестве критерия оптимизации требований к показателям надежности. Решение такой задачи позволит провести нормирование показателей безотказности и долговечности детали и машины в целом, регламентировать скорости протекания процессов повреждения, предельных состояний деталей, и машины в целом, запасов надежности, скорости изменения выходных параметров, что обеспечит наиболее эффективное использование оборудования [4].

Наиболее перспективным направлением использования результатов моделирования повреждения деталей является создание специальных систем информации о степени повреждения ремонтируемых деталей, не достигнувших предельного состояния и не имеющих отказов, для недопущения которых и производится ремонт. Разработка систем информации, содержащих информацию о надежности деталей на стадии эксплуатации, является фундаментом к разработке систем управления надежностью оборудования, оценки тенденций ее изменения и достигнутого уровня.

Уникальность, и в большинстве случаев, единичность КШМ, сложных и металлоемких машин для любого машиностроительного предприятия создает необходимость использования математического описания процессов накопления повреждений для разработки методики испытания сложных объектов, к которым относится данный вид оборудования. Высокая безотказность отдельных деталей оборудования исключает применение традиционных методов испытания на надежность, применяемых для относительно простого оборудования. Подобные методики позволяют на стадиях проектирования и изготовления нового оборудования получать информацию об уровне надежности его элементов. Развитие методов испытания, в сочетании с прогнозированием и использованием достоверной информации; разработка алгоритмов по оценке надежности, с учетом постоянно поступающей информации о фактическом текущем техническом состоянии детали; выявление максимальных реализаций потери деталью работоспособности; сочетание испытания со статистическим моделированием процесса повреждения; оценка и прогнозирование протекания ведущих процессов повреждения – являются базой для создания подобных методик.

Заключение. Поддержание и восстановление работоспособности кузнечно-штамповочных машин является сложным процессом, зависящим от таких факторов, как: конструкция машины, методы ее эксплуатации, организации системы ремонта и технического обслуживания, экономических факторов и т.д. Выявление рациональных методов ремонта и технического обслуживания связано с их оптимизацией, где первое место отводится критерию экономичности. Это требует учета и вероятного анализа особенностей накопления повреждений деталей, и как следствие, потери ею работоспособности, а также оценки реальных возможностей по их восстановлению. Правильная организация системы ремонта и обслуживания может при тех же затратах значительно повысить эффективность использования и надежность функционирования кузнечно-штамповочных машин, а также обеспечит целесообразность и эффективность проведения профилактических операций и ремонтно-восстановительных работ. Функционирование моделей накопления повреждений деталей, в рамках специальной системы, называемой ремонтной службой предприятия, обеспечит требуемый уровень работоспособности оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Когаев В.П., Дроздов Ю.Н.* Прочность и износостойкость деталей машин: Учебное пособие для машиностроительных специальностей вузов. - М.: Высшая школа, 1991. – 319 с.

2. *Проников А.С.* Параметрическая надежность машин. – М.: МГТУ им. Баумана, 2002. – 560 с.

3. *Проников А.С.* Надежность машин. – М.: Машиностроение, 1978. – 592 с.

4. Надежность машин. Энциклопедия. В 40 тт. – М.: Машиностроение. 1998. – Т. IV-3. 592 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Г. Шибаковым.
Поступила в редакцию 23.03.09 г.

УДК 621.175 - 419

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ОСЕВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Д.Е. Жарин, *д.т.н.;* А.Г. Соколова, *к.т.н.;* Л.Н. Шафигуллин, М.И. Гумеров
Камская государственная инженерно-экономическая академия

В работе представлено влияние состава термореактивных полимерных материалов на режимы механической обработки. Разработана модель расчета режимов резания для операции фрезерования, учитывающая физико-технологические свойства композиционных материалов. С применением обобщенного критерия оптимизации установлены режимы обработки полимерных композиционных материалов специального назначения, используемых в качестве облицовочных, потолочных плиток и фасонных изделий.

Введение. Эпоксидные, полиэфирные и эпоксиполиуретановые композиционные материалы (КМ) нашли широкое применение при производстве изделий, предназначенных для получения облицовочных, потолочных плиток и фасонных изделий [1, 2].

Современными тенденциями развития производства строительных материалов является повышение их технологичности за счёт использования механической обработки [3].

Механическая обработка полимерных композиционных материалов осевым инструментом. При изготовлении строительных изделий из полимерных КМ наиболее часто выполняемой операцией является операция фрезерования, которую применяют для прорезки пазов, вырезки окон, лючков, для получения канавок и уступов, и изделий повышенной точности с заданными габаритными размерами.

Экспериментальные исследования проводили на эпоксидных, полиэфирных, эпоксиполиуретановых композитах. В качестве матричных компонентов использовали: эпоксидную смолу ЭД-20 (ГОСТ 10587-84); дибутилфталат (ДБФ) (ГОСТ 8728-88); полиэтиленполиамин (ПЭПА) ТУ 2413-357-00203447-99; полиэфирную смолу 540-М 888; пероксид №1 (раствор перекиси метилэтилкетона в диметилфталате); простой полиэфир (Сарэл А-04) и полиизоцианат (Сарэл Б-04). Наполнителями КМ служили: диабаз ($\rho_и$=2900 кг/м^3, $S_{уд}=80\div780$ м^2/кг ($\rho_и$ - истинная плотность наполнителя; $S_{уд}$ - удельная поверхность наполнителя)); маршалит ($\rho_и$=2650 кг/м^3, $S_{уд}=80\div780$ м^2/кг); ПЦ 400 ДФ ($\rho_и$=3100 кг/м^3, $S_{уд}=80\div780$ м^2/кг); аэросил А300 ($S_{уд}=80\div780$ м^2/кг), гранитный порошок ($\rho_и$=2650 кг/м^3, $S_{уд}=150$ м^2/кг) и полиамидное волокно (d_f =15 мкм, l=6 мм). В рецептуре варьировали массовым содержанием отвердителей, объемным содержанием и удельной поверхностью наполнителей. В качестве испытательного оборудования использовали вертикально-фрезерный станок модели 6РФ3, с применением концевых пальчиковых фрез Р18Т Ø 15-32 мм. Оценку физико-механических свойств и качества обработанных КМ проводили по измеренным величинам динамического модуля упругости $E_д$, предела прочности при одноосном сжатии $R_{сж}$, твёрдости по Бринеллю $HB_{бр}$, условно-мгновенного модуля упругости $E_о$, равновесного модуля упругости $E_{ув.}$ согласно действующим ГОСТам и нормативным документам.

В ходе экспериментальных исследований установлено, что значительное влияние на качество изделий из КМ, полученных механической обработкой, оказывают режимы резания - S - подача, V - скорость, t - глубина резания и рецептура КМ.

Установлено, что полученные механической обработкой изделия из эпоксиполиуретановых композитов обладают более высокими физико-механическими свойствами и качеством обработанных поверхностей ($R_а$ – средняя величина микронеровностей поверхности), в отличие от изделий из эпоксидных и полиэфирных композитов (рис.1).

Введение наполнителей (маршалит, диабаз, портландцемент, аэросил) в различные полимерные матрицы приводит к повышению физико-механических свойств КМ (для полиэфирных КМ: $E_д$ до 60%, $R_{сж}$ -до 64%, $HB_{бр}$ -до 60%; эпоксидных КМ: $E_д$ до 50%, $R_{сж}$ -до

60%, $HB_{бр}$ -до 55%; эпоксиполиуретановых КМ: $E_д$ до 50%, $R_{сж}$ -до 63%, $HB_{бр}$ -до 61%) и возрастанию качества обработанных поверхностей (R_a на 10…20%) (рис.2).

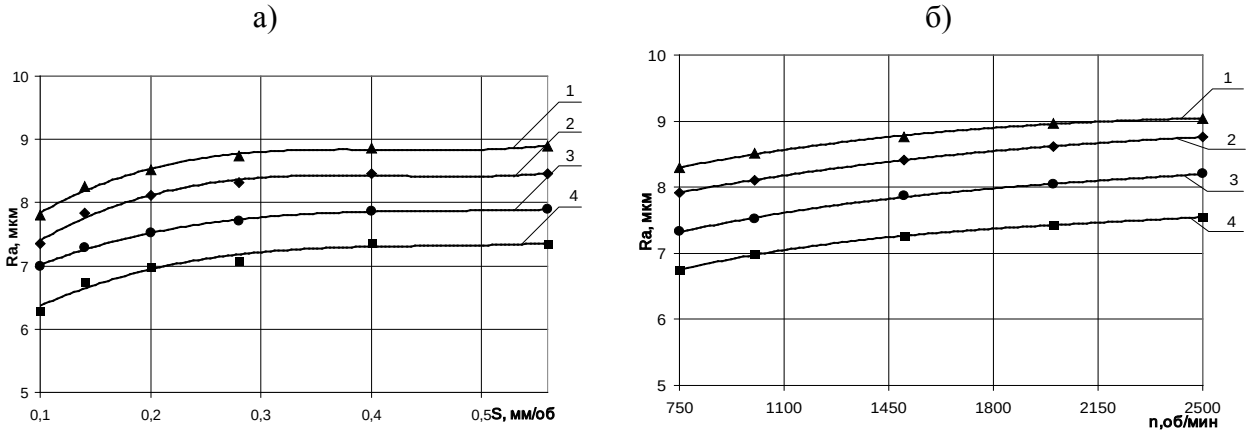


Рисунок 1 - Влияние (а) подачи и (б) скорости резания на качество полимерных КМ:
1 - полиэфирная смола 540-М 888 - 100 мас.ч.; пероксид №1 - 2,5 мас.ч.;
2 - ЭД-20 - 100 мас.ч.; ПЭПА - 11 мас.ч.; 3 - ЭД-20 - 100 мас.ч.; ПЭПА - 11 мас.ч.; ДБФ - 5 мас.ч.;
4 - ЭД-20 - 100 мас.ч.; ПЭПА - 11 мас.ч.; Сарэл 04 - 10 мас.ч.

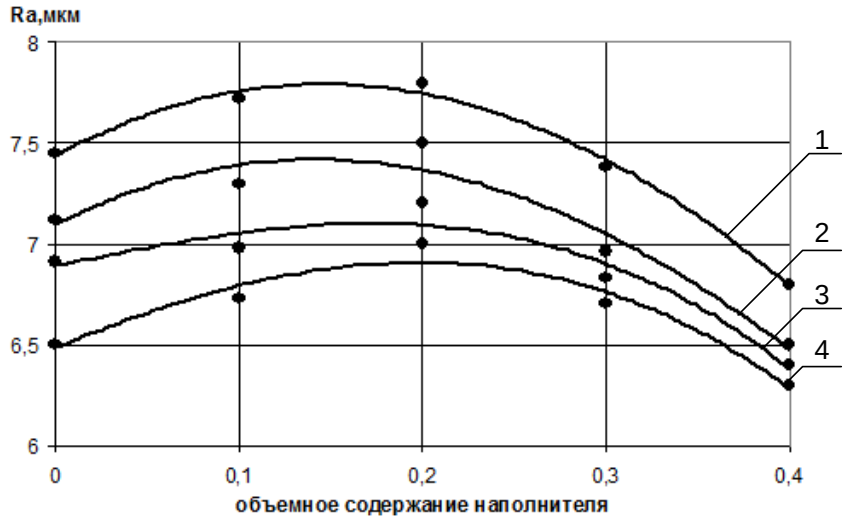


Рисунок 2 - Влияние объемного содержания маршалита ($S_{уд}$= 250 м²/кг) на качество полимерного КМ после механической обработки (n=1500 об/мин; S= 0,2 мм/об):
1 - Полиэфирная смола 540-М 888 - 100 мас.ч.; Пероксид №1 - 2,5 мас.ч.;
2 - ЭД-20 - 100 мас.ч.; ПЭПА - 11 мас.ч.; 3 - ЭД-20 - 100 мас.ч.; ПЭПА - 11 мас.ч.; ДБФ - 5 мас.ч.;
4 - ЭД-20 - 100 мас.ч.; ПЭПА - 11 мас.ч.; Сарэл 04 - 10 мас.ч.

В ходе экспериментальных исследований установлено, что механическая обработка КМ возможна при условии, что $\vartheta \le 0{,}4$ (ϑ - объёмное содержание наполнителя), так как при $\vartheta > 0{,}4$ происходит разрушение композита вследствие механодеструкции материала. Данный эффект обусловлен возникновением больших локальных механических напряжений, высокой температурой, превышающей теплостойкость органических составляющих материала, и интенсивных окислительных процессов, возникающих в процессе фрезерования КМ [4].

Для расчета режимов фрезерования полимерных КМ использовали стойкостную модель тейлоровского типа [5,6]:

(1) $$V = \frac{C_v \cdot D^{w_y} \cdot K_v}{T^m \cdot t^{x_v} \cdot S_z^{y_v} \cdot B^{n_v} \cdot z^{g_v}},$$

где C_v - коэффициент факторов, не входящих в уравнение в явном виде (физико-технологические свойства обрабатываемого материала и осевого инструмента); D - диаметр инструмента; K_v - коэффициент, учитывающий отличие конкретных условий работы инструмента от принятых за основу; T - лимитируемое время работы инструмента; S_z - подача на зуб фрезы; B - ширина срезаемого слоя; z - количество режущих кромок инструмента; $x_v, y_v, m, w_v, g_v, n_v$ - коэффициенты технологических параметров обработки.

Технологические параметры обработки КМ, полученные по тейлоровской модели, плохо коррелируют с экспериментальными данными в области низких подач (рис. 3).

Получена зависимость, позволяющая определить технологические параметры обработки КМ, с учетом экспоненциальной модели стойкости:

(2) $$V = \frac{C_v \cdot D^{w_y} \cdot K_v \cdot e^{w}}{T^m \cdot t^{x_v} \cdot S_z^{y_v} \cdot B^{n_v} \cdot z^{g_v}} \cdot \left(\frac{E_c}{E_m} \cdot \frac{k_{m.\text{уупр}c}}{k_{m.\text{уупр}m}} \right)^{z1} \cdot \times$$
$$\times \left(\frac{R_{\text{сж}.c}}{R_{\text{сж}.m}} \cdot \frac{k_{m.\text{сж}c}}{k_{m.\text{сж}m}} \right)^{z2} \cdot \left(\frac{R_{\text{сж}.c}}{R_{\text{сж}.m}} \cdot \frac{k_{m.HB.c}}{k_{m.HB.m}} \right)^{z3} \cdot k_{\text{о}}^{z4} \cdot k_{\text{ув}}^{z5},$$

где w - показатель степени, зависящий от D, S, T; $k_{m.\text{сж}}$, $k_{m.HB}$, $k_{m.\text{упр}}$ - коэффициенты стойкости в агрессивных средах; E_c и E_m - модуль упругости КМ и матричного материала; $R_{\text{сж.с}}$ и $R_{\text{сж.m}}$ - предел прочности при одноосном сжатии КМ и матричного материала; $k_{\text{о}}$ - коэффициент, характеризующий условно-мгновенный модуль упругости КМ: $k_o = \frac{E_{\text{ос}}}{E_{\text{ом}}}$; E_{oc} - условно-мгновенный модуль упругости композита; E_{om} - условно-мгновенный модуль упругости матричного материала; $k_{\text{ув}}$ - коэффициент, характеризующий равновесный модуль упругости КМ: $k_{\text{ув}} = \frac{E_{\text{увс}}}{E_{\text{увm}}}$; $E_{\text{увс}}$ - равновесный модуль упругости композита; $E_{\text{увм}}$ - равновесный модуль упругости матричного материала; $z_1 \ldots z_5$ - соответствующие показатели степени.

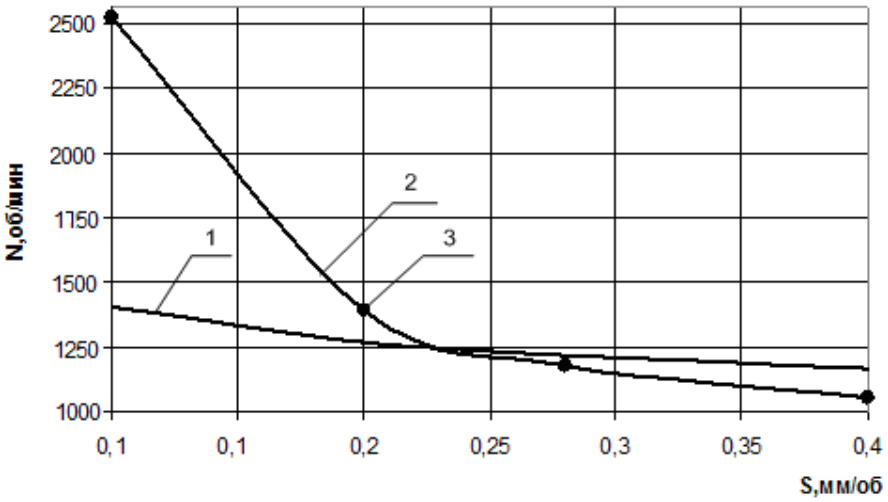


Рисунок 3 - Технологические параметры механической обработки КМ для операции фрезерования (ЭД-20 - 100 мас.ч.; ПЭПА - 11 мас.ч.; ДБФ - 5 мас.ч.; Маршалит ϑ=0,3):

1 - тейлоровская модель (1); 2 - по модели (2);3 - экспериментальные данные

Оптимизация режимов механической обработки проведена по обобщённому критерию (F_{ok}), учитывающему экономические (минимальная себестоимость обработки) и технологические (максимальная производительность) показатели:

$$F_{ок}(n,S) = \frac{L}{n \cdot S} \cdot [k_{\text{ст}} + k_{\text{зп}} + \frac{k_{\text{èí}} \cdot (n \cdot S_z^{\,y_v} \cdot B^{n_v} \cdot z^{g_v} \cdot t^{x_v})^{1/m}}{(k+1)(318 \cdot C_v \cdot D^{w_y - 1} \cdot e^{w} \cdot K_v \cdot \left(\frac{E_c}{E_m}\frac{k_{m.\text{óïð.c}}}{k_{m.\text{óïð.m}}}\right)^{z1} \cdot \left(\frac{R_{\text{ñæ.ñ}}}{R_{\text{ñæ.m}}}\frac{k_{m.\text{ñæ.c}}}{k_{m.\text{ñæ.m}}}\right)^{z2} \cdot \left(\frac{R_{\text{ñæ.ñ}}}{R_{\text{ñæ.m}}}\frac{k_{m.\text{ÍÂ .c}}}{k_{m.\text{ÍÂ .m}}}\right)^{z3} \cdot k_{\text{o}}^{\,z4} \cdot k_{\text{óâ}}^{\,z5})^{1/m}}], \quad (3)$$

где k - число переточек режущего инструмента, зависящее от марки инструментального материала и конструкции фрезы; L - длина рабочего хода осевого инструмента; n - частота вращения шпинделя; $k_{\text{ст}}$ - стоимость одной минуты работы станка; $k_{\text{зп}}$ - стоимость одной минуты рабочего времени работника; $k_{\text{ин}}$ - стоимость инструмента.

С применением F_{ok} установлены режимы обработки полимерных КМ специального назначения, используемых в качестве отделочных стеновых материалов и фасонных изделий (таблица 1).

Таблица 1 - Режимы механической обработки полимерных КМ специального назначения

№	Состав					Рекомендуемые режимы обработки		
	Полимерная смола	Отвердитель мас. ч. на 100 мас.ч. смолы	Модификатор мас. ч. на 100 мас.ч. смолы	Пластификатор мас.ч. на 100 мас.ч. смолы	Объемное содержание наполнителя	*n*, об/мин	*S*, мм/об	*R*a, мкм
Фитинговые системы								
1	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Диабаз ϑ=0,3	1500	0,20	7,0-8,0
2	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Маршалит ϑ=0,3	1500	0,20	7,0-8,0
3	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Цемент ϑ=0,3	1500	0,20	6,5-7,5
4	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Аэросил ϑ=0,3	1000	0,14	7,0-8,0
Облицовочные плитки								
5	540-М 888	Пероксид 2,5	-	-	Диабаз ϑ=0,3	1500	0,20	7,0-8,0
6	540-М 888	Пероксид 2,5	-	-	Диабаз ϑ=0,4	1000	0,28	6,5-7,5
7	540-М 888	Пероксид 2,5	-	-	Маршалит ϑ=0,3	1500	0,20	7,0-8,0
8	540-М 888	Пероксид 2,5	-	-	Маршалит ϑ=0,4	1000	0,28	6,0-7,0
9	540-М 888	Пероксид 2,5	-	-	Цемент ϑ=0,3	1500	0,28	7,0-8,0
10	540-М 888	Пероксид 2,5	-	-	Цемент ϑ=0,4	1000	0,28	6,5-7,5
11	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Диабаз ϑ=0,4	1000	0,20	6,5-7,5
12	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Маршалит ϑ=0,4	1000	0,20	6,5-7,5
13	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Цемент ϑ=0,4	1000	0,28	6,5-7,5
14	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Аэросил ϑ=0,4	750	0,20	7,0-8,0
Потолочные плитки								
15	540-М 888	Пероксид 2,5	-	-	Аэросил ϑ=0,3	1000	0,14	7,0-8,0
16	540-М 888	Пероксид 2,5	-	-	Аэросил ϑ=0,4	750	0,20	7,0-8,0
17	ЭД-20	ПЭПА 11	Сарэл 04 10	-	Диабаз ϑ=0,3	1500	0,28	7,0-8,0
18	ЭД-20	ПЭПА 11	Сарэл 04 10	-	Диабаз ϑ=0,4	1000	0,28	6,5-7,5
19	ЭД-20	ПЭПА 11	Сарэл 04 10	-	Маршалит ϑ=0,3	1500	0,28	7,0-8,0
20	ЭД-20	ПЭПА 11	Сарэл 04 10	-	Маршалит ϑ=0,4	1000	0,28	6,5-7,5
21	ЭД-20	ПЭПА 11	Сарэл 04 10	-	Цемент ϑ=0,3	1500	0,28	6,5-7,5

22	ЭД-20	ПЭПА 11	Сарэл 04 10	-	Цемент ϑ=0,4	1000	0,28	6,0-7,0
23	ЭД-20	ПЭПА 11	Сарэл 04 10	-	Аэросил ϑ=0,3	1000	0,20	7,0-8,0
24	ЭД-20	ПЭПА 11	Сарэл 04 10	-	Аэросил ϑ=0,4	750	0,20	7,0-8,0

Заключение. Полученные по рекомендуемым режимам механической обработки полимерные композиты по комплексным показателям качества (шероховатость поверхности, наличие сколов и трещин, других дефектов) превосходят изделия, изготовленные по справочным классическим моделям [7].

ЛИТЕРАТУРА

1. Строительные материалы / Под ред. В.Г. Микульского. - М.: Изд - во АСВ, 2000. - 536 с.: ил.

2. *Соколова Ю.А., Готлиб Е.М.* Модифицированные эпоксидные клеи и покрытия в строительстве. - Стройиздат, 1990. - 176 с.

3. *Комар А.Г.* Строительные материалы и изделия. - М.: Высш. шк., 1983. - 487 с.: ил.

4. *Степанов А.А.* Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов. - Л.: Машиностроение, Ленингр.отд-ние, 1987. - 176 с.: ил.

5. *Штучный Б.П.* Обработка пластмасс резанием: справочное пособие. - М.: Машиностроение, 1974. - 144 с.

6. *Ящерицын П.И.* Теория резания: учеб. */ П.И. Ящерицын, Е.Э. Фельдштейн, М.А. Корниевич.* - 2-е изд., испр. и доп. - Мн.: Новое знание, 2006. - 512 с.

7. *Кобаяши А.* Обработка пластмасс резанием / сокращ. перев. с англ. - М.: Машиностроение, 1974. - 192 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии М.С. Колесниковым.
Поступила в редакцию 4.03.09 г.

УДК 62-50

УПРАВЛЕНИЕ АНИЗОТРОПИЕЙ МАТЕРИАЛА ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ИЗНОШЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБИЛЯ МЕТОДОМ ПЛАСТИЧЕСКОЙ РЕНОВАЦИИ В РЕЖИМЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ (ВТМО)

М.А. Ососков; Д.Л. Панкратов, *к.т.н.*
Камская государственная инженерно-экономическая академия

Рассматривается формирование анизотропии свойств в конструкционных сталях (на примерах сталей 45 и 40Х) при использовании высокотемпературной механической обработки с обкаткой роликами. Описано влияние анизотропии на механические характеристики металла и его микроструктуру, роль ориентации элементов субструктуры в упрочнении материала деталей.

Введение. Как показывает практика, использование термомеханически упрочненных изделий возможно в редких случаях, когда для изготовления деталей не требуется применения значительной обработки резанием. В случае восстановления изношенных деталей автомобиля методом пластической реновации не требуется снятие значительных припусков при дальнейшей механической обработке.

Кроме того, ВТМО может быть использована для повышения эксплуатационной долговечности деталей в результате улучшения прочностных свойств конструкционных сталей с одновременным решением задачи формоизменения заготовок до нужных размеров. Возможность добиться таким образом снижения расхода металла, увеличения рабочих нагрузок в машинах, а кроме того, и упрочнения деталей с переменным по сечению химическим составом (например, с покрытиями или подвергнутых химико-термической обработке поверхности) делают актуальной задачу осуществления ВТМО на заготовках или деталях машин.

Однако для использования упрочняющего эффекта ВТМО с целью повышения эксплуатационных характеристик деталей машин необходимо решить комплекс технологических задач, касающихся вопросов взаимосвязи ВТМО с технологией формообразования качественных, высоконадежных деталей. К числу таких задач относится разработка вопросов направленности упрочнения при ВТМО, являющихся составной частью обшей теории высокопрочного состояния сталей [1].

Основная часть. Эффективность упрочнения при высокотемпературной деформации определяется следующими технологическими параметрами: скоростью нагрева и температурой аустенитизации, температурой и степенью деформации, характером (наличием последеформационных выдержек) и скоростью охлаждения, температурой отпуска.

При ВТМО охлаждение деформированного металла необходимо проводить так, чтобы были исключены промежуточные превращения.

Проведение ВТМО возможно при использовании различных способов деформации. Ниже рассмотрены механические свойства и структура сталей 45 и 40Х, как наиболее распространенных для изготовления деталей автомобиля, на примере ВТМО с обкаткой роликами.

Наиболее высокие значения временного сопротивления и предела текучести получены после отпуска при 200 и 300°С, при этом разница в характеристиках прочности для поперечных и продольных образцов составляла 300—500 МПа [2].

Температура нагрева 920-950^{0}С для сталей 45 и 40Х обеспечивает наибольшую прочность при достаточном уровне пластичности в низкоотпущенном состоянии.

На рис.1. видно, что значительное влияние на уровень прочности исследуемых сталей оказывает изменение степени деформации при ВТМО. С повышением степени деформа-

ции до 20% прочность увеличивается, причем наиболее существенно для стали 45 и несколько меньше для стали 40Х.

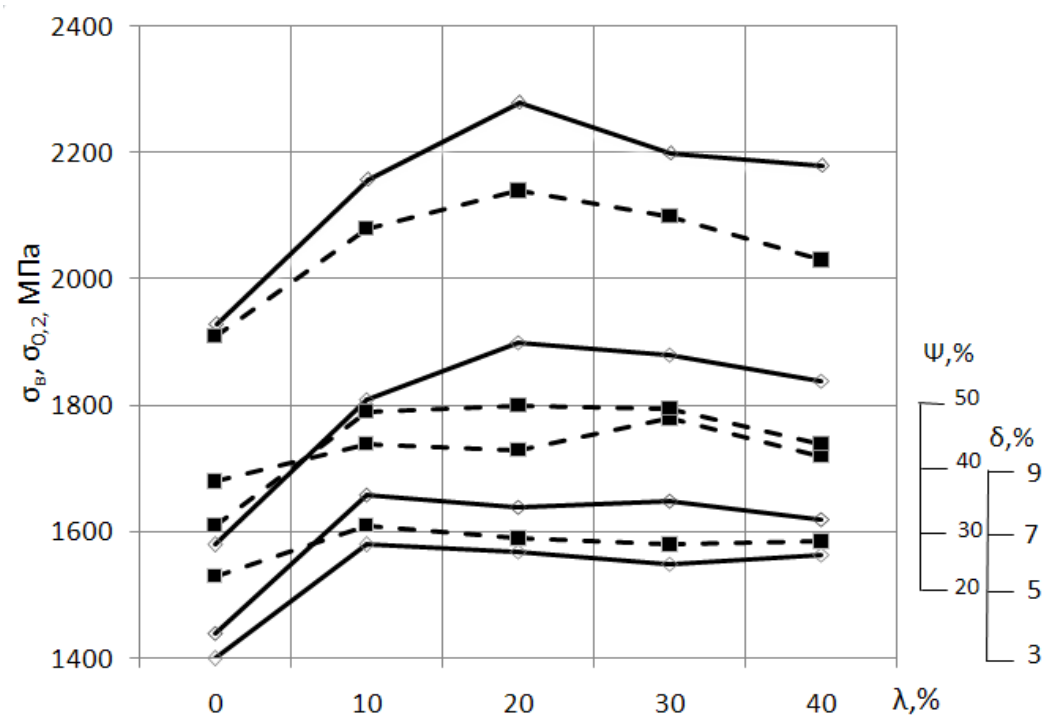


Рисунок 1 - Свойства сталей 45 (—) и 40Х (—) после ВТМО при испытании на растяжение ($t_{деф}$=950^{0}С, $t_{отп}$=200^{0}С)

С повышением степени деформации до 25-30% прочность и пластичность исследуемых сталей несколько снижаются, но остаются выше, чем после обычной закалки.

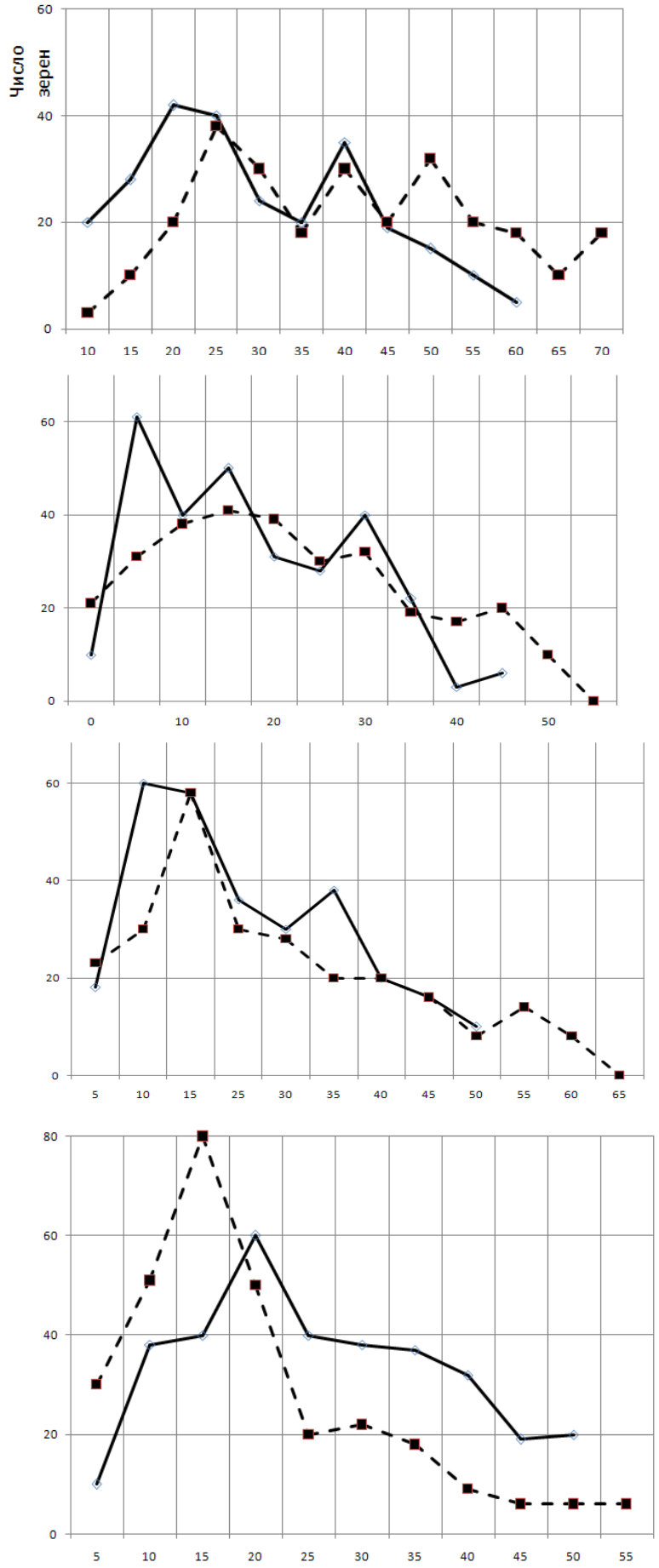
Также при испытаниях на продольное и поперечное нагружение отличие в свойствах связано с проявлением обычной анизотропии после горячей деформации. Обратное нагружение при испытании на кручение приводит к преждевременному отрыву по винтовой линии — линии ориентации волокна при упрочняющем кручении. Изменение характера разрушения — с хрупкого отрыва на вязкий срез — при увеличении температуры отпуска уменьшает и разницу в свойствах при прямом и обратном нагружении (кручении).

Анизотропия свойств сталей, обнаруженная при испытании прямым и обратным кручением, проявляется и при циклическом кручении с асимметричным циклом нагружения образцов сталей [3]. В этом случае асимметричное циклическое кручение, совпадающее по направлению с кручением при ВТМО, выявляет повышенные значения предела выносливости, в то время как при симметричном цикле пределы выносливости после обычной закалки и ВТМО (деформация кручением) одинаковы.

На анизотропию свойств непосредственно влияет микроструктура стали, размер зерен и время последеформационной выдержки. При исследовании температур и степеней деформации выявили предпочтительную ориентацию аустенитных зерен, но если после закалки с печным и индукционным нагревом зерно имеет равноосную форму, то при ВТМО наблюдаются искажения формы зерен и их границ. Отсутствие ориентации и вытянутости в поверхностных слоях объясняется в данном случае (для исследованных сталей) зарождением новых зерен, которые искажают картину границ, имевшуюся непосредственно после деформации. И лишь при минимальной температуре деформации (900°С) в поверхностных слоях стали 40Х после ВТМО наблюдается вытянутость аустенитных зерен вдоль оси заготовки.

Увеличение последеформационной паузы при ВТМО способствует дальнейшему развитию процессов рекристаллизации в поверхностных слоях заготовок (рис. 2). Этот процесс

протекает одинаково для всех сталей: 45, 40Х. Так, для стали 45 при выдержке 5 с наблюдается дальнейшее измельчение зерен со сдвигом всей кривой распределения влево (рис. 2).



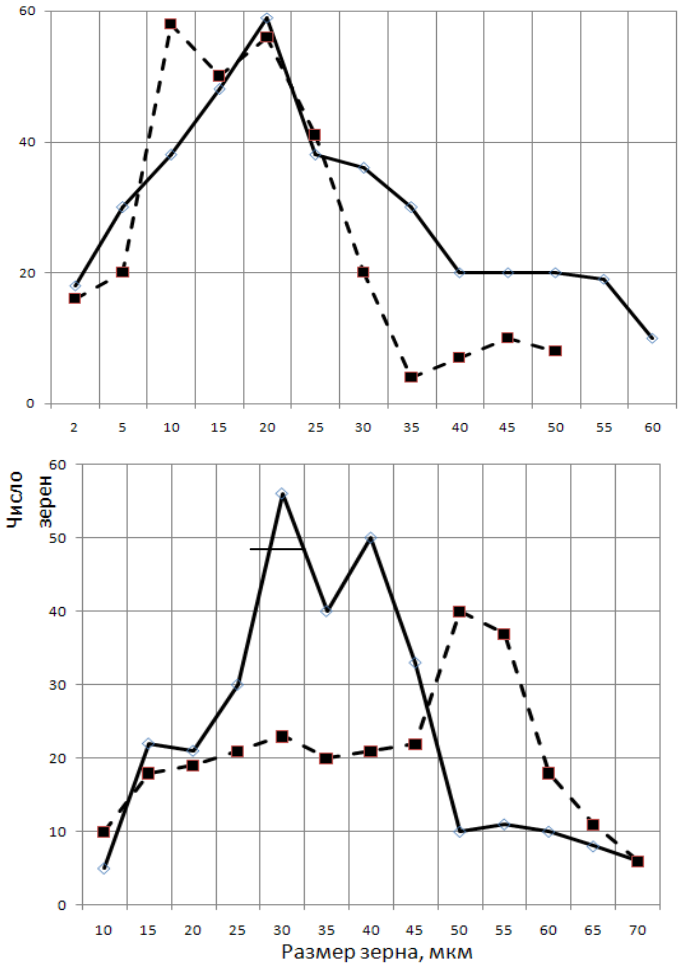


Рисунок 2 - Гистограммы распределения размеров аустенитных зерен стали 45 и 40Х при ВТМО с последеформационными выдержками (край (—), центр ( ))

Процесс продолжается и после выдержки 10 с — пик гистограммы остается сдвинутым влево, а число мелких зерен растет. Только после выдержки 20 с намечается смещение пика гистограммы зерен поверхностных зон образцов вправо, что свидетельствует о преобладании процессов роста зерен первичной рекристаллизации. Рост зерен с небольшой интенсивностью продолжается вплоть до выдержки в течение 2 мин.

Рассмотренные выше данные приводят к следующему выводу — металл после ТМО анизотропен и его анизотропность аналогична обычной анизотропности горячедеформированного металла; собственно влияние ТМО проявляется в приросте абсолютных значений характеристик прочности.

Но такой вывод односторонен, так как является следствием традиционного метода определения анизотропии — испытанием вдоль и поперек волокна. Трудно ожидать, что ВТМО или даже НМО существенно изменяют макроструктуру металла (направление волокон), тем более что в большинстве работ способ деформации при ТМО и предшествующей обработке один и тот же либо разный, но не изменяющий направления волокон (прокатка полосы и растяжение полосы при ТМО). Так, еще в работе [4] было указано, что анизотропия свойств после ВТМО в значительной степени предопределена исходной анизотропией, возникшей при предварительной обработке давлением [1].

Результаты исследования анизотропии свойств сталей испытанием продольных и поперечных образцов позволяют выявить пониженную прочность границ раздела матрица —

включение, но не могут объяснить многие из наблюдаемых особенностей процесса формирования свойств сталей при термомеханической обработке. Направление волокна не всегда определяет уровень свойств, достигаемый при ТМО. Так, в работе [5], несмотря на одинаковое направление волокна при прокатке и экструзии, было получено различное упрочнение после ВТМО группы сталей.

Теория, описывающая влияние на анизотропию свойств сталей направления волокон, базируется на представлении о решающей роли в разрушении сталей различных внутренних дефектов, например, пор или включений, ориентированных при значительных пластических деформациях. При этом предполагается, что при механических испытаниях или нагружении при эксплуатации поведение материала определяется концентрацией напряжений и деформаций около включений, возможностью растрескивания частиц или отрывом их от матрицы.

Имеющиеся результаты, полученные в перечисленных выше работах, обобщают только один частный случай влияния макроструктурного фактора на анизотропию прочностных характеристик сталей после ТМО и не позволяют установить общие закономерности изменения свойств при ТМО. Можно только утверждать, что свойства стали, подвергнутой термомеханическому упрочнению, зависят от направления нагружения при испытании и от способа деформации. Но зависимость свойств от способа деформации является только внешним проявлением сложных процессов пластической деформации, проходящих в металле.

Приведенные данные показывают, что оптимальную технологию ТМО деталей нельзя создать без учета анизотропии свойств сталей или направленности их упрочнения при высокотемпературной деформации [1].

Причинами возникновения анизотропии свойств при ТМО, как при любой обработке, связанной с пластической деформацией, большинство исследователей считает образование кристаллографической, геометрической ориентации структурных составляющих, ориентации внутренних макронапряжений [6, 7]. Но такой подход не учитывает особенность процесса ТМО — субструктурный характер упрочнения сталей, при котором основной причиной торможения движения дислокаций становится разветвленная сетка полигонизационных субграниц, образовавшихся в результате комплексного температурно-силового воздействия. Эти границы возникают при перестройке избыточных дислокаций внутри кристалла и ограничивают собой микрообъемы, в пределах которых ориентация решетки сохраняется практически постоянной. При развитой субструктуре в стали относительное влияние границ зерен и границ раздела матрицы с частицами второй фазы или неметаллическими включениями на процесс разрушения должно уменьшаться.

При исследовании анизотропии свойств сталей с развитой субструктурой можно отделить влияние ориентации субструктуры от влияния ориентации механической текстуры. Дело в том, что если последняя обусловлена в основном направлением течения металла при значительных степенях деформации, то ориентации субструктуры или одиночных дислокаций связаны с системами скольжения, определяемыми, согласно закону Шмидта, направлением действия максимальных касательных напряжений, не вызывающих при небольших деформациях образования или изменения ориентации механической текстуры. При этом необходимо учитывать, что ориентация субструктуры не исключает влияния на анизотропию свойств сталей с развитой субструктурой и названных выше факторов. Можно выделить два основных вида анизотропии — анизотропии сопротивления пластической деформации и анизотропии сопротивления хрупкому разрушению. Для последней роль механической текстуры не вызывает сомнения. На стадии же начала пластической деформации роль ориентации элементов субструктуры должна быть значительной.

Основой теории направленности термомеханического упрочнения сталей может служить гипотеза о том, что и при высокотемпературной деформации упрочняться будут те кристаллографические системы, в которых скольжение происходит в направлении действия максимальных касательных напряжений и закалкой фиксируется повышенное количество дислокаций. При последующих механических испытаниях сопротивление материала детали пластической деформации и разрушению будет определяться степенью соответствия направленности упрочненных кристаллографических систем и результирующих максимальных напряжений.

Представляя пластически деформированное состояние металла как результат суммирования всех напряжений за пределом упругости, можно предполагать возможность получения при ВТМО и изотропности свойств, если последовательно прикладывать к детали разнонаправленные нагрузки (например, растяжение-сжатие, кручение в разных направлениях). Это положение может реализоваться только при условии достаточной устойчивости упрочненного состояния на каждой стадии деформации, как в случаях, когда весь цикл деформации выполняется при температурно-скоростных условиях, не допускающих интенсивного развития разупрочнения.

При обычной горячей обработке давлением из-за проходящей рекристаллизации не может рассматриваться вопрос о накоплении и структурной «памяти» металла о разнонаправленных сдвигах и управлении характером упрочнения. В этом случае образующиеся механическая и кристаллографическая текстуры характеризуют конечный результат пластической деформации — направление течения металла. Термомеханическая обработка проводится так, чтобы подавить рекристаллизацию и зафиксировать охлаждением особенности микроструктуры после пластической деформации. В связи с этим можно предполагать, что при ВТМО будет происходить накопление сдвигов в различных системах скольжения, ориентированных при последовательном изменении направления действия касательных напряжений.

Основным фактором, управляющим направлением скольжения, является деформационно-силовая схема в очаге деформации металла, форма и размеры инструмента, варьируя которые можно обеспечить заданную неравномерность деформации и преимущественное скольжение в металле в любом направлении.

При большинстве методов деформации, когда деформирование металла определяется действием растягивающих или сжимающих нагрузок, получается принципиально однотипное распределение линий скольжения, изменяемое в поверхностных слоях действием контактных нагрузок.

Четко выраженный ориентированный характер скольжения проявляется при относительно небольших степенях деформации. По мере развития скольжения возрастет сопротивление движению дислокации в первичных системах, и создаются условия для перехода скольжения во вторичные системы, развивается поперечное скольжение за счет перехода винтовых дислокаций в параллельные плоскости [8].

Заключение. Поскольку пластическая деформация приводит к упрочнению сталей, то и изменение направления скольжения можно рассматривать в прямой связи с возможной ориентацией упрочнения. Тем самым можно управлять степенью анизотропности металла, получая в нужных направлениях наивысшие сопротивления пластической деформации и сопротивление разрушению, что позволит обеспечить повышение эксплуатационных свойств как восстановленных, так и новых деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Шаврин О.И.* Технология и оборудование термомеханической обработки деталей машин. - М.: Машиностроение, 1983.- 176 с.

2. *Ермаков В.М., Чугунов В.В., Орженовский Ю.Ф.* Низкотемпературная термомеханическая обработка конструкционных сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. - 1963. - № 4. - С. 25-28.

3. *Выволь И.П., Кукляк М.Л., Романив О.Н.* Ориентированное термомеханическое упрочнение и циклическая прочность стали // Физика и химия обработки материалов.- 1967.- №2. - С.131-133.

4. *Романив О.Н.* Об одном случае механической анизотропии стали после термомеханической обработки //Физико-химическая механика материалов.- 1965.- № 4.- С.75-78.

5. *Бернштейн М.Л., Пецов Г.Г.* Влияние способа деформации при ВТМО на свойства конструкционных сталей // В кн.: Повышение конструктивной прочности сталей и сплавов. - М., 1960. - С.112-120.

6. *Микляев П.Г., Фридман Я.Б.* Анизоторопия механических свойств материалов. - М.: Металлургия, 1969. - 268 с.

7. *Охрименко Я.М., Тюрин В.А.* Неравномерность деформации при ковке. - М.: Машиностроение, 1969. - 185 с.

8. *Соун П.Р.* Дислокационные группы в ГЦК металлах и сплавах // В кн.: Электронная микроскопия и прочность кристаллов. - М.: Металлургия, 1968.- С.123-169.

Статья представлена к публикации членом редколлегии М.С. Колесниковым.
Поступила в редакцию 6.03.09 г.
УДК 669.017:621.7

НОВЫЕ ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ

Р.Р. Калимуллин, С.С. Соловейчик, Н.Н. Западнова, Р.Н. Абдрахманов
Камская государственная инженерно-экономическая академия, ОАО «КАМАЗ»

Приведены марки комплекснолегированных сталей, применяемых в производстве автомобилей КамАЗ. Показано влияние различных химических элементов на физико-механические свойства сталей. Предложены экономнолегированные стали для валов, рессор и шестерен автомобиля.

Введение. В настоящее время, в период бурного развития металлургической промышленности (Китай, Индия, Бразилия) особенно остро встает вопрос использования экономнолегированных сталей из-за дефицита легирующих элементов: никеля (Ni), молибдена (Mo), ванадия (V), титана (Ti) и др.

В конструкциях автомобилей КамАЗ используются различные комплексно легированные стали. Например: 42ХМФА (коленчатые валы), 12ХН3А (поршневой палец), 45Х2НМФА (штанга стабилизатора), 20ХГНМТА (шестерни и валы коробок передач, раздаточных коробок, главных передач), 50ХГФА (рессоры), 18ХГТ (распределительный вал двигателей, шестерни), 35ХГСА (валы главной передачи), 40ХГТР (ступицы), 47ГТ (полуоси) и др.

Легированием стали различными элементами и применением соответствующей термической обработки можно получить, по сравнению с углеродистой сталью, большую вязкость при одинаковой прочности, большую прочность при одинаковой вязкости и даже одновременно более высокие прочность и вязкость. Но преимущества легированных сталей по сравнению с углеродистыми заключаются не только в более высоких механических свойствах. Легированием также можно изменить физико-химические свойства сплава и получить сталь нержавеющую, кислостойкую, жаропрочную, немагнитную, магнитную, с особыми тепловыми и электрическими свойствами и т.д.

Применение этих сталей обусловлено условиями эксплуатации деталей и узлов автомобиля.

В таблице 1 показано влияние конкретных легирующих элементов на основные показатели свойств стали. Особо следует отметить влияние таких элементов, как азот, бор и сера:

- азот – в сочетании с Al, Nb, W, Mo сильно увеличивает прочность за счет образования дисперсных нитридных соединений;
- бор - резко повышает прокаливаемость стали даже при малом процентном содержании 0,001-0,003%;
- сера – при ее содержании в пределах 0,01-0,03% улучшается обрабатываемость резанием и сохраняются на высоком уровне механические свойства стали.

На основании научно-исследовательских работ в ОАО «КАМАЗ» внедрены экономнолегированные марки стали для ряда деталей.

Так, для шестерен и валов коробки передач, раздаточной коробки и главной передачи внедрена сталь 18ХГР взамен 20ХГНМТА. Ведутся опытные работы по внедрению этой стали и для других деталей двигателя, коробки передач и автомобиля. Для изготовления штанг стабилизатора взамен 45Х2НМФА внедрена сталь 50Х3.

Ведутся работы по внедрению стали 12ХН2Р взамен 12ХН3А на пальцы поршневые.

После длительной работы успешно внедрена сталь 62ПП взамен 50ХГФА на рессоры. Эта сталь пониженной прокаливаемости (ПП), для упрочнения которой используется технология объемно-поверхностной закалки (ОПЗ). Значительно повысился срок службы рессор, из-за чего у производителей (Чусовской металлургический завод) возникла проблема с реализацией рессор в запасные части.

Таблица 1 - Влияние легирующих элементов на свойства стали

Наименование элемента	Твердость и прочность	Прокаливаемость	Пластичность	Прочность при высоких Т, ^{0}С
Ванадий	Повышаются	-	Повышается	Мало влияет
Вольфрам	Повышаются	Увеличивается	-	Значительно повышается
Кремний	Повышаются	Увеличивается	Понижается	Мало влияет
Марганец	Повышаются	Увеличивается	Понижается	Мало влияет
Молибден	Повышаются	Сильно увеличивается	Повышается при 0,6%	Повышается
Никель	Повышаются	Увеличивается	Незначительно повышается	Мало влияет
Титан	Повышаются	-	Снижается при более 1,5%	Мало влияет
Хром	Повышаются	Увеличивается	Повышается	Повышается
Ниобий	Повышаются	-		-

Активно ведутся работы по внедрению высокопрочных сталей с нитридванадиевым упрочнением для изготовления деталей рам автомобиля (лонжероны, усилители, поперечины). Это позволит уменьшить толщину проката и соответственно вес рамы.

Ведутся работы по поиску и внедрению экономнолегированных сталей и для коленчатых валов, ободьев колес и других деталей.

Особое внимание у потребителя должно уделяться нормативно-технической документации на металлопродукцию. Во вновь разрабатываемых и согласуемых технических условиях с меткомбинатами должны указывать все необходимые механические и физические свойства, размерность, химический состав, методы контроля качества и другие показатели. В качестве примера можно привести недавно разработанные ТУ 14-1-5561-2008 с Оскольским электрометаллургическим комбинатом на прокат сортовой из экономнолегированной марки стали 18ХГР, предназначенной для изготовления шестерен и валов автомобиля, в альтернативу марке 20ХГНМТА, химический состав которых приведен в таблице 2.

С целью повышения прокаливаемости и экономии дефицитных легирующих элементов в сталь 18ХГР добавляют В (бор). Бор относится к элементам внедрения и имеет очень малую растворимость в α-твердом растворе (<0,003%), поэтому фактическое содержание бора в конструкционных сталях обычно не превышает 0,002-0,005%. При его более высоком содержании в стали может образовываться боридная эвтектика, приводящая к снижению горячей пластичности и вязкости при различных температурах. Увеличение прокаливаемости стали обеспечивается только бором, находящимся в твердом растворе, а его избыток - выше предела растворимости, приводит к образованию боридой эвтектики и не влияет на прокаливаемость [1].

Сравнительный анализ прокаливаемости стали 18ХГР (аналог стали 20CrMn5 широко применяемой за рубежом) и 20ХГНМТА показал, что новая сталь имеет более узкую полосу прокаливаемости (рис. 1), а соответственно и более стабильные свойства, что в итоге положительно повлияет на эксплуатационные показатели свойств изделия.

Таблица 2 - Химический состав сталей

Марка стали	Содержание химических элементов, %									Примечание
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	Mo	S	P	
18ХГР	0,14-0,20	0,15-0,40	1,10-1,35	1,10-1,35	0,15-0,30	≤ 0,005	0,04-0,12	0,020-0,035	≤ 0,025	ТУ 14-1-5561-2008
20ХГНМТА	0,18-0,23	0,17-0,37	0,8-1,1	0,8-1,1	0,8-1,1	0,03-0,09	0,2-0,3	≤ 0,025	≤ 0,025	ТУ 14-1-3324 и ТУ 14-1-5528

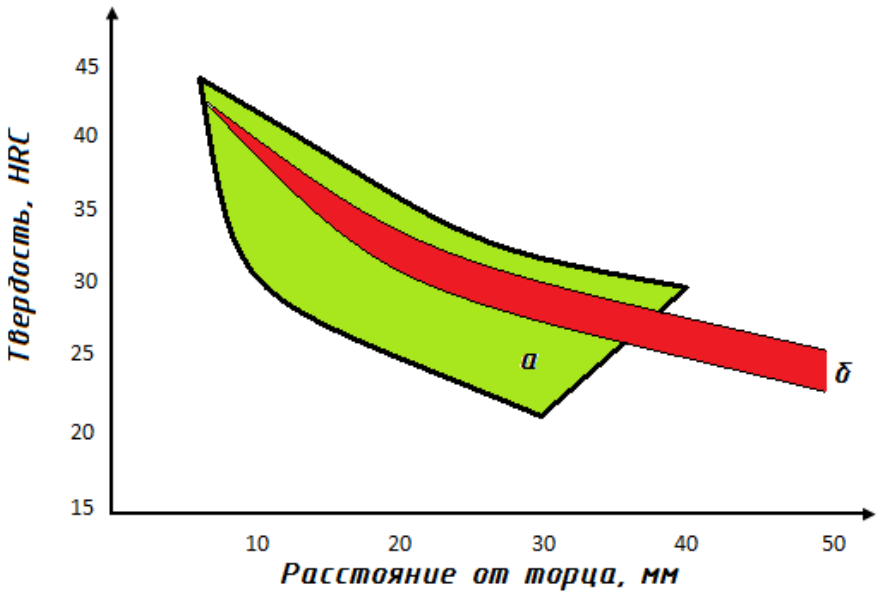


Рисунок 1 - Полосы прокаливаемости стали 20ХГНМТА (а) и 18ХГР (б)

ЛИТЕРАТУРА

1. *Титова Т.И., Шульган Н.А., Малыхина О.Ю.* Исследование влияния микролегирования бором на структуру и прокаливаемость строительной стали // Металловедение и термическая обработка металлов (МиТОМ). – 2007. - №1. – 45 с.

Статья представлена к публикации В.И. Астащенко.
Поступила в редакцию 14.04.09 г.

РАЗДЕЛ 6

Элементы и компоненты производственных систем

УДК 629.113.004

ОЦЕНКА КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СЕРВИСНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Р.Г. Хабибуллин, *к.т.н.,* Д.М. Лысанов, *к.т.н.*
Камская государственная инженерно-экономическая академия

Рассмотрена методика, позволяющая объединить разноразмерные технико - экономические показатели технологического оборудования в один безразмерный интегральный показатель – коэффициент качества, по которому можно объективно оценить конкурентные модели.

Внедрение прогрессивных технологических процессов невозможно осуществить без применения новых видов оборудования, средств механизации и инструмента. Но даже и при сохранении традиционных технологий процесс обновления существующего оборудования и оснащения предприятий недостающими моделями оборудования должен происходить постоянно и непрерывно [2].

Необходимость оснащения существующих предприятий новым оборудованием обусловлена многими факторами: это и моральный износ отдельных образцов, и физическое старение оборудования в результате длительной эксплуатации, и внедрение специального оборудования, обеспечивающего потребности производства.

Сегодня на сервисных предприятиях число единиц оборудования не удовлетворяет фактическим потребностям производства. Оснащенность технологическим оборудованием по стоимости составляет 45 – 50% [3].

Оценка новой техники должна производиться с точки зрения требований потребителя, от удовлетворения которых зависит и благополучие производителя. На рынке спрос находит лишь конкурентоспособный товар, т. е. такой, который по комплексу качественных показателей превосходит товары – аналоги, а цена с точки зрения потребителя соответствует заложенному в товаре уровню качества. Конкурентоспособность должна оцениваться на двухкоординатном поле качество – цена, т. к. реализованному в товаре уровню качества в каждый период времени соответствуют вполне определенные общественные затраты, которые выражаются в цене товара. Конкурентоспособность товара оценивается исходя из отклонений его реальной цены от цены при реализованном в товаре уровне качества. Для оценки конкурентоспособности изделия необходимо установить его цену и количественно определить качество изделия.

Для оценки качества продукции с учетом квалиметрических требований [1] предлагается использовать интегральный коэффициент качества, который определяется методом «профилей». Профилем изделия называется графическое изображение выбранных технико – экономических показателей (ТЭП) изделия по определенным правилам. Метод может быть использован для оценки уровня качества путем сравнения профилей конкурентных изделий. Чем больше площадь профиля, тем выше качество объекта. Профиль позволяет разноразмерные показатели изделий изобразить на одном оценочном поле и объединить их в интегральный показатель качества.

Профиль качества строится с соблюдением следующих принципов:

– в условиях конкуренции на рынке каждый технико – экономический показатель

изделия имеет существенное значение и нельзя особо выделять какой – то из них: все свойства изделия, характеризующие его качество, важны для потребителя;

– все показатели имеют одинаковый вес, и оценочное поле делится на равные области, количество которых равно числу оценочных параметров. Многие ТЭП изделий тесно взаимосвязаны, и придание большего веса какому – то из них может привести к необоснованному усилению влияния этого параметра на интегральный показатель;

– оценочное поле делится на равные (n – 1) части, где n – число ТЭП, выбранное исходя из предпочтений потребителей, ширина оценочного поля Н выбирается произвольно;

– шкалы отдельных показателей градуируются так, чтобы все значения показателей лежали между выбранными минимальным и максимальным значениями рассматриваемого показателя;

– каждый ТЭП объекта откладывается на делительной шкале, чем значение показателя качественно лучше, тем правее оно располагается на делительной шкале;

– при построении различают прямые и обратные показатели. Если при увеличении значения показателя качество изделия улучшается, то показатель называется прямым, в противном случае – обратным.

Для построения профиля качества объекта выбираются индивидуальные, наиболее значимые оценочные критерии исходя из требований потребителей к данному виду оборудования и прямоугольное оценочное поле. Для оценки тормозных стендов, входящих в состав диагностических линий, рекомендуется принимать показатели качества, приведенные в табл. 1 для моделей различных производителей.

В профиль может быть включено любое количество параметров, которые с точки зрения потребителей наиболее значимы для данного вида технологического оборудования. С увеличением их количества достоверность оценки повышается. По форме профилей можно оценить, в чем та или иная модель оборудования превосходит или уступает другим.

Таблица 1 - Оценочные критерии тормозных стендов различных производителей

№ п/п	Наименование показателей		Cartec (Германия)		CEMB (Италия)		ГАРО (Россия)	
	Стенд контроля тормозных систем		BDE 4004		FVP 2		СТС–13У– СП–11	
1	Допустимая нагрузка на ось, т	пр	18		16		13	
2	Диаметр колес автомобиля, мм	пр	500	1300	520	1300	520	1300
3	Ширина колеи по роликам, мм	пр	1000	3000	800	2850	800	2800
4	Коэффициент сцепления шин с роликами	пр	0,9		0,9		0,8	
5	Скорость вращения роликов, км / ч	пр	2,6		2,5		2,2	
6	Диапазон измерения осевого веса, т	пр	0	18	0	16	1	13
7	Диапазон измерений тормозных сил, кН	пр	8	40	0	40	5	30
8	Диапазон измерений усилия на органе управления, Н	пр	0	1000	0	1000	100	1000
9	Давление в пневмоприводе, кПа	пр	0	1200	0	1300	200	1000
10	Время срабатывания, с	обр	1,1		1,1		1,5	
11	Длина роликов, мм	пр	1000		1000		1235	
12	Диаметр роликов, мм	пр	300		300		301	
13	Межосевое расстояние, мм	обр	500		500		560	
14	Мощность электродвигателя, кВт	пр	11		11		7,5	
15	Электропитание, В	обр	400		380		380	
16	Вес, кг	обр	1320		1300		1200	
17	Производительность, а/м в смену	пр	36		34		30	
	Цена тормозного стенда, тыс. руб.		**925**		**1147**		**733**	

Качество технологического оборудования может быть оценено интегральным безразмерным показателем – относительной площадью профиля, построенного внутри оценочного прямоугольника по технико – эксплуатационным, экономическим, нормативно – правовым показателям по соотношению

$$К_к = \frac{S_{пр}}{S},$$

где $S_{пр}$ – площадь, ограниченная профилем, мм^2;

S – площадь оценочного прямоугольного поля, мм^2.

$S_{пр} = h * (X_1 / 2 + X_2 + ... + X_{n-1} + X_n / 2)$,

h – расстояние между делительными шкалами (выбирается произвольно), мм;

$X_1, ..., X_n$ – координаты вершин профиля, мм.

$S = h * (n – 1) * H$,

H – ширина оценочного поля, мм.

С учетом вышеприведенных формул интегральный коэффициент качества равен

$$К_к = \frac{X_1 / 2 + X_2 + ... + X_{n-1} + X_n / 2}{(n – 1) * H}.$$

В табл. 2 представлены исходные данные для построения профилей качества тормозных стендов и полученные значения коэффициентов качества.

Таблица 2 - Исходные данные для построения профилей качества некоторых тормозных стендов, мм

№ п/п	Наименование показателей		Диапазон значений		Cartec (Германия)		CEMB (Италия)		ГАРО (Россия)	
	Стенд контроля тормозных систем		мин	макс	BDE 4004		FVP 2		СТС–13У–СП–11	
1	Допустимая нагрузка на ось, т	пр	13	18	0	100	0	60	0	0
2	Диаметр колес автомобиля, мм	пр	500	1300	0	100	3	100	3	100
3	Ширина колеи по роликам, мм	пр	800	3000	9	100	0	93	0	91
4	Коэффициент сцепления шин с роликами	пр	0	1	0	90	0	90	0	80
5	Скорость вращения роликов, км / ч	пр	2	2,6	0	100	0	83	0	33
6	Диапазон измерения осевого веса, т	пр	0	18	0	100	0	89	6	72
7	Диапазон измерений тормозных сил, кН	пр	0	40	20	100	0	100	13	75
8	Диапазон измерений усилия на органе управления, Н	пр	0	1000	0	100	0	100	10	100
9	Давление в пневмоприводе, кПа	пр	0	1300	0	92	0	100	15	77
10	Время срабатывания, с	обр	1,5	0	0	27	0	27	0	0
11	Длина роликов, мм	пр	1000	1300	0	0	0	0	0	78
12	Диаметр роликов, мм	пр	200	350	0	67	0	67	0	67
13	Межосевое расстояние, мм	обр	600	400	0	50	0	50	0	20
14	Мощность электродвигателя, кВт	пр	7,5	15	0	47	0	47	0	0
15	Электропитание, В	обр	400	380	0	0	0	100	0	100
16	Вес, кг	обр	1400	1150	0	32	0	40	0	80
17	Производительность, а/м в смену	пр	30	40	0	60	0	40	0	0
	Коэффициент качества				**0,659510**		**0,708065**		**0,580071**	
	Цена тормозного стенда, тыс. руб.				**925**		**1147**		**733**	
	Коэффициент конкурентоспособности				**7,13E-04**		**6,17E-04**		**7,91E-04**	

При построении профиля показатели качества можно сгруппировать по характерным признакам или свойствам изделия. Например, технико – эксплуатационные, нормативно – правовые, экономические показатели, качество сервиса могут составлять самостоятельные группы. Тогда можно определить коэффициент качества изделия по данной группе показателей. Например, все экономические показатели изделия группируются и по данному участку профиля рассчитывается коэффициент качества изделия по показателям экономической эффективности.

На рис. 1 построен профиль качества для стенда СТС–13У–СП–11 производства Новгородского завода ГАРО (Россия).

Для рассматриваемых тормозных стендов места по коэффициентам качества распределяются следующим образом:

1. СЕМВ – $К_к$ = 0,708;
2. Cartec – $К_к$ = 0,660;
3. ГАРО – $К_к$ = 0,580.

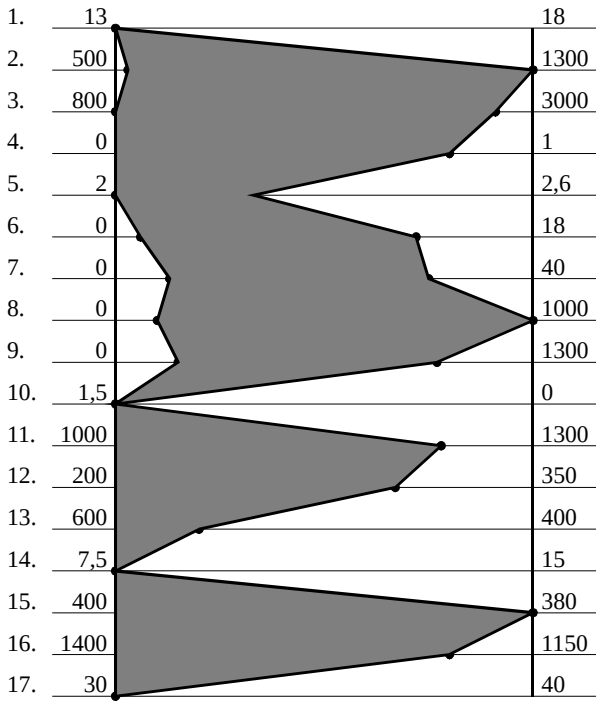


Рисунок 1 - Профиль качества тормозного стенда ГАРО

Как видно из приведенных показателей, наиболее высокий показатель качества имеет тормозной стенд СЕМВ (Германия), который является лучшим среди аналогов по критерию «качество». Он существенно превосходит технико – экономические показатели стенда ГАРО (Россия). Для повышения качества выпускаемой продукции необходимо использовать новые разработки и передовые технологии отечественных и зарубежных предприятий, работающих на рынке технологического оборудования для сервисного обслуживания автомобильной техники.

Величина полученного коэффициента качества зависит от выбора порядка расположения показателей качества, их количества и градуировки оценочных шкал. Профили всех сравниваемых изделий строятся на одном и том же оценочном поле, поэтому вышеназванные факторы на конечный результат не оказывают влияния.

Порядок расположения тормозных стендов по коэффициентам качества полностью совпал с местами, установленными экспертами, работающими на автотранспортных и сервисных предприятиях.

Для определения коэффициента качества необязательно для каждого объекта строить профили, хотя они и наглядны. Коэффициент качества аналитически можно рассчитать по формуле

$$К_к = \frac{Y_1 / 2 + Y_2 + ... + Y_{n-1} + Y_n / 2}{n - 1},$$

где $Y_1, ..., Y_n$ – расчетные величины, определяемые по формулам

$$Y_{iпр} = \frac{П_i - П_{imin}}{П_{imax} - П_{imin}}.$$

Уравнение используется для тех показателей, увеличение значений которых улучшает качество изделия (допустимая нагрузка на ось, коэффициент сцепления шин с роликами, производительность стенда).

$$Y_{iобр} = \frac{П_{imax} - П_i}{П_{imax} - П_{imin}}.$$

Уравнение применяется для тех показателей, повышение значений которых снижает качество изделия (время срабатывания, вес стенда).

$$Y_{i12} = \frac{П_{i2} - П_{i1}}{П_{imax} - П_{imin}},$$

Уравнение используется для прямых и обратных показателей качества.

$П_{imax}$ и $П_{imin}$ – принятые граничные максимальные и минимальные значения интервала для i – го показателя (табл. 2 и рис. 1).

$П_i$ – значение i – го показателя для оцениваемого изделия (показатель 1); $П_{i1}$, $П_{i2}$ – начальное и конечное значение i – го показателя для оцениваемого изделия, если исследуется диапазон, в котором могут изменяться значения показателя, причем $П_{i1} < П_{i2}$ (показатель 2).

За $П_{imax}$ рекомендуется принимать максимальное значение i – го показателя среди выбранных для анализа изделий – аналогов, а за $П_{imin}$ – минимальное значение i – го показателя.

Используя интервалы максимальных и минимальных значений технико – экономических показателей определяется коэффициент качества для тормозного стенда Новгородского завода ГАРО:

$$К_к = (0 / (2*5) + 780 / 800 + 2000 / 2200 + 0,8 / 1 + 0,2 / 0,6 + 12 / 18 + \\ + 25 / 40 + 900 / 1000 + 800 / 1300 + 0 / 1,5 + 235 / 300 + 101 / 150 + \\ + 40 / 200 + 0 / 7,5 + 20 / 20 + 200 / 250 + 0 / (2*10)) / 16 = 0,58007.$$

В данном выражении каждый из членов суммы показывает роль того или иного показателя, влияющего на величину коэффициента качества. Например, отношение 0,8 / (1∗16) = 0,05 – доля влияния коэффициента сцепления шин с роликами на показатель качества и чем его значение больше, тем по этому показателю изделие качественнее.

В результате вычислений получается значение коэффициента качества, полностью совпадающее со значением этого коэффициента, рассчитанного методом профиля.

На оценочном поле показатели качества для разных изделий могут располагаться в разном порядке, но во всех полях $П_{imax}$ и $П_{imin}$ должны быть одни и те же. При изменении значений $П_{imax}$ и $П_{imin}$ величина коэффициента качества меняется, поэтому для всех сравниваемых объектов для показателя $П_i$ надо брать одни и те же $П_{imax}$ и $П_{imin}$.

Данная методика может быть использована для обоснованного выбора технологического оборудования с целью оснащения новых или технического перевооружения существующих сервисных предприятий дилерской сети.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Костин И.М., Фасхиев Х.А.* Технико-экономическая оценка грузовых автомобилей при разработке. Набережные Челны: Изд–во Камского политехн. ин–та, 2002. - 479 с.
2. *Кузнецов Е.С.* Техническая эксплуатация автомобилей в США. - М.: Транспорт, 1992. - 352 с.
3. *Курников И.П.* Эффективность технического перевооружения производства. - Киев: Высшая школа, 1983. - 103 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.В. Румянцевым.
Поступила в редакцию 7.04.09 г.

УДК 629.113.004

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТ НА АВТОСЕРВИСНОМ ПРЕДПРИЯТИИ

Д.М. Лысанов, *к.т.н.*
Камская государственная инженерно-экономическая академия

Рассмотрены особенности технологических процессов выполнения работ технического обслуживания и ремонта на автосервисном предприятии с учетом случайных характеристик входящего потока требований.

Результативность работы рынка автосервисных услуг связана с механизмом его функционирования, который характеризуется следующими составляющими:

• качество предлагаемого товара - услуги;
• рыночная цена на услуги;
• эффективность производства услуг;
• используемые технологии;
• прибыльность бизнеса.

Механизм функционирования рынка автосервисных услуг представляет собой способы поведения хозяйствующих субъектов на рынке, а также взаимодействия цены, спроса и предложения. С одной стороны спрос на услуги зависит от доходов потребителей услуг, с другой стороны - от цены на них.

К неценовым факторам, формирующим спрос на услуги, относятся следующие [3]:

1. Парк автомобилей в пользовании граждан и в собственности организаций.
2. Интенсивность эксплуатации автомобилей.
3. Качество и комплексность оказываемых услуг.
4. Плотность размещения предприятий системы обслуживания автотранспорта и автовладельцев.
5. Доходы потребителей и уровень цен на услуги автосервиса.
6. Состояние дорожной сети: протяженность и плотность автомобильных дорог.
7. Надежность конструкции и качество автомобилей, т.е. эксплуатационные качества автотранспортных средств.
8. Качество горюче-смазочных материалов и запасных частей.
9. Доступность услуг.
10. Условия эксплуатации автомобилей.
11. Комплекс социальных условий.

На повышение спроса на автосервисные услуги влияет ряд факторов, формирующих внешние условия для организации такого бизнеса:

1. Наличие адекватной нормативно-правовой базы.
2. Развитие технологий и разработка нового оборудования для обслуживания и ремонта автомобилей.
3. Развитие системы подготовки и переподготовки кадров.
4. Наличие нормально функционирующей системы инвестирования и кредитования предприятий.
5. Налоговый климат в данной сфере деятельности.

Современные сервисные предприятия – многофункциональные предприятия, которые в зависимости от мощности и назначения осуществляют: техническое обслуживание (ТО) и текущий ремонт (ТР) автомобилей в течение гарантийного и послегарантийного периодов эксплуатации, диагностирование и капитальный ремонт узлов и агрегатов, продажу и предпродажную подготовку автомобилей, продажу запасных частей, эксплуатационных материалов и автопринадлежностей.

Автомобиль представляет собой сложную техническую систему многократного использования, предназначенную для выполнения транспортной работы. На

работоспособность автомобиля оказывают влияние следующие факторы: нагрузки в элементах конструкций, природно – климатические и дорожные условия эксплуатации, режимы работы. В силу воздействия этих факторов изменение технического состояния автомобиля и появление отказов и неисправностей являются случайными событиями.

Поэтому с целью поддержания автомобилей в технически исправном состоянии используется система технического обслуживания и ремонта, которая включает в себя проведение комплекса технических обслуживаний (ежедневное обслуживание (ЕО), диагностика (Д – 1, Д – 2), ТО – 1, ТО – 2) и ремонтов (текущий, капитальный).

В основу организации производства на автосервисных предприятиях положена единая функциональная схема (рис. 1) [4].

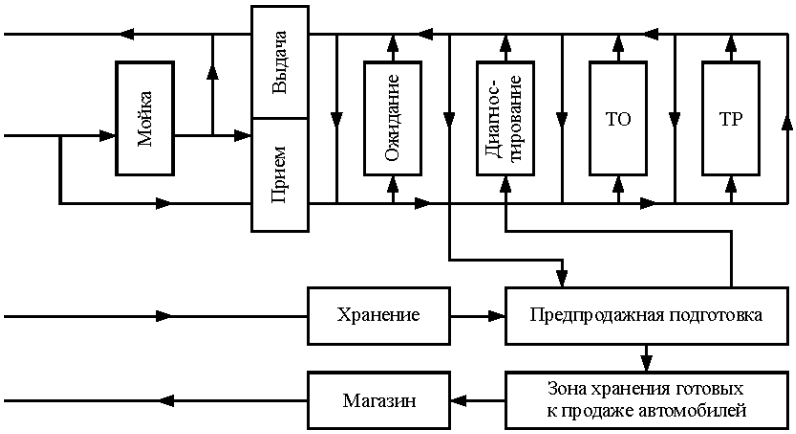


Рисунок 1 - Функциональная схема станции технического обслуживания

В структуру сервисных предприятий в зависимости от их мощности могут входить следующие производственные участки: приемки и выдачи автомобилей, мойки, диагностирования, ТО, ТР, агрегатно – механический, ремонта электрооборудования, ремонта топливной аппаратуры, ремонта тормозной аппаратуры, шиномонтажный, кузовной, окрасочный и др.

Поступающие на станцию автомобили требуют проведения самых различных по наименованию и объему работ ТО и ТР, поэтому организация производства на предприятии должна обеспечивать выполнение любого их сочетания, т. е. обладать гибкостью технологического процесса.

В связи со случайным характером требуемых технических воздействий для автомобилей, поступающих на предприятие, возможны различные варианты сочетания работ ТО с работами ТР (рис. 2) [2]:

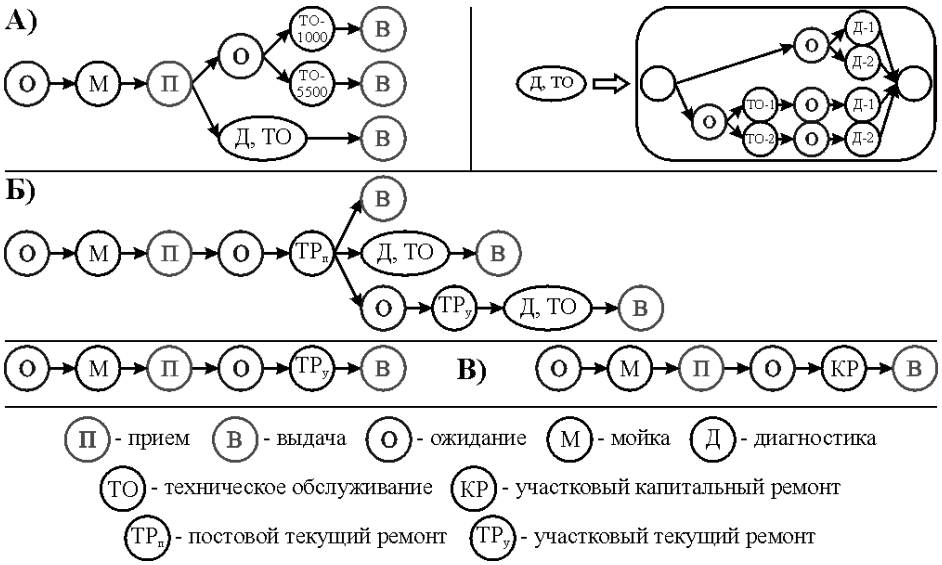


Рисунок 2 - Варианты последовательности выполнения работ

А) проведение ТО в полном объеме или выборочные работы ТО. Автомобиль поступает на посты, где в определенной последовательности, согласно технологическим картам, выполняют соответствующие работы;

Б) ТО в полном объеме или выборочные работы ТО и ТР по потребности, определенной заявкой заказчика или при диагностировании. После проверки технического состояния автомобиль поступает на посты ТР или автомобиле – места специализированных участков, а затем, после устранения неисправностей, на посты ТО для проведения необходимых работ;

В) работы ТР или капитального ремонта (КР) по заявке клиента. После диагностирования и уточнения объема работ с заказчиком автомобиль поступает на посты ТР или КР, где согласно технологическим картам выполняют необходимые работы.

При обслуживании может оказаться, что пост, на который автомобиль направляют для очередного воздействия, занят. В этом случае автомобиль ставят на автомобиле – место ожидания и, по мере освобождения постов, направляют на них согласно соответствующему варианту схемы. Создание автомобиле – мест ожидания позволяет уменьшить неравномерность загрузки рабочих постов и повысить эффективность их использования.

На постах ТР выполняют разборочно – сборочные, регулировочные и крепежные работы. Мелкие неисправности устраняют непосредственно на постах ТР, а дефектные агрегаты, узлы и механизмы, снятые с автомобилей, направляют на соответствующие специализированные участки для проведения необходимых работ, после чего они поступают на участок ТР и устанавливаются на автомобиль.

Рассмотрим последовательность технологического процесса ТР автомобилей, а также узлов и агрегатов на предприятии (рис. 3) [1,5].

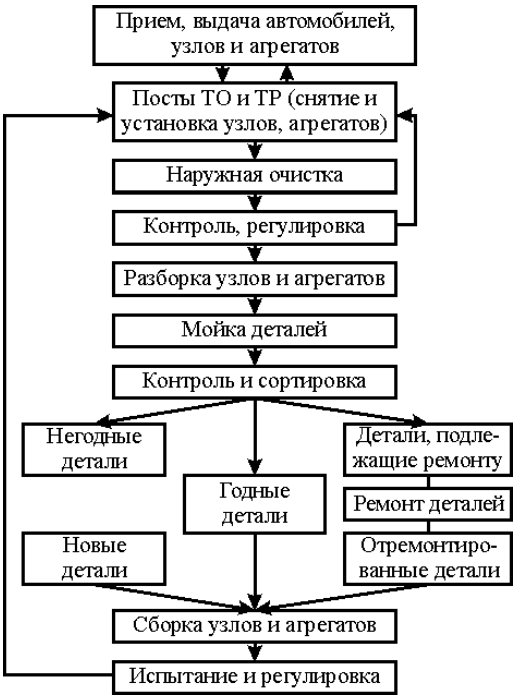


Рисунок 3 - Технологический процесс текущего ремонта

Поступающие на предприятие автомобили направляются на посты ТО и ТР для проведения заявленных клиентом работ. При необходимости на постах производится снятие и установка узлов и агрегатов, подлежащих ТО и ремонту.

Агрегаты, снятые с автомобиля, проходят наружную мойку и поступают для ремонта на соответствующие производственные участки, где производится их разборка. Узлы и агрегаты, требующие углубленной проверки, регулировки или ремонта, поступают на участки ремонта с постов ТО, ТР и диагностирования. После разборки агрегатов наружные и внутренние поверхности деталей моют и очищают от нагара, накипи, краски, продуктов

коррозии, коксовых и смолистых отложений.

При дефектации детали разделяют на три группы: утильные (восстановление которых технически невозможно или экономически нецелесообразно), годные без ремонта (износ которых не превышает допустимых значений, регламентированных техническими условиями) и требующие восстановления. Детали последней группы восстанавливают различными способами и после контроля передают на комплектование, где их подсобирают в комплекты и передают на сборку агрегатов.

Узлы и агрегаты собирают на специализированных рабочих местах. Обкатку, испытания и регулировку отремонтированных механизмов осуществляют различными способами с помощью специальных приспособлений и стендов. Во время обкатки устраняют выявленные дефекты и осуществляют проверку качества ремонта. После испытаний агрегаты возвращают на посты ТО и ТР и устанавливают на автомобиль.

После проведения всех необходимых работ автомобиль поступает на пост диагностирования или участок приемки – выдачи, где окончательно контролируют качество выполненных работ, производят внешний осмотр, проверку комплектности автомобиля и выдачу его владельцу.

На организацию техпроцесса ТО и ТР автомобилей значительное влияние оказывают такие факторы, как большие годовые пробеги, условия эксплуатации, отсутствие строгой периодичности и невыполнение полного объема работ, неравномерность поступления автомобилей на предприятие, случайный характер распределения объемов работ по времени и видам.

На сервисных предприятиях существуют различные организационные формы ТО и ТР. Основные формы обслуживания – обслуживание тупиковым и поточным методами; ремонт проводится на универсальных и специализированных постах и может осуществляться агрегатным или индивидуальным методом. Наибольшее применение получили следующие методы организации труда производственных рабочих: специализированных бригад, комплексных бригад и агрегатно – участковый.

Организация работы сервисного предприятия включает в себя: выбор и обоснование структуры производственно-технической базы, определение технологической схемы выполнения работ и организационной структуры предприятия, рациональное распределение материальных ресурсов. Однако, какими бы ни были варианты организации на стадии проектирования, они не могут обеспечить эффективного функционирования системы во времени. Это объясняется тем, что внешние факторы в каждый конкретный момент времени являются случайными событиями. Поэтому регулирование и контроль производственного процесса осуществляются с помощью управляющих воздействий, которые должны обеспечить наиболее эффективное функционирование предприятия.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кузнецов Е.С.* Техническая эксплуатация автомобилей. - М.: Наука, 2001. - 535 с.
2. *Марков О.Д.* Автосервис: рынок, автомобиль, клиент. - М.: Транспорт, 1999. - 270 с.
3. *Миротин Л.Б.* Управление автосервисом. - М.: Экзамен, 2004. - 320 с.
4. *Напольский Г.М.* Технологическое проектирование автотранспортных предприятий и станций технического обслуживания. - М.: Транспорт, 1993. - 271 с. 1
5. *Фастовцев Г.Ф.* Автотехобслуживание. - М.: Машиностроение, 1985. - 256 с. 2

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.В. Румянцевым.
Поступила в редакцию 7.04.09 г.

УДК 621

РЕНОВАЦИЯ ДЕТАЛЕЙ НЕФТЕДОБЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ МЕТОДОМ ГАЗОПЛАЗМЕННОЙ НАПЛАВКИ

Тарабарин О.И., *д.т.н*; Абулхазипова Р.М., *аспирант.*
Камская государственная инженерно-экономическая академия

В работе проведен обзор методов реновации поверхностей деталей нефтяного оборудования, приведены данные по параметрам износа поверхности вала редуктора Ц2НШ-450 (750) и изучена микроструктура и микротвердость поверхностного слоя восстановленного методом газоплазменной наплавки.

Введение. На сегодняшний день важнейшей проблемой в области нефтедобычи является высокий процент износа нефтедобывающего оборудования, сроки эксплуатации многих типов которого превышают 30 лет. Из сложившейся ситуации можно выйти тремя путями:

1-й полная замена изношенного и морально устаревшего оборудования, что потребует огромных инвестиций в нефтедобывающую промышленность и в сложившейся ситуации экономического кризиса и низких цен на нефть не реально;

2-й путь замена изношенных деталей новыми, что потребует значительных затрат на запасные части;

3-й путь реновация изношенных поверхностей деталей с последующей механической обработкой.

Опыт эксплуатации изделий машиностроения, в том числе нефтедобывающего оборудования показал, что 2-й путь – замена изношенных деталей новыми экономически оправдан для изделий специализированного производства, например, подшипников качения, и деталей небольшой массы и, конечно, для случаев, если оборудование подверглось значительному коррозионному износу не позволяющему провести восстановление.

3-й путь восстановление работоспособности различного оборудования широко применяется на практике. Так, например, восстановленных блоков цилиндров двигателей внутреннего сгорания, особенно большой массы, используется в 2,5 раза больше, чем новых, восстановленных коленчатых валов — в 1,9 раза, картеров коробок передач — в 2,1 раза. В пользу этого пути говорит тот факт, что себестоимость процесса восстановления для многих деталей не превышает 75% стоимости новых, а расход материала снижается в 15 — 20 раз.

Важным показателем эффективности применения процессов реновации деталей, является значительное уменьшение числа технологических операций, примерно в 5…8 раз, в сравнении с технологическими процессами изготовления новых деталей.

Реновация деталей нефтегазового оборудования стало одним из важнейших показателей хозяйственной деятельности крупных ремонтных, специализированных малых предприятий. Создана фактически новая отрасль производства — восстановление изношенных деталей. По ряду наименований наиболее металлоемких и дорогостоящих деталей вторичное потребление восстановленных деталей значительно больше, чем потребление новых запасных частей. Высокая экономическая эффективность предприятий, специализирующихся на восстановлении деталей, обеспечивает им конкурентоспособность в условиях рыночного производства.

Реновацию изношенных деталей осуществляют различными методами: сваркой, наплавкой, металлизацией, электролитическим покрытием, электроискровой и электромеханической обработкой, напайкой, заливкой антифрикционными сплавами и полимерными материалами и др. Хорошо зарекомендовали себя методы пластической деформации.

Многообразие методов восстановления обусловлено различными факторами такими, как марка материала детали, ее конструкция, виды дефекта, величина износа и прочие особенности.

1. Обзор методов газоплазменной наплавки.

Плазменная наплавка (рис. 1) - это нанесение с помощью сжатой дуги слоя металла на поверхность изделия. [1]

По виду применяемого присадочного материала известные способы плазменной наплавки можно разделить на три основные группы: 1) наплавка проволокой или прутками; 2) наплавка по неподвижной присадке, уложенной или каким-либо образом закрепленной на наплавляемой поверхности; 3) наплавка порошком.

Рисунок 1 - Классификация способов плазменной наплавки

Плазменная наплавка нашла применение при восстановлении ответственных деталей, к которым, например, относятся: коленчатые, кулачковые и распределительные валы, валы турбокомпрессоров, оси, крестовины карданных шарниров, направляющие оборудования, щеки и седла задвижек, шнеки экструдеров и др. Область применения способа - нанесение тонкослойных покрытий на нагруженные детали с малым износом. Плазменная наплавка тонкослойных покрытий составляет конкуренцию процессам нанесения гальванических покрытий.

При плазменной наплавке получают покрытия толщиной 0,2...6,5 мм и шириной 1,2...45 мм. Если наносится легкоплавкий материал, то возможно нанесение покрытия с проплавлением очень тонких поверхностных слоев без оплавления поверхности.

Приведем краткий обзор плазменно-порошковой наплавки, которая позволяет существенно расширить круг сплавов, наплавляемых механизированным способом, так как

необходимые для нее присадочные порошки могут быть получены практически из любого наплавочного сплава независимо от степени его легирования, твердости, пластичности и других свойств. Благодаря незначительному проплавлению основного металла, хорошему формированию, оптимальной толщине и высокому качеству наплавленного слоя она, по сравнению с другими способами наплавки, обеспечивает более экономное расходование наплавочных материалов, сокращает затраты на последующую механическую обработку поверхностей деталей, повышает срок службы последних. Процесс плазменно-порошковой наплавки легко поддается автоматизации.

Этот метод благодаря минимальному проплавлению основного металла (2-3%) обеспечивает получение наплавленного металла с высокими физико-химическими свойствами.

Плазменная наплавка с присадкой порошка в наибольшей степени отличается от других способов плазменной наплавки применяемыми материалами, оборудованием и технологическими возможностями.

В отличие от плазменного напыления, при котором источником нагрева порошка служит струя плазмы, генерируемая дугой косвенного действия электрод-сопло, а изделие является электрически нейтральным, наплавку с присадкой порошка выполняют плазменной дугой прямого действия или двумя плазменными дугами — прямого и косвенного действия с общим электродом. При этом используют различные схемы ввода порошка в дугу, которые можно разделить на две группы, отличающиеся тем, что в одной группе порошок вводят в дугу внутри плазмотрона (рис. 2), а в другой — вне его (рис. 3). [3,4]

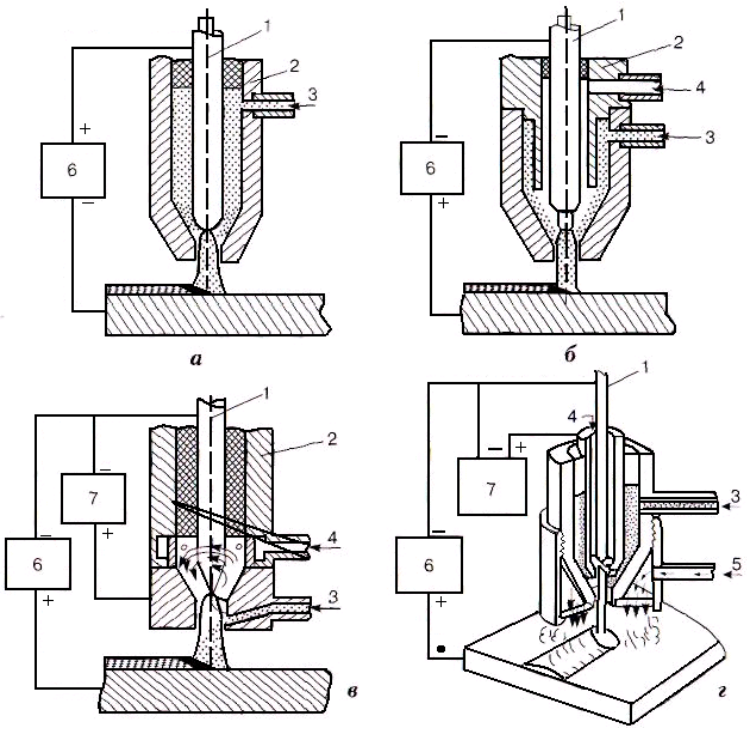


Рисунок 2 - Схемы плазменной наплавки с вводом присадочного порошка в дугу внутри плазмотрона: *а — вместе с плазмообразующим газом; б — через электродную камеру; в — через боковое отверстие в канале сопла; г — через воронкообразную щель между соплами*

В зависимости от конструкции плазмотрона для наплавки применяют присадочные порошки с размером частиц от 45 до 250 мкм [5], реже — до 400 мкм, получаемые, как правило, путем распыления жидкого металла инертным газом или водой.

Плазмотроны с внутренней подачей порошка используют для наплавки композиционных слоев, если присадочным материалом являются механические смеси порошков сплава-связки и карбидов вольфрама, ниобия или ванадия [5]. Содержание карбидов в смеси может достигать 75-80% по массе. Величина их зерен от 20 до 200 мкм. В остальных случаях применяют раздельную подачу порошков карбида и сплава-связки.

Газовая среда при плазменной наплавке состоит из трех потоков: плазмообразующего потока (обычно аргон), который сжимает и стабилизирует дугу и защищает вольфрамовый электрод от окисления; защитного — предохраняет от окисления сварочную ванну (аргон, гелий, азот, смеси газов); транспортирующего при плазменно-порошковой наплавке (аргон, гелий, азот, смеси газов).

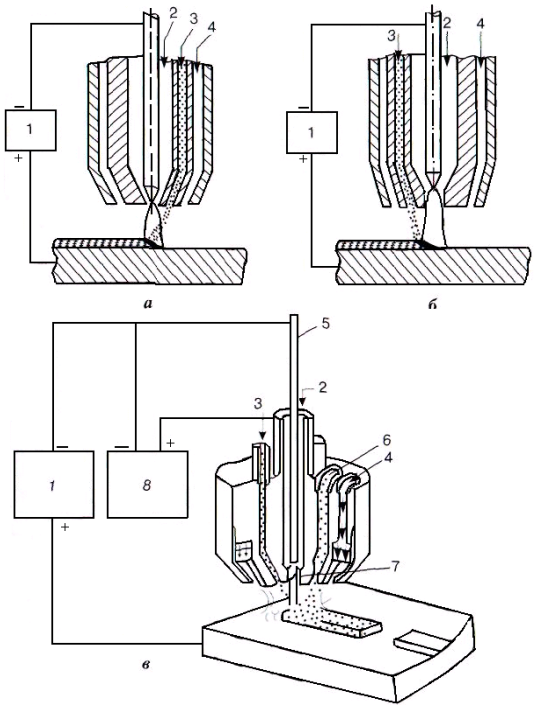


Рисунок 3 - Схемы плазменной наплавки с внешней подачей присадочного порошка через отверстие в торце сопла «углом назад» (а), то же «углом вперед» (б), по каналам в сопле плазматрона (в)

Производительность плазменно-порошковой наплавки порошком в зависимости от мощности плазмотронов составляет 4-10 кг наплавленного металла в час. Реальная производительность наплавки зависит от размеров и формы изделия, толщины наплавляемого слоя, типа присадочного порошка и других факторов и находится в пределах 0,8-6 кг/ч.

Минимальная толщина наплавленного слоя при внутренней подаче порошка равна 0,25 мм, при внешней — 0,5 мм. Наибольшая высота однослойного валика в обоих случаях составляет 5-6 мм. Возможность нанесения сравнительно тонких слоев с малым проплавлением основного металла — важное достоинство плазменной наплавки порошком.

2. Объект реновации. Объектом реновации являлся вал редуктора Ц2НШ-450 (750). Габаритный размер тихоходного вала редуктора Ц2НШ-750 составляет 1930 мм в длину и порядка 190 мм в диаметре, масса вала составляет 330 кг металла.

В качестве материала для изготовления вала принята сталь 40Х, допускающую термическое или химико-термическое упрочнение. Для этой марки стали применяют объемную закалку, которая обеспечивает твердость поверхности 45…50 $HRC_Э$.

На рис. 4 приведено процентное распределение отказов для редукторов Ц2НШ – 450 (а) и Ц2НШ-750 (б). Из рисунка следует, что основной причиной отказов является износ подшипников и зубьев.

Таблица - Параметры дефектации тихоходного вала

Поверхность вала	Размер износ поверхности, мм
Поверхность под манжету	1,2
Поверхность под подшипник	0,1
Поверхность под колесо	0,1

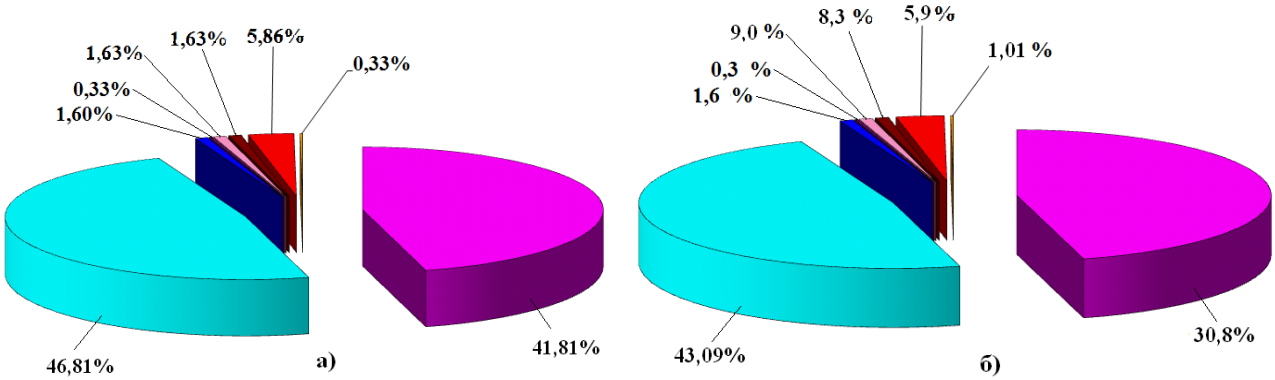


Рисунок 4 - Причины отказов редукторов: а) Ц2НШ-450; б) Ц2НШ-750

41.81% (а), 30.8% (б) – износ подшипников; 46.81% (а), 43,09 (б) – износ зубьев; 5.96%(а), 5.9% (б) – поломка подшипников на тихоходном валу; 1.6% (а,б) – износ корпуса, 0.33%(а), 1.01% (б) – излом тихоходного вала; остальное- поломки подшипников на промежуточном и быстроходном валах, трещины крышки промежуточного вала.

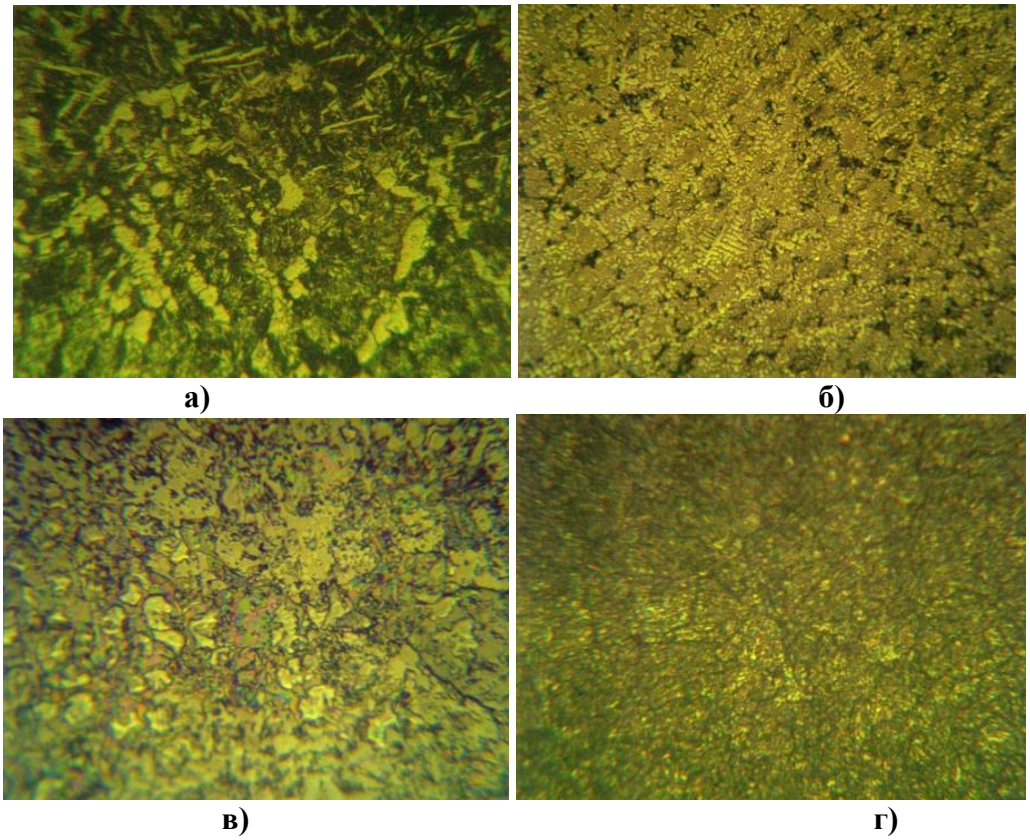


Рисунок 5 - Микроструктура стали 40Х:

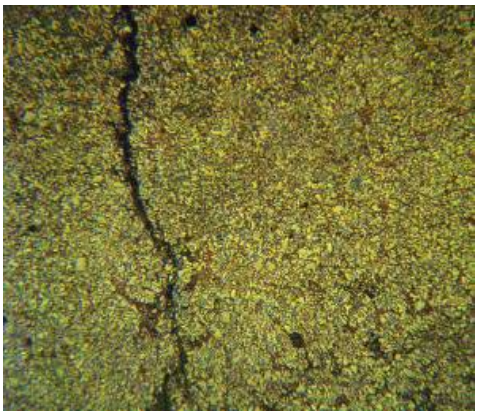
а – микроструктура наплавленного слоя без дефектов; б – микроструктура зоны контакта (без дефектов); в – микроструктура зоны термического влияния (с незначительными микротрещинами из-за действия остаточных напряжений); г – микроструктура основного металла

3. Результаты исследования наплавленного слоя

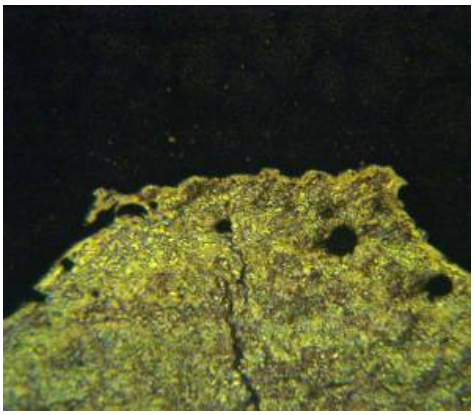
На предприятии ООО «Татнефть-РНО-МехСервис» восстановление ведомого вала редуктора производиться вибродуговой наплавкой на установке УД 209.

Также на предприятии внедрена газоплазменная наплавка деталей плоской формы. В настоящее время, основываясь на результатах исследования этой наплавки, было принято решение о модернизации и автоматизации оборудования для наплавки валов газоплазменной наплавкой.

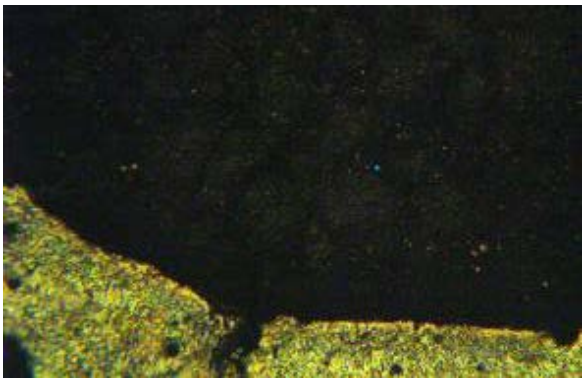
Микроструктура изучалась и фотографировалась на металлографическом микроскопе «Неофот-2» при 100- и 500-кратном увеличении (рис. 5,6). На рис. 6, *а* отчетливо видна микротрещина, образовавшаяся из-за возникших при наплавке остаточных напряжений. Трещина значительной длины проходит по всему слою. Возможно одной из причин появления такого дефекта явилось не стабильность процесса наплавки. На рис. 6, *б* показан фрагменты слоя с дефектом в виде трещины, которая при малоцикловом или многоцикловом нагружении может перейти в магистральную трещину и привести к разрушению материала.



а)



б)



г)

Рисунок 6 - Дефекты наплавленного слоя по глубине, х100:
а – снимок наплавленного слоя в срединной его части; б – трещина выходит на поверхность слоя; г – трещина выходит на поверхность слоя

Выводы. Таким образом, исследования показали, что свойства наплавленного металла превосходят свойства основного металла. Микротвердость наплавленного слоя составила 620-894 HV, а микротвердость основного металла – 405-420 HV, т.е. наблюдается увеличение твердости в 1,5…2 раза. Также анализ микроструктуры показал, что возникают трещины. Поэтому необходимо создать комплекс мер по стабилизации параметров наплавки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Восстановление деталей машин: Справочник/ Ф.И. Пантелеенко, В.П. Лялякин, В.П. Иванов, В.М. Константинов. Под. ред. В.П. Иванова. – М.: Машиностроение, 2003. – 672 с.
2. Гладкий П.В., Переплетчиков Е.Ф., Рябцев И.А. Плазменная наплавка. – К.: «Экотехнология», 2007. – 292 с.
3. Gage R.M., Nestor O.H., Yenni D.M. Collimated electric arc-powder deposition process/ USA patent 3016447. – Jan.9. – 1962. – Nov.2. 1959.
4. Dilthey. Ul., Kabatnik L. Zentral Pulverzufuhr beim Plazmauftragschweiβen // Schweiβen and Schneiden. – 1998. H.12. – S.766-771.
5. Irmer W., Hentschel K. Plazmaauftragsschweiβen pulverformiger Zusatzwerkstoffe // Schweiβtechnik (B). – 1969.-19.-N5.-S.193-197.

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.А. Астащенко.
Поступила в редакцию 24.03.09 г.

УДК 631.4:574

ВЛИЯНИЕ ПРОКЛАДКИ НЕФТЕ- И ГАЗОПРОВОДОВ НА ЛЕСНЫЕ ПОЧВЫ НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА «НИЖНЯЯ КАМА»

Р.Н. Шарафутдинов, *к.б.н.*
Камская государственная инженерно-экономическая академия

В.М. Ахметов, *к.с.-х. н.*
Департамент по промышленной безопасности и экологии ОАО «КАМАЗ»

И.А. Алексеев, *д.с.-х.н.*
Марийский государственный технический университет

При рекультивации земель, нарушенных прокладыванием магистральных трубопроводов восстановительные мероприятия почвенного покрова не только нарушаются технологически, но и не учитывают особенности почвообразования в конкретных литологических и ландшафтно-геоморфолгических условиях.

Введение. При прокладке и ремонту трубопроводной сети нефте- и газопроводов согласно регламенту проводимых данного рода работ, как правило, соблюдается ряд экологических и одновременно трубозащитных требований. К их числу ним относится прокладывание труб на достаточной глубине от поверхности почвы для снижения влияния колебаний температуры и влажности, а также для исключения возможности разрушительного действия биогенных факторов, связанных с биологически активными верхними горизонтами почв.

С другой стороны прокладка труб не должна приводить к ухудшению плодородия почв, которое формируются в течение многих столетий. Поэтому при прокладке трубопровода предполагается снятие гумусовых горизонтов и их возврат в прежнее положение. В условиях прокладывания трассы с наклонным рельефом и волнистым характером местности ненарушенный почвенный покров предотвращает эрозионные, обнажающие трубы, процессы.

Объект исследования. Полоса отчуждения лесного массива в национальном парке «Нижняя Кама» нефте- и газопроводами имеет протяженность 7 км. и ширину 52 м. Работв по прокладке трубопроводов началась в 70 – годах прошлого столетия. В связи с износом труб и наступлением амортизационного срока в 2002 году был проведен ремонт двух нитей нефтепровода.

Методы исследования. Образцы почвы под трубопроводной сетью взяты равномерно по всему протяжению трассы. С целью недопущения повреждения трубопровода почвенные прикопки были заложены на глубину 30 см , что позволяет сделать обоснованно вывод о соблюдении возврата на место верхних слоев почвы над трубопроводом нарушенных наиболее плодородных почвенных горизонтов. Взятая глубина образцов почв в незатронутой части трассы (в лесу) соответствовала наиболее плодородной части почв

Почвенные прикопки были заложены тремя сериями вдоль трассы. Первая (1а,2а 3а, 4а, 5а, 6а) - непосредственно на линии ремонта 2002 года, вторая (1б, 2б, 3б, 4б, 5б, 6б) - параллельно (а) на линии прокладки трубопровода в 1972 году, не затронутая ремонтом, третья (3в,4в, 6в) - также вдоль трассы, но по лесной части, вне всех работ, связанных с прокладкой и эксплуатацией нефтепровода.

В вариантах (а), тот есть на участках ремонта нефтепровода, проведённого в 2002 году, мероприятия по восстановлению почвенного покрова и биологической рекультивации не были выполнены.

В исследованных почвенных прикопках глубиной до 50 см и отобранных образцах почв верхнего 25 – см слоя были проведены анализы по определению гранулометрического состава почв, актуальной и гидролитической кислотности, потери при прокаливании, содержания гумуса, суммы обменных оснований, обменный фосфора и калия общепринятыми методами физико-химического и гранулометрического анализа почв[1].

Результаты и обсуждение. Почвенная прикопка 1а заложена на супесчано-песчаном склоне, подверженном после ремонта трассы плоскостной эрозии почвы, из-за отсутствия травяного покрова вследствие того, что гумусовый слой своевременно не был возвращен на место и верхний слой обладает предельно низким эффективным плодородием. Живой напочвенный покров представлен единичными видами сорных трав – тысячелистником, лебедой и другими, не образующим дерновый противоэрозионный слой. Подстилочная ветошь травяного опада и гумусовый горизонт отсутствуют. Верхний слой представлен геологическими отложениями перемытых супесчано – песчаных пермских отложений), поднятых с глубины почвообразующих пород. В них отсутствуют корневые системы трав, почвенная структура не оформлена.

Почвенные прикопки 2а и 3а по морфологическим характеристикам аналогичны прикопке 1а. Они расположены на более ровной и возвышенной местности. Травяная растительность также развита слабо. Также отсутствуют дернообразующие травы, подстилочная ветошь травяного опада и гумусовый и подгумусовый горизонты.

Почвенные прикопки 4а, 5а и 6а расположены также на участках ремонта трубопровода в микропонижении в пределах возвышенных участков рельефа. Почвы по гранулометрическому составу супесчано-суглинистые. В понижения происходит сток илистых наносов. Тем не менее, и здесь травяной покров не развит. Органические горизонты травяного опада и почв нарушены и отсутствуют.

Все приведенные исследования указывают на то, что при ремонте трассы трубопроводв предусмотренные Приказом 525/67 «Об утверждении «Основных положений о рекультивации земель, снятии, сохранении и рациональном использовании плодородного слоя почвы»» и РД 39-00147105-006-97 «Инструкция по рекультивации земель, нарушенных и загрязненных при аварийном и капитальном ремонте магистральных нефтепроводов» технологические требования по рекультивации почвы нарушены. Это создает более ранние условия для возникновения аварийных ситуаций в пределах территории национального парка.

Для сравнения качества выполненных ремонтных работ трубопровода с качеством проведенных рекультивационных работ при закладке трубопровода в 1972 году были заложены почвенные прикопки 1б - 6б в тех же условиях, что и почвенные прикопки 1а - 6а.

В вариантах (б) видны положительные результаты проведенных при прокладке нефтепроводов рекультивационных мероприятий по восстановлению почвенного покрова. Анализ морфологии почв и физико-химических характеристик показывает, что при первичной прокладке трубопроводов основные технологические требования по рекультивации почв в основном были соблюдены. На поверхности развивается покров из дернообразующих трав, формирующих слой почвозащитного травяного подстилочного (войлока) опада на месте сохраненного от прежней рекультивации органического подстилочного и гумусового материала, подтверждающий отчасти закономерности формирования и расположения соответствующих почвенных горизонтов.

По старой трубопроводной полосе растут средние по уровню требовательности к почвенному плодородию (преимущественно верхних горизонтов) кустарники – ива, жимолость, малина.

Почвы вариантов (в) находятся в условиях относительно устойчивых лесных фитоценозов. Основной фон вдоль трассы составляют бурые лесные супесчаные почвы. Прикопки 3в,4в 6в находятся в лесу в 10 м от полосы трубопроводов на тех же гипсометрических (горизонтальных) уровнях, что и соответствующие им номера с индексами (а) и (б). В почвах лесных участков генетические горизонты хорошо развиты. Деревья (сосны) произрастают по I и Iа классам бонитета. Развит кустарниковый ярус – жимолость, бересклет бородавчатый. Травяной покров под пологом сосновых деревьев в условиях участков 2,3,4,5 и 6 представлен снытью, кислицей, геранью лесной, кровохлебкой. В условиях одного и того же горизонтального уровня (соответствующие участкам 1а,1б) в условиях 1в чистом сосновом древостое I и II классов бонитета и при отсутствии

повреждения фитоценоза нефтяными выбросами встречаются бересклет бородавчатый, а в живом напочвенном покрове злаковые травы, земляника.

Данные анализов почв в лабораторных условиях образцов, взятых со всех вышеуказанных участков выявили природные особенности как почв, так и пород, то есть геологических отложений и по их физическим, структурным свойствам, и по признакам, позволяющими судить о степени вовлечения их в биологический круговорот, а значит и об устойчивости к деградации, а также о перспективах состояния земель в ближайшие годы и на будущее.

Отсутствие на ремонтных участках в поверхностном слое почвы гумусового слоя позволяет судить, что в лучшем случае, гумус оказался перемешанным с грунтом, а это будет способствовать более близкому контакту труб с промывными водами кислых гумусовых кислот, проникновению в более глубокие слои корней древесно-кустарниковой растительности и их усиленное развитие, а поверхность, лишенная плодородного гумусового слоя будет активно размываться, не давая закрепляться дерновинной растительности. Этому будут способствовать и физико-механические свойства почво-грунтов, тесно связанные с их гранулометрическим составом (табл. 1)

Хотя в ходе «рекультивации земель» произошло некоторое изменение в гранулометрическом составе верхних слоев почво-грунтов, но по содержанию «физической глины» все изученные разновидности почв остались в пределах песков и супесей, за исключением образца «4а» (легкий суглинок). Общей особенностью всех исследованных образцов является низкое содержание крупно-песчаной фракции (0,73 – 6,85%) и преобладание средне-мелко-песчаной и крупно-пылеватой фракций (73,67 – 89,95 %). Из этих данных следует, что почвы и почво-грунты всех участков имеют низкие поглотительные, обменные свойства, соответственно и относительно низкую структурообразовательную способность, если не учитывать органическую составляющую почвы в форме гумусовых веществ, содержание которых резко отличается при сравнивании территорий (а), (б) и (в).

Таблица 1 - Гранулометрический состав почв на участке нефтепровода национального парка «Нижняя Кама»

Образцы почв	Гранулометрические фракции, %			Название почв по гранулометрическому составу
	1 – 0,5 мм	0,5 – 0,01 мм	< 0,01 мм	
	крупнопесчаная	пылевато-мелкопесчаная	«физическая глина»	
Участки ремонта нефтепровода 2002 г.				
1а	0,81	83,87	15,32	Супесь связная
2а	1,15	87,88	12,12	Супесь рыхлая
3а	2,2	84,20	13,56	Супесь рыхлая
4а	2,76	73,72	23,52	Суглинок легкий
5а	1,31	87,89	10,80	Супесь рыхлая
6а	0,86	81,50	17,60	Супесь связная
Участки прокладки нефтепровода 1972 г				
1б	1,56	89,84	8,60	Песок связный
2б	0,97	82,23	16,80	Супесь связная
3б	0,77	79,27	19,96	Супесь связная
4б	6,85	73,67	19.48	Супесь связная
5б	0,73	89,95	9,32	Песок связный
6б	1,30	86,78	11,92	Супесь рыхлая
Лесные участки				
3в	0,91	89,41	9,68	Песок связный
4в	1,24	80,88	17,88	Супесь связная
6в	0,73	88,07	11,20	Супесь рыхлая

На фоне недостаточно благоприятных физических свойств почвообразующих пород интенсивность биологических процессов по физико-химическим показателям в почвах на участках, покрытых лесом в 5 – 10 раз (по содержанию ионов водорода гидролитической кислотности) больше, чем на участках последней, так называемой, рекультивации (табл. 2).

Таблица 2 - Физико-химические свойства почв на землях занятых нефтепроводами в национальном парке “Нижняя Кама” (с результатами статистической обработки)

Образец почвы	Гигроскопическая влага, %	Потеря при прокаливании, %	Гумус, %	pH водный	Гидролитич. кислть	Сумма обменных оснований	Емкость катионного обмена	Степень насыщ-ти почв основ., %	Подвижный фосфор	Обменный калий
					мг-экв /100 г почвы				мг /100 г почвы	
Участки ремонта нефтепровода 2002 г.										
1а	1,29	2,63	0,48	7,40	0,22	8,72	8,94	97	14,00	4,50
2а	1,13	1,95	1,06	5,35	0,66	7,41	8,07	91	6,23	4,00
3а	1,15	2,04	0,51	5,45	0,44	7,94	8,38	94	5,21	3,38
4а	2,84	3,83	1,26	5,42	0,88	15,38	16,26	94	0,91	3,50
5а	0,93	2,44	0,55	5,45	0,44	6,44	6,88	93	7,05	3,38
6а	1,07	2,61	0,67	7,20	0,33	20,33	20,66	98	6,84	3,50
Участки прокладки нефтепровода 1972 г										
1б	1,16	3,24	1,90	5,10	1,10	6,10	7,20	82	2,95	4,75
2б	1,26	3,29	1,87	4,75	1,10	7,10	8,20	82	4,59	3,50
3б	1,02	2.90	1,44	4,65	0,99	5,49	6,48	83	1,73	13,25
4б	2,30	5,66	1,97	5,00	1,21	16,46	17,67	93	3,77	3,00
5б	1,16	3,83	2,72	4,45	1,98	5,98	7,96	67	2,95	4,25
6б	1,25	2,29	2,42	5,35	0,77	7,77	8,54	90	9,71	4,50
Лесные участки										
3в	1,52	6,53	5,63	4,00	3,74	9,49	13,23	61	0,29	4,75
4в	1,39	5,50	4,45	4,45	2,42	9,17	11,59	74	1,52	2,75
6в	1,11	6,90	2,60	4,05	3,08	5.58	8,66	45	2,55	2,88
Критерии различия $t_{0,95}$ между вариантами (а),(б) и (в)										
t(аб)	0,05	0,60	2,00	0,43	1,43	0,56	0,39	0,38	0,76	0,44
t(бв)	0,03	1,01	2,04	0,30	2,15	0,02	0,33	0,46	1.53	0,53
t(ав)	0,08	1,42	3,21	0,71	3,23	0,56	0,06	0,85	1,91	0,13

Примечание: Различие по t- критерию Стьюдента для уровня значимости p = 0,95 равно 2,6

Об этом же свидетельствуют показатели актуальной кислотности (pH), имеющие обратно пропорциональное числовое согласование (корреляцию) с содержанием гидролитической кислотности (pH водный на участках (а) близки к 5,5, а на лесных то 4,0 до

4,5), А это показывает о «неосвоенности» верхнего слоя минеральных субстратов почво-грунтов органическими кислотами (гумусовыми веществами).

О неразвитости биологических процессов в почве на безлесных участках также говорит содержание обменных оснований, их значительное преобладание над кислыми продуктами почвообразования, в значительной степени связанных с содержанием «физической глины». Максимальное их количество у связных супесей.

О сравнительно минимальной интенсивности микробиологических процессов (биологической иммобилизации), то есть минимальном вовлечении в биологический круговорот исследованных форм P_2O_5 и K_2O свидетельствует их содержание на участках последней рекультивации по сравнению с лесными участками.

То же можно сказать и о гумусе – наиболее высокие его значения соответствуют более «кислым» значениям pH и большим значениям гидролитической кислотности. Хорошо заметно резкое отличие по содержанию гумуса между участками свежей рекультивации (0,48 – 1,26 %), рекультивированными 30 лет назад (0,67 – 2,72 %) и лесными (1,90 – 5,63 %).

Данные о скорости восстановления гумуса за 30 лет показывают, что при сравнении почв участков 1а-1б разница составляет 1,42%, на участках 2а – 2б содержание гумуса возросло на 0,8 %, 3а – 3б на 0,9 %, 4а – 4б на 0,7 %, 5а – 5б – 2,1 %, а на участке 6а – 6б - 1,77 %. В среднем по всем участкам гумуса увеличилось за 30 лет на 1,28 %. Разница между участками свежей рекультивации и лесными по содержанию гумуса составила: 3а – 3в на 5,1 %, 4а – 4в на 2,2 %, 6а – 6в на 2,0 %. Среднее значение по этим данным составляет 3,1 %.

Предварительные расчеты показывают, что даже при линейном характере процесса увеличения содержания гумуса его количество до прежнего уровня, соответствующего природному, может быть достигнуто не раньше, через 100 лет. На почвах (почво-грунтах) исследованных участков с легким гранулометрическим составом и нелинейным характером большинства природных процессов (в сторону замедления) естественное самовосстановление гумусового слоя может занять не одну сотню лет.

Анализ статистического различия полученных количественных данных выявил, что такой компонент биогеоценозов как гумус, который формируется в естественных условиях весьма длительное время (сотни лет) и является основным условием сохранения устойчивости почвенного покрова и ландшафта (табл…). Показатели по содержанию гумуса в целом имеют однозначные достоверно значимые оценки различия участков с ненарушенной почвой (под лесом) и ремонтных участков с недавно проведенной рекультивацией. Достоверные оценки почти полного отсутствия водорода органических кислот в верхнем слое почво-грунтов свидетельствует их сравнение по показателю гидролитической кислотности с участками, имеющими развитый почвенный покров.

Заключение. По итогам проведенных исследований на участках нарушенного почвенного покрова можно сделать выводы:

а) отложения почвообразующих пород эрозионно опасны по физическим и физико-механическим свойствам, что проявилось уже с первого года после проведения ремонтных работ по факту свежей эрозии;

б) причиной эрозии является также отсутствие гумусированного слоя почвы, закрепленного напочвенным травянистым покровом;

в) отсутствие с поверхности почво - грунтов ремонтых участков плодородного слоя, выполняющего функции средозащитные, устойчивости ландшафтов, в том числе прилегающих к трассе нефтепроводов существенно замедляет восстановительные биогеоценотические процессы, ослабляя устойчивость лесных насаждений смежных с трассой фитоценозов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Аринушкина Е.В.* Руководство по агрохимическому анализу почв. - М.: Наука, 1975. - 656 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии М.П. Соколовым.
Поступила в редакцию 2.03.09 г.

УДК 330.4 (075.8)

ТОКСИЧНОСТЬ ВОДОРАСТВОРИМЫХ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ

Н.Н. Смирнова, *к.б.н.,* А.И. Динмухаметова
Камская государственная инженерно-экономическая академия

Проведено исследование токсичности водорастворимых смазочно-охлаждающих жидкостей Инкам-1 и Акватек-78 с использованием двух тест - объектов: Daphnia magma и клеток крови – эритроцитов. Выявлена острая токсичность в свежеприготовленной 3% эмульсии Инкам-1 и серии разведений, приготовленной из неё. Острая токсичность выявлена в образце СОЖ Акватек – 78, отобранной из реальных условий эксплуатации.

1. Введение. Неотъемлемой частью технологического процесса обработки металлов является применение смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), назначение которых – охлаждение металлических поверхностей инструмента и обрабатываемых деталей, уменьшение трения в зоне их контакта и обеспечение антикоррозионной защиты деталей, станка и инструмента.

В качестве базовой основы эмульсионных СОЖ в настоящее время используется минеральные масла и полимерные синтетические продукты (полистиролы, полиглиноли, лигносульфанаты), а для повышения биостойкости – формальдегидвыделяющие антимикробные присадки. Токсичность и характер действия индустриальных масел на организм зависит от его углеводородного состава. По степени возрастания токсичных свойств углеводороды базовой основы СОЖ располагаются в следующем порядке: алифатические (парафиновые), циклические (нафтеновые), циклические (ароматические) [1].

Наиболее распространенными заболеваниями среди рабочих, контактирующих с СОЖ, являются кожные дерматиты. Данные о временной нетрудоспособности у станочников свидетельствует о значительном повышении острых респираторных вирусных инфекций, что является показателем снижения функции иммунной системы, а при клиническом осмотре выявлены дистрофические изменения верхних дыхательных путей.

В связи с тем, что токсикологические свойства образцов эмульсолов и эмульсий из них определяются на животных виварий, а данные публикаций по биотестированию технологических жидкостей отсутствуют, целью данной работы является изучение токсичности СОЖ по тест – объектам.

2. Изучение токсичности СОЖ. В последнее время в токсикологических исследованиях применяется биотестирование –использование в контролируемых условиях биологических объектов. Данный метод позволяет выявить и оценить действие факторов окружающей среды на организм, его отдельную функцию или систему [2].

Изучение токсичности исследуемых СОЖ с использованием тест – объекта Daphnia magma проводилось согласно требованиям ПНД Ф Т 14:1:3:4:4.5.02 «Методика определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод, отходов по смертности и изменению плодовитости дафний». Вторым тест – объектом исследования были выбраны отмытые эритроциты барана, использующиеся в иммунологических исследованиях и предоставленные Лабораторным центром Медгородка г. Набережные Челны.

Разведение СОЖ с целью изучения их токсичности по смертности дафний проводили с использованием культивационной воды. Для изучения влияния СОЖ на клетки крови приготовление образцов производилось с использованием стерильного физиологического раствора, концентрация которого соответствует внутриклеточному осмотическому давлению.

Измерение водородного показателя приготовленных разведений проводили на ионометре И-160М.

Для изучения токсичности СОЖ Инкам-1 была приготовлена исходная 3% эмульсия из концентрата и разведения из нее. Данные, полученные по смертности дафний в исследуемых образцах представлены в табл.1.

Таблица 1 - Токсичность образцов свежеприготовленной СОЖ Инкам-1

Разведение, %.	pH	Смертность дафний (%) в течение времени								Токсичность
		2ч.	4ч.	8ч.	16ч.	18ч.	20ч.	24ч.	44ч.	
3,0	8,75	100								острая
0,3	8,65	0	60	100						острая
0,1	8,13	0	20	80	100					острая
0,75	7,98	0	20	60	80	100				острая
0,06	7,83	0	20	40	80	100				острая
0,05	7,78	0	0	20	60	90	100			острая
0,023	7,52	0	0	0	60	80	100			острая
0, 020	7,46	0	0	0	30	80	100			острая
0, 017	7,35	0	0	0	20	50	80	100		острая
0, 015	7,25	0	0	0	10	40	60	80	100	острая
Контроль		0	0	0	0	0	0	0	0	отсутствует

Как видно из данных табл.1, во всех исследуемых образцах СОЖ Инкам-1 наблюдалась острая токсичность, поскольку 100% гибель популяции тест – объекта наблюдалась во времени от 2 до 44 часов. Критерием острой токсичности по смертности дафний служит гибель 50 % и более тест – организмов за 96 часов в исследуемом образце при условии, что в контрольном эксперименте гибель не превышает 10% [3]. В условиях проведенного эксперимента смертность тест – объекта в контрольном образце составляла 0%.

Причиной гибели тест - организмов, несомненно, являются компоненты исследуемой СОЖ, обуславливающие щелочную среду жидкости. Однако острая токсичность наблюдалась и в образце с оптимальным для жизнедеятельности дафний pH - 7,25, который был определён при разведении 3% эмульсии в 200 раз, что подтверждает наличие в составе исследуемой СОЖ и других токсичных компонентов.

Для определения токсичности водорастворимой СОЖ Инкам-1 с применением эритроцитов в исследуемые пробы было добавлено по 0,1 мл клеток крови.

Исследование показало, что в течение первых 5 секунд произошло окрашивание исследуемых образцов СОЖ в красный цвет разной интенсивности, что свидетельствовало о разрыве эритроцитов. В контрольном образце цвет физраствора оставался прозрачным, а клетки находились в виде осадка красного цвета. Микроскопирование клеток, контактировавших с СОЖ, выявило их 100% гибель за указанное время.

Изучение токсичности СОЖ Акватек-78 проводили на эмульсии, отобранной из реальных условий эксплуатации. Отобранный для исследования образец представлял собой молочно – белую эмульсию с пленкой отслоившегося масла и характерным запахом, что является показателем начальной степени биодеструкции.

Данные, полученные по токсичности данной СОЖ, представлены в табл.2.

Таблица 2 - Токсичность образцов СОЖ Акватек-78 по смертности дафний

Разведение	Смертность дафний в течении времени, %									Токсич-ность
	2ч.	4ч.	8ч.	16ч.	18ч.	20ч.	24ч.	44ч.	66ч.	
Без разведения	100	-	-	-	-	-	-	-	-	острая
1:10	-	100	-	-	-	-	-	-	-	острая
1:30	-	80	100	-	-	-	-	-	-	острая
1:40	-	80	100	-	-	-	-	-	-	острая
1:50	-	40	70	100	-	-	-	-	-	острая
1:60	-	-	20	80	100	-	-	-	-	острая
1:70		-	-	80	100	-	-	-	-	острая
1:80	-	-	-	60	80	100	-	-	-	острая
1:90	-	-	-	60	40	80	100	-	-	острая
1:100	-	-	-	40	40	60	100	-	-	острая
1:130	-	-	-	20	60	60	80	100	-	острая
1:150	-	-	-	-	-	40	60	80	100	острая
1:180	-	-	-	-	-	20	40	40	100	острая
1:200	-	-	-	-	-	-	40	60	100	острая
Контроль	0	0	0	0	При плод	0	0	0	0	отсутствует

Данные табл.2 свидетельствуют о наличии острой токсичности как в образце СОЖ, отобранной из станка так и во всех разведениях, приготовленных из неё. Результаты исследований, проведенные с эритроцитами, были идентичны данным по СОЖ Инкам-1.

3.Заключение. Сравнительный анализ данных по токсичности широко применяемых в машиностроении СОЖ Инкам -1 и Акватек – 78 предполагает сходный компонентный состав.

Выявленная острая токсичность подтвердила возможное негативное воздействие СОЖ на станочников при несоблюдении техники безопасности и показала актуальность защиты окружающей среды от СОЖ - содержащих сточных вод.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Шугаев Б.Б.* Токсикологическая характеристика СОЖ. - М: Высшая школа,1972. - 112 с.

2. *Фомина Е.С., Трошина Е.А.* Биоиндикация и биотестирование как методы определения загрязненности водных объектов. Сборник статей V Международной научной конференции «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов», 12-14 апреля 2006 г., Донецк.

3. Методика определения токсичности воды, водных вытяжек из почв, осадков сточных вод, отходов по смертности и изменению плодовитости дафний. Министерство природных ресурсов РФ. Москва 2002 г ПНД ФТ 14:1:3:4:4.5.02.

Статья представлена к публикации членом редколлегии М.П. Соколовым.
Поступила в редакцию 25.02.09 г.

УДК 532.539, 536.423

РЕЖИМЫ ДРОБЛЕНИЯ НИЗКОКИПЯЩЕЙ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЭМУЛЬСИИ

А.К.Розенцвайг, *д.т.н.;* Ч.С. Страшинский, *к.т.н.*
Камская государственная инженерно-экономическая академия

Проведен качественный анализ характера процессов совместного теплопереноса и дробления капель перегретой дисперсной фазы при движении охлаждающей эмульсии в турбулентном режиме. Рассмотрено обобщение модели дробления в объеме эмульсии капель турбулентными пульсациями скорости потока с учетом инициированного зародышеобразования турбулентными пульсациями и наличия в них избыточной тепловой энергии. Показаны условия при которых эффект перегрева дисперсной фазы и инициированного турбулентными пульсациями зародышеобразования влияет на максимальный устойчивый по отношению к дроблению размер капель.

Введение. Интенсивность теплопереноса при кипении в однородных жидкостях зависит от характера метастабильных состояний, сдерживающих начальную стадию фазового перехода первого рода, теплофизических параметров теплоносителя, гидродинамического режима и физико-химических свойств потока [1]. При кипении эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой условия теплообмена существенно усложняются, поскольку между нагревающей поверхностью и каплями располагается высококипящая, а значит и более вязкая, дисперсионная среда. Она способствует переносу процесса кипения в объем дисперсной фазы, при этом, существенно увеличивая поверхность нагрева, которой становится поверхность раздела фаз, а также сдерживает снижение коэффициента теплоотдачи $\alpha_{кип}$ из-за преждевременного формирования сплошной паровой фазы.

Известно также, что в эмульсии за счёт энергии динамических и вязких сил потока сплошной среды происходит укрупнение достаточно мелких и разрушение чрезмерно крупных капель дисперсной фазы. При слиянии мелких капель их размер в турбулентном потоке может возрастать до определенной критической величины, которая определяется силами поверхностного натяжения. Достаточно крупные капли дисперсной фазы под воздействием турбулентных пульсаций и вязких сдвиговых напряжений способны деформироваться вплоть до разрыва капли на две, а чаще - несколько частей [2].

Экспериментальными и теоретическими исследованиями эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой установлено, что они способны существенно интенсифицировать процесс теплоотдачи по сравнению с любой однородной жидкостью, входящей в состав эмульсии. Так на практике, для охлаждения режущих инструментов, при термической обработки металлов широкое применение нашли эмульсии кремнийорганических жидкостей с водной дисперсной фазой. На основании экспериментальных исследований был обнаружен факт значительного перегрева эмульсии ΔT, а затем изучен эффект задержки начала кипения [3]. При этом отвод теплоты интенсифицируется кипением капель дисперсной фазы с температурой кипения существенно более низкой, чем температура кипения сплошной среды.

Аномальное метастабильное состояние охлаждающих эмульсий связано со сложным характером процессов переноса, присущим в общем случае многим термодинамическим системам [4]. Возможные подходы к решению подобных проблем также обсуждались в работе [5], когда при рассмотрении парового взрыва принципиальным становится понимание многопланового и многостадийного процесса как совокупности возможных механизмов фундаментальных физических явлений и взаимосвязей между ними.

Моделирование состава и структуры перекрестных процессов переноса совокупностью элементарных физических явлений

Перенос теплоты охлаждающими эмульсиями определяется не только физико-химическими характеристиками фаз и их температурными зависимостями. В условиях

турбулентного движения существенный вклад принадлежит и специфическим для жидкостных систем процессам коалесценции и дробления капель дисперсной фазы. Так коалесценция капель позволяет объяснить некоторые эффекты, установленные в результате экспериментальных исследований кипения дисперсной фазы в объеме жидкости [6]. Не менее важным является и влияние дробления на структуру переноса теплоты в неоднородной жидкости с участием низкокипящей дисперсной фазы.

В частности, если давление паров жидкости станет равным внешнему давлению в сплошной среде, наряду с испарением с межфазной поверхности, внутри капель может происходить образование пузырьков паровой фазы [7]. Это способствует увеличению размеров парожидкостных капель и создает предпосылки для разрушения их и периодического освобождения паровой фазы наряду с непрерывным поверхностным кипением. С другой стороны, структура процессов переноса теплоты дополняется физическими явлениями, механизмы которых предопределены гидродинамическими характеристиками турбулентного течения сплошной среды.

Указанные особенности поведения охлаждающих эмульсий являются причиной сложного поведения, обусловленного обменом энергией и вещества в неравновесных условиях [4], формирования *перекрёстных процессов*, в которых градиент одной физической величины вызывает перенос другой. Взаимное влияние потоков импульса и теплоты в гетерогенных дисперсных системах существенно затрудняет выделение их индивидуальных, специфических черт из-за разнообразия реальных условий. Кроме того, неоднозначность и статистическая природа механизмов каждого из взаимосвязанных процессов осложняет не только их теоретическое описание, но и достаточно обоснованное представление структуры феноменологических соотношений. По тем же причинам ограниченными оказываются и возможности экспериментальных методов исследования.

Так, приведенный в работе [5] анализ процесса парового взрыва показывает, что подавляющее большинство имеющихся надежных опытных данных пригодно лишь для формирования представлений в целом, без выделения быстропротекающих подпроцессов триггеринга и тонкой фрагментации. Характерные времена их составляют от одной до десятков микросекунд. Технические сложности реализации сфокусированной высокоскоростной кинофотосъемки, которая обеспечивала бы однозначное толкование наблюдаемых эффектов, так до конца не преодолены.

Хотя, и эмпирические данные, и теоретические модели перераспределения вещества и энергии в турбулентном потоке жидкостей нельзя записать в общей форме, тем не менее, только они могут дать представление относительно всего разнообразия и специфических особенностях сложных процессов переноса. Обоснование состава элементарных физических явлений с помощью соответствующих им безразмерных критериев подобия позволяет обосновать структуру их взаимосвязей в сложных дисперсных системах теплоносителей путем согласования с априорными характеристиками процессов переноса [8].

Предварительная информация относительно физической природы любого явления обычно представлена феноменологическими моделями, постулирующими общие балансовые соотношения для механических и термодинамических характеристик. Полученное аналитическое выражение затем приводят к безразмерному виду, и модель принимает форму соотношения между основными безразмерными комбинациями независимых переменных или критериями подобия $\Pi_1, \Pi_2, \ldots, \Pi_n$:

(1) $$\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \ldots, \Pi_n).$$

Если априорные представления являются достаточно полными, оно представляет общую форму ожидаемой взаимосвязи между ними.

Элементарные физические явления выражаются наиболее простыми соотношениями с одним критерием, которые носят универсальный характер:

(2) $$f(\Pi_1) = const.$$

Если реальный процесс может быть представлен только этим явлением, то в этом случае данным экспериментальных исследований, представленным в форме (2), после статистиче-

ской оценки параметров модельной функции $f(П_1)$ соответствует практически неизменное значение константы C_1. Такой результат является количественной оценкой того факта, что исходные модельные представления соответствуют характеру реального физического явления. С формальной точки зрения адекватность исходной модели свидетельствуют о непротиворечивости принятого физического механизма.

Если же величина константы C_1 подвержена вариации, то считать выявленными все статистически значимые независимые факторы, т.е. механизмы представленных ими физических явлений, нельзя. Модификацию исходной взаимосвязи критериев подобия (2) выполняют также в соответствии с априорными физическими представлениями о возможном влиянии других факторов. Для этого независимую переменную исходной модели, с которой связано влияние дополнительного механизма, заменяют эффективной величиной, включающей связанным с ним критерий подобия.

Можно модифицировать переменную, скажем x, исходной модели с помощью степенного выражения: $x_э = x \cdot П_2^{\alpha}$, где $П_2$ - дополнительный критерий, представляющий взаимосвязанный механизм процесса переноса. Величина константы подбирается таким образом, чтобы расширенная модель

(3) $$f\,[П(\,x \cdot П_2^{\alpha})_1\,] = const$$

отражала эмпирическую корреляционную связь этой переменной x.

Следующим шагом является представление экспериментальных данных в обобщенных переменных $П_1$ и $П_2$ и их оценка с помощью принятой статистической процедуры констант гипотетической закономерности (3). Таким образом, достигается необходимая полнота представлений о физической природе изучаемого явления и является поводом для модификации модели. С другой стороны, соотношения, полученные в осредненной форме, представляют собой суммарные оценки реального вклада каждого элементарного физического явления, отраженные результатами экспериментального исследования сложного процесса.

Эффективность возможных механизмов элементарных физических явлений, а также их взаимное влияние находится в прямой зависимости от граничных и начальных условий. В конечном итоге, на основе экспериментальных данных достигается согласование характерных масштабов совокупности элементарных физических явлений в пространстве и времени. Рассмотренная выше методика позволяет формировать сложные структуры процессов переноса, обладающие заранее заданными свойствами, такими как энерго или ресурсосбережение [8].

Характер дробления перегретых капель дисперсной фазы.

Важной особенностью дробления перегретых капель под воздействием турбулентных пульсаций скоростей сплошной среды является наличие в них избыточной тепловой энергии [9] , а также включение новых механизмов дробления при затрате энергии турбулентных пульсаций на зародышеобразование. Очевидно, что эти факторы снижает вероятность сохранения целостности капель дисперсной фазы, которую обеспечивает энергия поверхностного натяжения. Однако повышение частоты дробления капель является не единственным последствием их перегрева. Другим возможным последствием является образование пузырьков паровой фазы, инициированное локальными резонансными пульсациями давления внутри капель, генерируемыми турбулентными пульсациями сплошной среды.

Следует отметить, что в отсутствие турбулизации вклад флуктуационного механизма образования паровых зародышей в объеме покоящейся жидкости незначителен по сравнению с обычным явлением парообразования у твердой поверхности. В данном случае её роль играет поверхность раздела с высококипящей жидкостью, причем суммарная площадь поверхности дисперсной фазы с каплями достаточно малого размера может многократно превосходить площадь твердой поверхности. К тому же преобладающими становятся такие хорошо изученные факторы образования зародышей паровой фазы, как наличие пузырьков

воздуха, твердых частиц и других макроскопических неоднородностей внешней поверхности капель [10].

Энергия турбулентных пульсаций скорости сплошной среды в определенных условиях инициирует в объеме капель дисперсной фазы формирование вынужденных пульсаций давления с некоторым спектром частот. Совпадение частоты собственных колебаний капли с одной из частот, обладающих достаточной энергией пульсаций, приводит к их резонансному усилению. Если локальная концентрация внешней энергии турбулентного потока оказывается достаточной для преодоления поверхностной энергии капель, то происходит их разрушение [2,11]. В изотермических условиях разрушение капель в турбулентном потоке несмешивающейся с ними жидкости, несмотря на сложность и стохастическую природу процесса, объясняет теория А.Н.Колмогорова о преобладающем влиянии локальной структуры турбулентности на устойчивость капель.

В инерциальном интервале области универсального статистического равновесия выражение для максимального устойчивого размере капель d_{max} используют обычно в форме соотношения энергии их поверхностного натяжения и энергии турбулентных пульсаций:

(4) $$\rho_c \cdot \overline{v}^2 \left(d_{\max} / \sigma\right) = const,$$

где σ - межфазное натяжение, ρ_c плотность сплошной среды, а $\overline{v}^2$ - осредненная скорость турбулентных пульсаций.

Дробление низкокипящей дисперсной фазы в рамках основной модели А.Н. Колмогорова дополняется учётом энергии перегрева капель, как *дестабилизирующего фактора* – с одной стороны и полной избыточной энергии образования критического пузырька внутри капли, как *регулирующего фактора* - с другой стороны.

Физическое содержание этого явления может состоять в возможном увеличении объема при образовании внутри капель пузырьков паровой фазы при затрате энергии турбулентного потока на образование парового зародыша критических размеров. Энергия пульсаций давления, недостаточная для непосредственного разрушения капель, может также образовывать локальные области пониженных «отрицательных» давлений, способствующие снижению критического размера жизнеспособных пузырьков пара [12].

Идентичность состояний перегрева и растяжения (кавитации) жидкостей, способствующих повышению экспериментально изученной частоты зародышеобразования в этой работе, позволяют в модели дробления капель представить формально их суммарный результат в качестве температурных факторов. В конечном итоге, в соотношении (4) реальный диаметр капель d_{max} заменяется эффективным размером $d_э$, размер которого скорректирован на величину объемной доли пузырьков пара

(5) $$d_Э = d_{\max}\left(E_{темп} / E_{турб.}\right)^{\alpha} \cdot \left(E_{турб.} / E_{уд.изб.энерг.}.\right)^{\beta},$$

где $E_{темп} = \rho_d C_p \Delta T$ – удельная тепловая энергия перегрева, $E_{турб} = \rho_c \overline{v}^2$ - удельная динамическая энергия турбулентных пульсаций, $E_{уд.изб.энерг.} = W_0 / d_{\max}^3$ - удельная избыточная энергия образования парового зародыша критического размера.

Согласно существующим термодинамическим представлениям [10], величина W_0 определяется как

(6) $$W_0 = W_k \cdot \left[1 + \frac{2L}{\left(p_s - p^*\right)\cdot\left(\vartheta^{**} - \vartheta^*\right)} - 3\frac{T}{\sigma_2}\frac{d\sigma_2}{dT}\right],$$

(7) $$W_k = \frac{16\pi \cdot \sigma_2^3}{3\cdot\left(p_s - p^*\right)^2 \cdot \left(1 - \vartheta^* / \vartheta^{**}\right)^2},$$

где W_k – работа образования критического парового зародыша, p_s - давление насыщенных паров, p^* - давление жидкой фазы, $\vartheta^*, \vartheta^{**}$ - удельные объёмы жидкой и паровой фазы, L –

удельная теплота парообразования, σ_2- коэффициент поверхностного натяжения жидкость - пар, T – термодинамическая температура.

Таким образом, исходное выражение (4) принимает следующий вид:

(8) $$\frac{\rho_c \bar{v}^2}{\sigma} d_{\max} \left(\frac{C_p \rho_d \Delta T}{\rho_c \bar{v}^2} \right)^{\alpha} \cdot \left(\frac{\rho_c \bar{v}^2 \cdot d_{\max}^3}{W_0} \right)^{\beta} = const .$$

Здесь в форме степенной функции от отношения энергии перегрева, стимулирующей образование паровой фазы, к энергии турбулентных пульсаций и отношения энергии турбулентных пульсаций к удельной энергии образования парового зародыша критического размера опосредованно представлен диаметр парожидкостной капли. При $\alpha = 0$ и $\beta = 0$ выражение (8) сводится к модельному соотношению Колмогорова (4).

Связь показателей степени α и β находится путем согласования окончательной зависимости с априорными общепринятыми представлениями о важных характеристиках процесса дробления [2,11]. Так, в качестве примера рассмотрим установленную Колмогоровым и подтвержденную многочисленными экспериментальными работами взаимосвязь для условий однородного турбулентного потока:

(9) $$d_{\max} \sim u_0^{-1.2},$$

(10) $$\bar{v}^2 \sim u_0^{1.2}.$$

Выделяя связь между d_{max} è $\bar{v}^2$ с учетом степенных соотношений (9) и (10), получим следующее соотношение между неизвестными параметрами:

(11) $$\frac{1.2(1-\alpha+\beta)}{1+3\beta} = 1.2 .$$

Откуда следует, что $\beta = -\frac{\alpha}{2}$. Следовательно

(12) $$\frac{\rho_c \bar{v}^2}{\sigma} d_{\max} \left(\frac{C_p \rho_d \Delta T}{\rho_c \bar{v}^2} \right)^{\alpha} \cdot \left(\frac{\rho_c \bar{v}^2 \cdot d_{\max}^3}{W_0} \right)^{-\frac{\alpha}{2}} = const .$$

Температурные зависимости теплофизических и термодинамических параметров эмульсии типа вода – кремнийорганическая жидкость.

Анализ процессов дробления и коалесценции капель дисперсной фазы в эмульсиях при неизотермических условиях существенно усложняется. В связи с появлением новых видов энергии формируются специфические механизмы ее вовлечения в перенос импульса гетерогенными течениями несмешивающихся жидкостей. Кроме того, с изменением температуры в достаточно широких пределах термодинамические и теплофизические свойства жидкостей нельзя рассматривать в качестве постоянных величин.

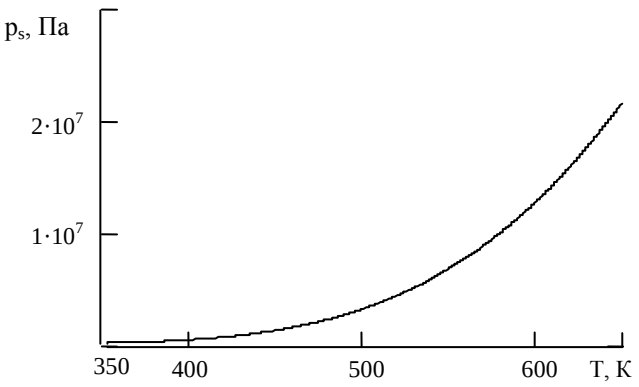


Рисунок 1

Рассмотрение температурных зависимостей необходимо как для согласования расчетных модельных зависимостей с данными экспериментальных исследований, так и для обоснования состава элементарных физических явлений и структуры взаимосвязи их в процессах

переноса.

Давление насыщенных паров p_s определяется в первом приближении на основе эмпирического уравнения Антуана

$$(13) \quad p_s = C_1 \cdot \exp(-\frac{B_1}{T + B_2}),$$

где C_1, B_1, B_2 – коэффициенты аппроксимации.

Представленной на рис. 1 зависимости для водяных паров соответствуют константы C_1 = 1.2×10^{10} Па, B_1 = 3816,44, B_2 = -46,26 Па [13].

Коэффициент поверхностного натяжения жидкость - пар σ_2 определяется с помощью линейной аппроксимации:

$$(14) \quad \sigma_2 = C_2 - C_3 \cdot T,$$

где C_2, C_3 – константы аппроксимации.

Представленной на рис. 2 зависимости для воды соответствуют константы C_2 = $135{,}15\times10^{-3}$ Н/м, C_3 = 0.208×10^{-3} Н/м [14].

Удельные объёмы воды и паровой фазы $\vartheta^*, \vartheta^{**}$ определяются аппроксимирующей экспоненциальными зависимостями [14]:

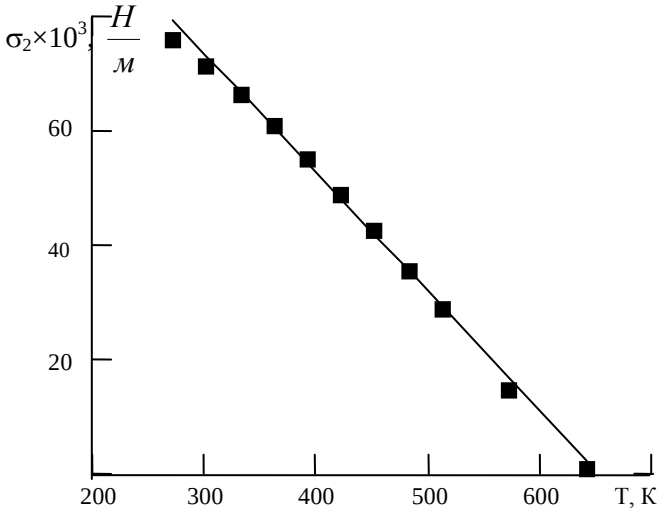


Рисунок 2

$$(15а) \quad \vartheta^* = \left(2.27\times10^{-4}\times e^{0.013\cdot Ò} + 1.038\right)\times10^{-3},$$

$$(15б) \quad \vartheta^{**} = (1.194\times10^{5}\times e^{-0.03\cdot Ò} + 0.02572).$$

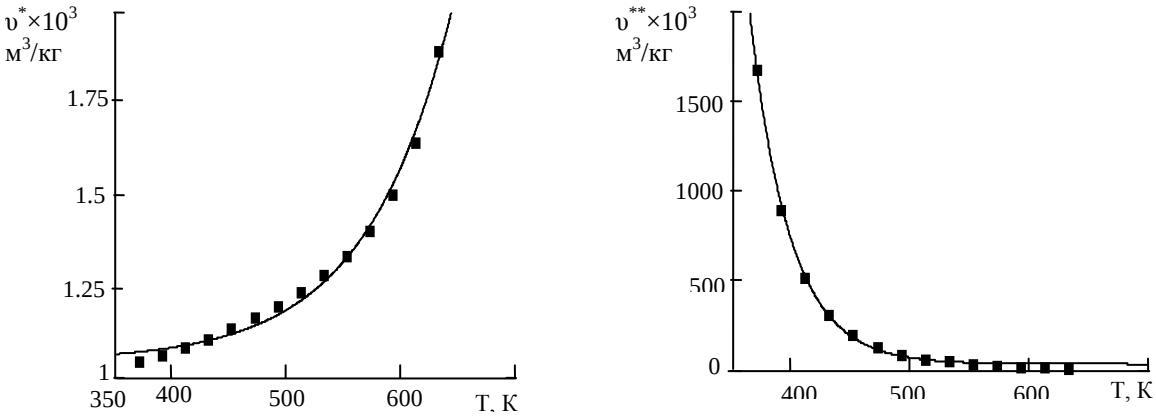


Рисунок 3

На рис. 3 представлены зависимости (15а) и (15б) для воды и водяного пара.

Плотности жидкой и паровой дисперсной фазы определяются по формулам

$$(16а) \quad \rho_d = \frac{1}{\vartheta^*}, \qquad (16б) \quad \rho^{**} = \frac{1}{\vartheta^{**}}.$$

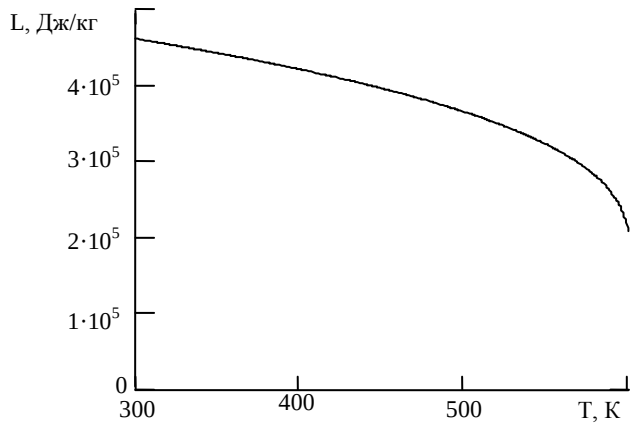


Рисунок 4

Удельная теплота парообразования L определяется на основе соотношения Ватсона

$$(17) \qquad L = L_0 \cdot \left(\frac{1 - T/T_c}{1 - T_0/T_c} \right)^{0.38},$$

где L_0 – удельная теплота парообразования при температуре T_0 , T_c – критическая температура.

На рис 4 указанная зависимость (17) представлена для воды при значениях констант L_0 = 419,1×10^3 Дж/кг ,.T_0 = 373,2 К , T_c = 647,3 К [13].

Удельная теплоёмкость воды определяется аппроксимацией полиномом третей степени [14]

(18) C_p = (4187+4.503×T-4.637×10^{-2} ×T^2+3.064×10^{-4}×T^3) кДж/(кг×К).

Температурная зависимость (18) представлена на рис. 5.

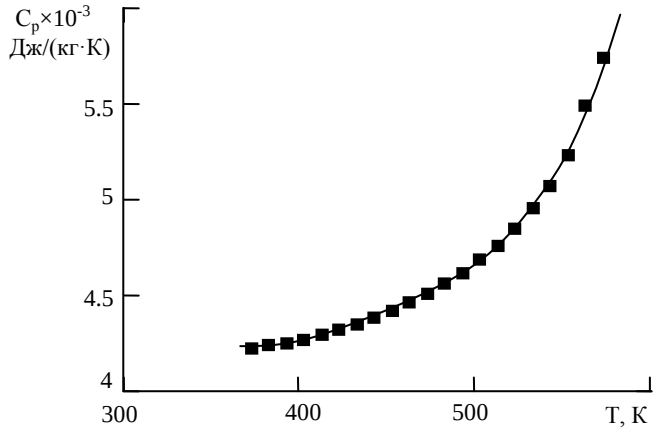


Рисунок 5

Зависимость динамической вязкости сплошной среды от температуры запишем в форме корреляции, полученной Андраде [13]

$$(19) \qquad \mu_c = A_0 \cdot \exp\left(\frac{B_0}{T} \right),$$

где A_0 и B_0 – параметры корреляционной взаимосвязи.

На рис. 6 представлена зависимость динамической вязкости от температуры кремнийорганической жидкости ПЭС-5 при значениях параметров A_0 = 1,073×10^{-6} Па×с, B_0 = 2021 К.

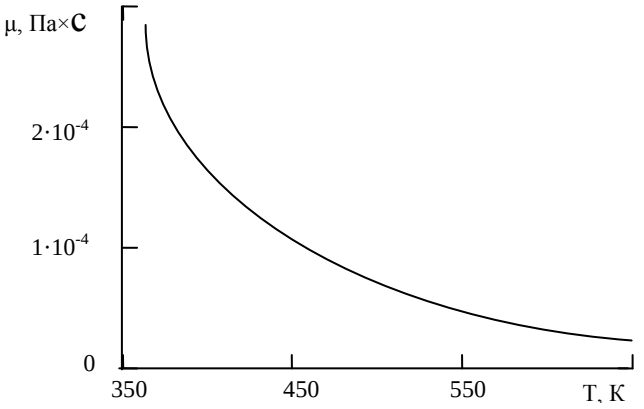


Рисунок 6

Для оценки полной избыточной энергии для эмульсии вода-кремнийорганическая жидкость ПЭС-5 были приняты значения физических величин при нулевом перегреве T_s = 373 К, P^* = 10^5 Па, ΔT=0, σ(0) = 0,058 Н/м, υ* = 1,067×10^{-3} м^3/кг, υ** = 1,675 м^3/кг, μ(0) = 2,434×10^{-4} Па×с, L(0) = 4,195×10^5 Дж/кг, C_p(0) = 1.187×10^3 Дж/(кг×К).

На рис.7 представлены зависимости для энергии образования критического пузырька W_0, вычисленной по формуле (6)- кривая 1, с теплофизическими параметрами при нулевом перегреве - кривая 2, работы образования критического зародыша от температурного перегрева для воды (7) –кривая-3 (без учёта удельных объёмов воды и пара) и кривая-4(с учётом удельных объёмов воды и пара).

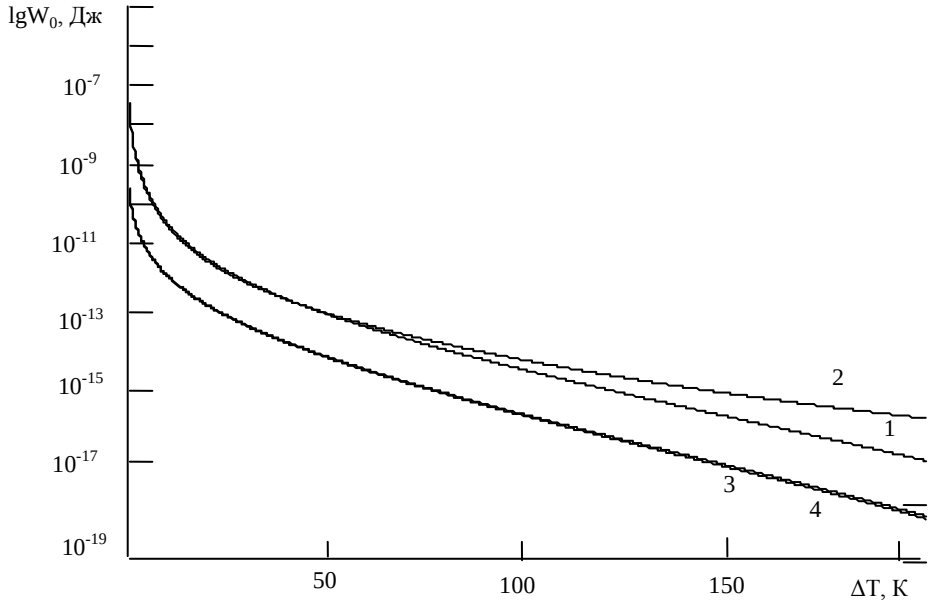


Рисунок 7 - Полная избыточная энергия эмульсии вода-кремнийорганическая жидкость ПЭС-5

Анализируя кривые (1) и (3) можно сделать вывод, что полная избыточная энергия образования критического пузырька примерно на два порядка больше работы образования критического зародыша. При значительных перегревах теплофизические свойства дисперсной фазы существенно влияют на полную избыточную энергию, необходимую для образования в ней критических пузырьков пара.

Структура взаимосвязей механизмов элементарных физических явлений при переносе теплоты низкокипящими каплями дисперсной фазы.

Элементарный гидродинамический механизм разрушения капель дисперсной фазы в турбулентном потоке эмульсии определяется с помощью баланса противонаправленных сил (или энергий) турбулентных пульсаций скорости и поверхностного натяжения:

(20) $$\rho_c \bar{v}^2 > \frac{\sigma}{d}.$$

В результате формируется максимальный устойчивый размер капель d_{max}, который через безразмерный гидродинамический критерий Вебера записывается как

(21) $$We_d^{Д} = \frac{\rho_c \bar{v}^2 d_{\max.}}{\sigma} = const.$$

Для элементарного термодинамического механизма разрушения капель дисперсной фазы (тепловой взрыв) определяющим является баланс тепловой энергии перегрева капель и поверхностного натяжения:

(22) $$C_p \rho_d \Delta T > \frac{\sigma}{d}.$$

Условие разрушения перегретой капли в объеме покоящейся жидкости в форме безразмерного теплового критерия Вебера можно представить как

(23) $$We_d^{П} = \frac{C_p \rho_d d_{\max} \Delta T}{\sigma} = const.$$

Для элементарного термодинамического механизма инициированного зародышеобразования определяющим является баланс энергии турбулентных пульсаций и полной избыточной энергии зародышеобразования критического пузырька.

(24) $$\rho_c \cdot \bar{v}^2 \cdot d^3 > W_0 .$$

Условие инициированного зародышеобразования дисперсной фазе турбулентными пульсациями в потоке жидкости в форме безразмерного гидротермодинамического критерия Вебера можно представить как

(25) $$We_d^T = \frac{\rho_c \cdot \bar{v}^2 \cdot d_{\max}^3}{W_0} = const .$$

Когда преобладает один их элементарных механизмов, константы в правой части критериальных соотношений (21), (22) и (23) сохраняют величину при заданных начальных и граничных условиях. Взаимодействие этих трёх возможных элементарных физических явлений проявляется в изменении константы критериального соотношения, которое принимается за исходное, в соответствии с изменением значений критерия, представляющего другое, взаимосвязанное с ним физическое явление.

Исходя из этих представлений, было получено соотношение (13), выражающее гидротермодинамический механизм дробления капель в результате совместного действия трёх элементарных физических явлений. Физическое содержание его становится очевидным после приведения его к безразмерному виду с помощью следующего преобразования:

$$\frac{\rho_c^{1-\alpha}\bar{v}^{1-\alpha}}{\sigma^{1-\alpha}} d_{max}^{1-\alpha}\left(\frac{C_p \rho_d \Delta T d_{max}}{\sigma}\right)^{\alpha} \cdot \left(\frac{\rho_c \bar{v}^2 \cdot d_{max}^3}{W_0}\right)^{-\frac{\alpha}{2}} = We_d^{1-\alpha}(We_d^{\ddot{I}})^{\alpha}(We_d^T)^{-\frac{\alpha}{2}} = const .$$

С учетом этой взаимосвязи критериальное соотношение (20), представляющее исходные представления для неизотермических условий, записывается в более общей форме

(26) $$We_d^{Д} = const \cdot \left(\frac{\sqrt{We_d^T}}{We_d^{П}}\right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} ,$$

раскрывающей физическое содержание и характер взаимодействия элементарных явлений переноса импульса и теплоты и инициированного зародышеобразования.

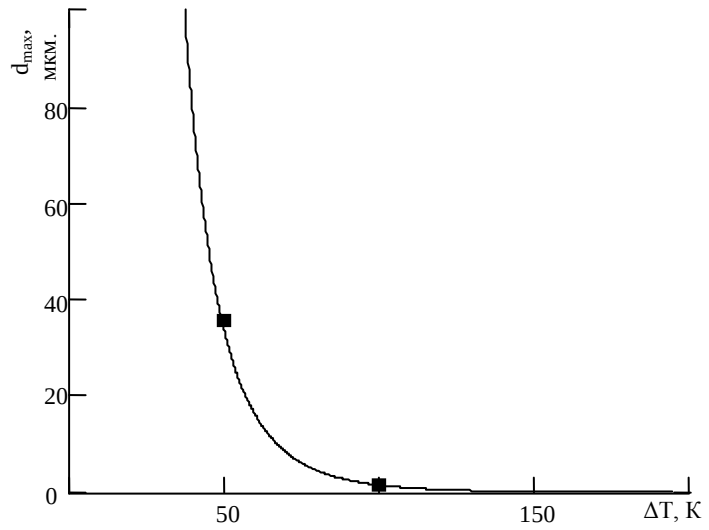


Рисунок 8 - Зависимость максимально устойчивого диаметра к дроблению $d_{max.}$ от температурного перегрева ΔT для эмульсии вода- кремнийорганическая жидкость ПЭС-5. ■- экспериментальные данные работы [3]

Коэффициент α определяется на основе следующих соображений:

Учитывая, что теплофизические параметры дисперсной фазы и сплошной среды существенно зависят от температуры, соотношение (13) представим в виде

$$d_{\max} = const\left(\frac{\sigma^{\frac{1}{\alpha}}}{C_p \cdot \rho_d \cdot \rho_c^{\frac{1-1.5\alpha}{\alpha}} \Delta T \cdot \sqrt{W}_0}\right)^{\frac{\alpha}{1-1.5\alpha}}. \qquad (27)$$

Экспериментальные данные из работы [3] для эмульсии вода - кремнийорганическая жидкость ПЭС-5 аппроксимируем функцией (27) (рис. 8). В результате получим эмпирическое значение $\alpha = 0.766$.

Таким образом, коэффициент α выражает некоторую совокупную зависимость теплофизических и термодинамических характеристик дисперсной фазы и сплошной среды эмульсии от температуры.

Это наиболее вероятная возможная структура взаимосвязей элементарных явлений в однородном турбулентном потоке эмульсии с низкокипящей дисперсной фазой. Исходя из принятых выше допущений, степень безразмерных тепловых критериев определяются константой α степенных функций (13) и зависят от структуры турбулентного потока сплошной среды, теплофизических и термодинамических характеристик дисперсной фазы. На рис 9 представлены обобщенные зависимости для гидродинамического и гидротермического разрушения капель в форме зависимости безразмерных критериев $We_d^{Д}$ и $\sqrt{We_d^{Ò}} / We_d^{Ï}$ и температурного перегрева ΔT для эмульсии вода- кремнийорганическая жидкость ПЭС-5 согласно соотношениям (15) и (20). Константа в формуле (20) для определенности принята равной 10.

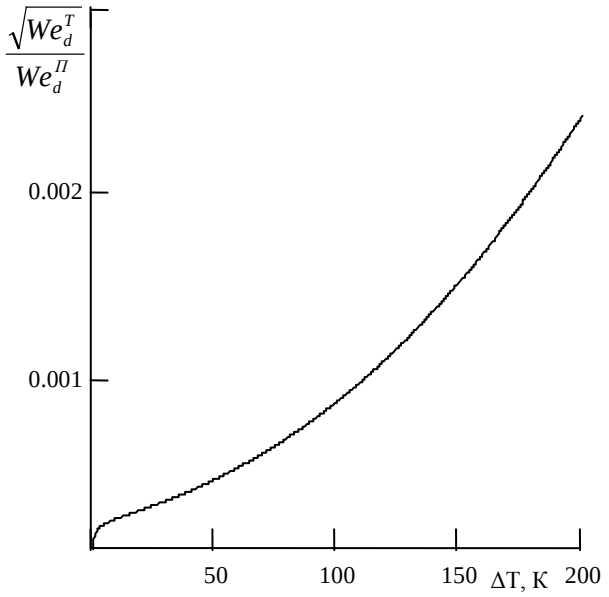


Рисунок 9 - Зависимость безразмерного комплекса $\sqrt{We_d^{Ò}} / We_d^{Ï}$ от температурного перегрева ΔT эмульсии вода - кремнийорганическая жидкость ПЭС-5

Характер кривых, представленных на рис 10 позволяет получить следующие результаты. Кривая 1, представляющая гидротермодинамический режим дробления, Область I ограничивает размеры капель, устойчивых по отношению к дроблению. Кривая 2, представляет гидродинамический режим дробления в изотермических условиях. Область III ограничивает гидродинамическое разрушение капель турбулентными пульсациями. Наконец,

область II является областью совместного гидротермодинамического разрушения капель турбулентными пульсациями и избыточной тепловой энергии перегрева.

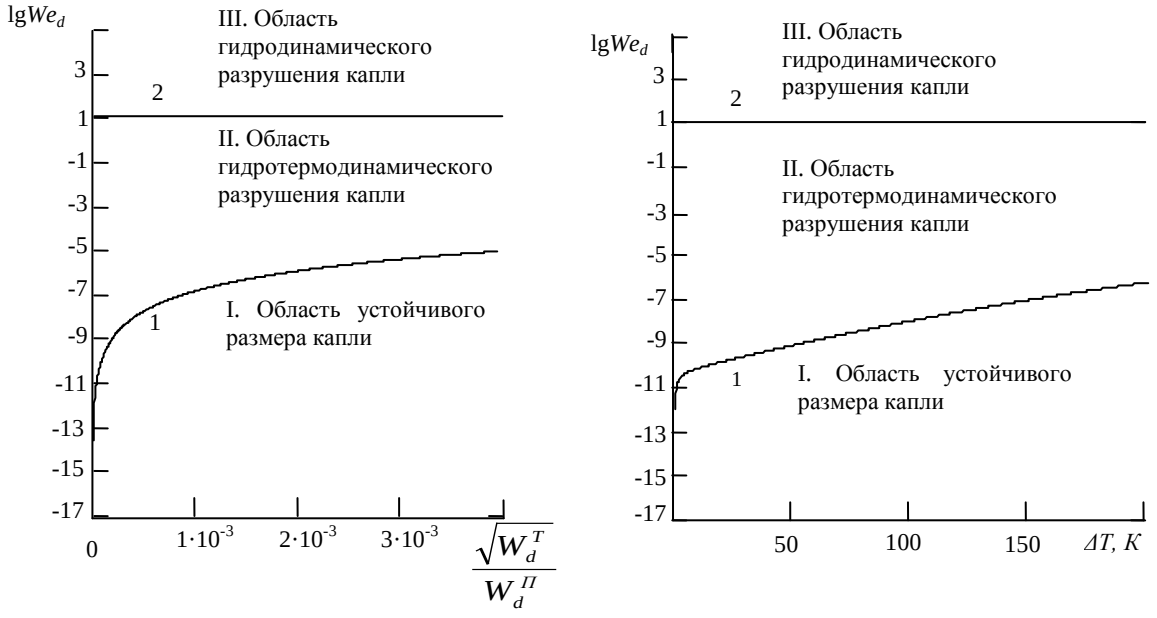


Рис. 10. Зависимость $lgWe_d$ от безразмерного комплекса $\frac{\sqrt{W_d^T}}{W_d^П}$ и ΔT, K для эмульсии вода - кремнийорганическая жидкость ПЭС-5

Отмеченные факторы существенным образом упрощают формулировку и решение новых нетрадиционных задач, связанных с инновационными и энергосберегающими промышленными технологиями [9, 16]. В частности, это относится к формированию рациональной структуры процессов переноса импульса и теплоты для наиболее эффективного использования охлаждающих жидкостей.

Выводы

1. Качественным анализом процессов дробления получены безразмерные гидротермодинамические критерии, представляющие влияние инициированного турбулентными пульсациями, зародышеобразования и перегрева на дробление капель дисперсной фазы в турбулентном потоке высококипящей жидкости.

2. Получена модель дробления перегретых капель дисперсной фазы в турбулентном потоке охлаждающей эмульсии с учетом температуры, которая существенно расширяет круг элементарных физических явлений, определяющих характер кипения и эффективность теплоотдачи.

3. Наличие благоприятных условий парообразования, связанных с разрушением крупнодисперсных капель, позволяет использовать предложенную модель перегретой эмульсии (20) при разработке новых теплоэнергетических систем и установок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теплофизические свойства жидкостей в метастабильном состоянии: Справочник / *В.П. Скрипов, Е.Н. Синицин, П.А. Павлов, Г.Н. Ермаков, Г.Н. Муратов, Н.В. Буланов, В.Г. Байдаков*. - М.: Атомиздат, 1980. - 208 с.

2. *Розенцвайг А.К.* Дробление капель в турбулентном сдвиговом потоке разбавленных жидкостных эмульсий // Журнал ПМТФ. 1981. - № 6. - С.71-78.

3. *Буланов Н.В., Гасанов Б.М.* Особенности кипения эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой // ИФЖ. 2006. Т. 79. - №6. - С.81-84.

4. *Николис Г., Пригожин И.* Познание сложного: Введение. Пер. с англ./ Предисл. *Г.Г. Малинецкого.* Изд. 3-е, доп. - М: Изд-во ЛКИ, 2008. - 352 с.

5. *Зейгарник Ю.А., Ивочкин Ю.П., Григорьев В.С., Оксман А.А.* Заметки о некоторых аспектах парового взрыва // ТВТ. 2008. Т.46. - №5. - С.797-800.

6. *Розенцвайг А.К., Страшинский Ч.С.* Коалесценция низкокипящей дисперсной фазы в турбулентном потоке охлаждающей эмульсии // ЖПХ. 2008. Т.81. - № 9. - С.1567-1269.

7. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: Учебник: В 2 кн. / *В.Г. Айнштейн, М.К. Захаров, Г.А. Нос*ов и др.; Под ред. *В.Г. Айнштейна*. - М.: Университетская книга; Логос; Физматкнига, 2006. Кн.1, 916 с.: ил.

8. *Розенцвайг А.К.* Энергосберегающие структуры процессов переноса в сложных дисперсных системах: Автореф. докт. дис. - Казань: КГЭУ, 2004. - 32 с.

9. *Розенцвайг А.К.* Формирование энергосберегающих структур при проектировании процессов переноса и оптимизации их режимных параметров // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. - Казань: КГЭУ, 2003. - № 7-8. - С.58-67.

10. *Скрипов В.П.* Метастабильная жидкость. - М.: Наука, 1972. - 312 с.

11. *Розенцвайг А.К.* Характер дробления капель при перемешивании разбавленных жидкостных эмульсий турбинными мешалками // ЖПХ. 1985. Т.58. - № 6. - С.1290-1298.

12. .*Виноградов В.Е., Павлов П.А.* Граница предельных перегревов н-гептана, этанола, бензола и толуола в области отрицательных давлений // ТВТ. 2000. Т.38. - №3. - С.402-406.

13. *Р. Праусниц Дж. Шервуд Т.* Свойства газов и жидкостей: Справочное пособие // Пер. с англ. - Л.: Химия, 1982. - 592 с.

14. *Р.Б. Варгафтик.* Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. - М.: Наука, 1972. - 720 с.

15. *Зейгарник Ю.А., Ивочкин Ю.П., Король Е.З.* Термомеханический механизм тонкой фрагментации жидких капель при паровом взрыве // ТВТ. 2004. Т.42. - №3. - С. 491-492.

16. *Розенцвайг А.К. Страшинский Ч.С.* Резонансный и градиентный механизмы инициированного вскипания в однородном турбулентном потоке низкокипящей дисперсной фазы в жидкостной эмульсии // Проектирование и исследование технических систем: Межвузовский научный сборник. Вып.12. – Набережные Челны: Изд-во ИНЭКА, 2008. – С. 73-84.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Ф.Д. Байрамовым.
Поступила в редакцию 26.02.09 г.

РАЗДЕЛ 5

Экономика производственных систем и комплексов

УДК 658.52.011.56

КОМПЛЕКСНОЕ ЭФФЕКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМОЙ ШТАМПОВОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

С.Н. Гончаров, М.Н. Гончаров, Ю.Г. Гончарова
Камская государственная инженерно-экономическая академия

Рассмотрено комплексное решение проблемы управления и подготовки производства, связанного со штамповкой, а также управления вспомогательными производствами.

Уровень развития производства деталей штамповкой, уровень производства оборудования и инструмента для штамповочного производства определяют обороноспособность страны в целом. Объясняется это тем, что большинство деталей машин, товаров народного потребления, военной, авиа- и космической техники производится штамповкой. Масса деталей и изделий при этом может колебаться в пределах от нескольких граммов (детали приборов, часовых механизмов) до нескольких тонн (валы турбин, валы кораблей). Штамповка является наиболее высокопроизводительным способом получения деталей (до 1600 изделий в минуту) и может применяться как в единичном, так и в массовом производстве, причем, чем выше объемы выпускаемой продукции, тем дешевле себестоимость продукции (рис.1). Приведенная на рисунке кривая стремится к стоимости металла, необходимого для производства одной детали.

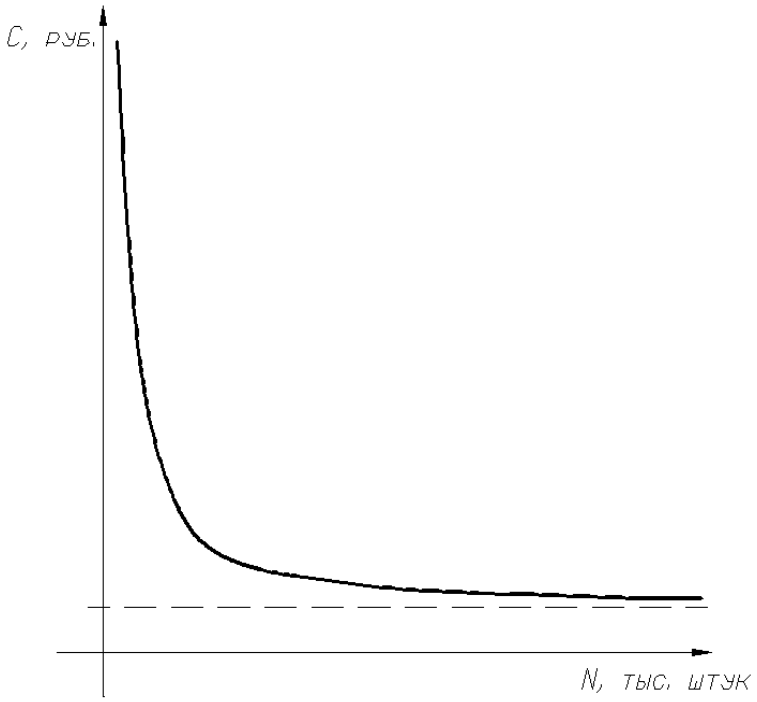


Рисунок 1 - Зависимость себестоимости продукции от объемов производства

При больших объемах выпускаемой продукции недостатки организации штамповочного производства практически незаметны, что позволяет предприятиям успешно функционировать. Однако при этом они не получают 100% теоретической прибыли (теряется до 30% прибыли). Эти недостатки станут хорошо заметными в условиях спада спроса, т.е. в условиях кризиса или в условиях конкурентной иностранной интервенции на рынки отечественной продукции. При этом оказывается, что стоимость иностранных автомобилей может быть ниже цен на отечественные автомобили даже с учетом таможенных пошлин. Авторов статьи удивляет такая ситуация, т.к. российские предприятия имеют очевидные преимущества перед иностранными предприятиями: до-

ставка от завода к потребителю существенно дешевле; материал заводами покупается не по международным, а по российским ценам, стоимость труда в России существенно ниже, чем, например, в Германии или Японии. Поэтому увольнение сотрудников является очень необдуманным шагом, приводящим к дальнейшему усугублению проблем. Правительство России рядом мер стимулирует поддержание российских предприятий, увеличивая спрос на автомобили. Однако эти меры не решают суть существующих проблем и увольнения продолжаются. На взгляд авторов, наиболее ценным решением было снижение цен на топливо для грузоперевозок и снижение части налогов. Также требуется принять решение в области цен на сталь и другие материалы для производства автомобилей. Остальное – в руках самих предприятий. При разработке нижеприведенных решений авторы исходили из того, что текущее положение дел в сфере организации работы предприятий представляет собой реальную опасность для отечественного автопрома и может привести к его краху.

Все это связано с неправильной организацией, например, штамповочного производства, как одного из главных, и вспомогательных производств, в частности. Связано это, в первую очередь, с неверной схемой отечественного производства, базирующейся на принципе «партий и очередей». Иностранные предприятия в настоящее время осуществили полностью переход на бережливое производство и кайдзен, которые многократно уже доказали свою эффективность [1, 3, 4]. Приведенные книги [1, 3, 4] являются решением множества проблем. Однако российская специфика не позволяет успешно внедрить эти принципы на отечественных заводах, т.к. есть ряд принципиальных проблем, мешающих этому процессу. После устранения этих проблем можно будет с успехом внедрить указанные подходы.

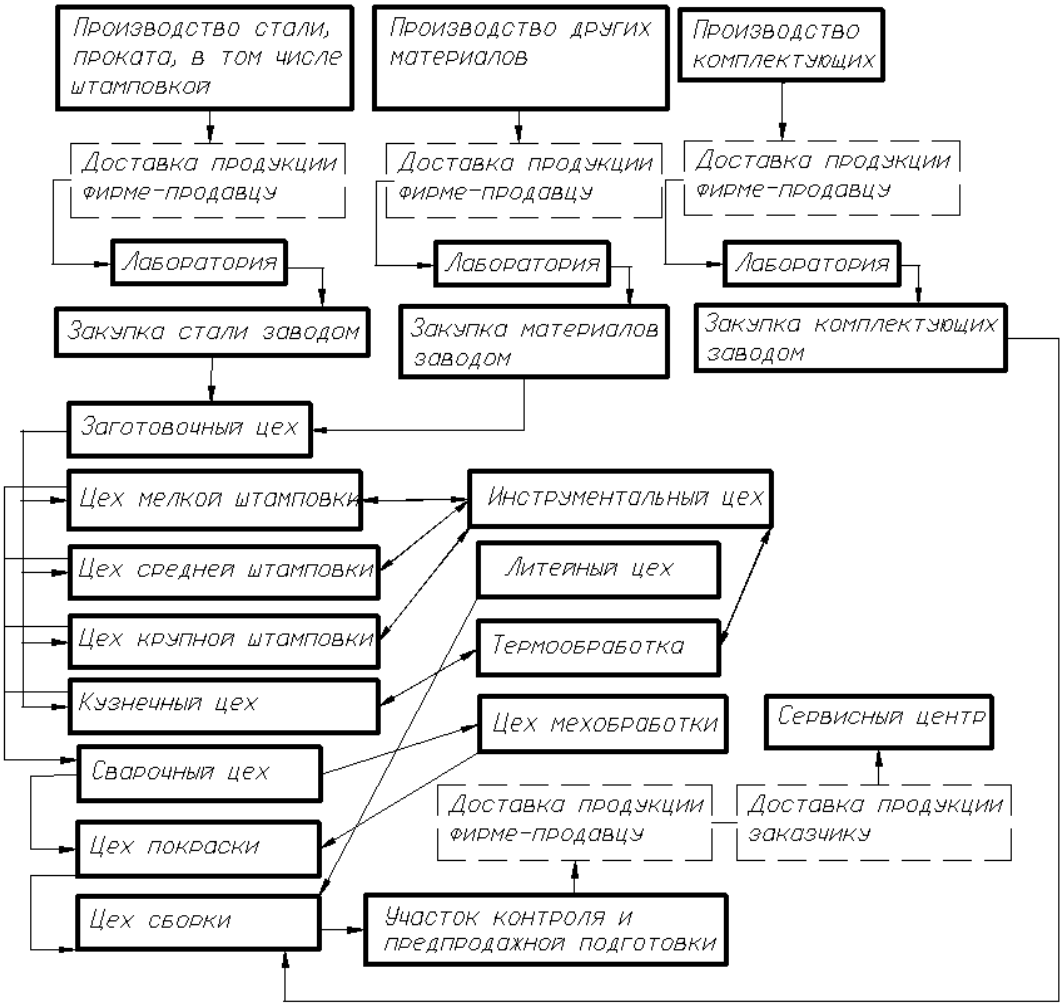


Рисунок 2 - Структура связей между партнерами при производстве автомобилей

Чтобы разобраться, что могут сделать сами предприятия, нужно четко представлять, как организовано производство на конкретном предприятии, как организована его внешняя политика с предприятиями-партнерами, как организована поддержка связи с потребителем, как организована цепочка поставок к потребителю, нет ли мешающих преград и факторов, подлежащих устранению. Также нужно иметь подробную карту того, как складывается себестоимость автомобиля внутри завода, а также по какой цене покупает автомобиль конкретный потребитель в своем регионе.

На рис. 2 показано место штамповочного производства в составе общей системы производства автомобилей.

Из рисунка 2 уже можно сделать некоторые выводы. Например, если ведется речь о заводах, производящих легковые и грузовые автомобили, то все операции с доставкой следует организовать с использованием служб грузоперевозок, которые должны быть при таких заводах. К тому же доставку легковых автомобилей можно организовать грузовыми автомобилями отечественного производства. Например, в случае «АвтоВАЗа» и «КАМАЗа» такое сотрудничество позволит снизить цену на автомобиль «Лада» для конечного потребителя примерно на 5-10 тысяч. К тому же это создаст дополнительные рабочие места.

Самую существенную роль на стоимость автомобиля и его востребованность оказывает его «лицо» в глазах потребителя. Лицо автомобиля в глазах потребителя складывается из следующих параметров: надежность, качество исполнения, стоимость, совпадение образа, созданного рекламой, с реальными ощущениями, легкость управления, маневренность, распространенность центров сервисного обслуживания, стоимость запасных частей, оснащенность современными приборами и устройствами. Последний фактор, которым так часто нас бьют иностранные производители, может быть легко преодолен, например, наличием в автомобиле возможности легкой установки устройств наиболее популярных типов. Например, можно предусмотреть легкосъемную панель приборов, которую можно легко заменить альтернативной, приспособленной под нужды клиента.

Из рисунка 2 также видно, что стоимость автомобиля также сильно зависит от стоимости исходных материалов: стали, неметаллических материалов, комплектующих, а также от внутренних издержек и стоимости услуг партнеров, находящихся между заводом и потребителем. Продажа автомобилей через дилеров позволяет предприятию не заниматься мелкими вопросами, связанными с предпродажной подготовкой, затратами на выставочные центры, но в условиях кризиса прямые поставки с завода могут помочь снижению стоимости продукции для конечного потребителя на 10-30%, что при стоимости автомобиля 1 850 000 рублей весьма существенно. Эти данные взяты на примере автомобиля «КамАЗ». Немаловажно сделать прямые поставки комплектующих и запчастей, т.к. это тоже позволит сохранить рабочие места.

Что касается затрат на исходные материалы и комплектующие, то здесь есть два пути. Первый путь – организовать собственное производство. В условиях кризиса этот путь очень привлекателен, т.к. предприятие сможет самостоятельно контролировать цены на комплектующие и производить их реализацию на сторону. Однако здесь следует иметь в виду и некоторые специальные комплектующие типа пружин, подшипников, электроприборов. Такие комплектующие придется покупать, т.к. скорее всего их стоимость у поставщиков окажется ниже, чем вы сможете получить самостоятельно. Второй путь – выделить наиболее привлекательных поставщиков и заключить с ними взаимовыгодные соглашения о поставках, где в качестве одного из пунктов предусмотреть возможность давления на поставщика в плане повышения качества и снижения цены в будущем. Такой путь использует, например, фирма «Toyota». Возможен и третий путь – скупка контрольного пакета акций поставщика, если это возможно.

Наибольший интерес представляют внутренние издержки предприятия. Они являются наиболее существенным фактором в работе предприятия и могут наносить максимальный ущерб его работе или, наоборот, способствовать быстрой окупаемости проектов.

Поскольку несущий остов автомобиля, двери, капот, большинство деталей двигателя, подвески, колес, тормозной системы и пр. изготавливаются штамповкой, то, несомненно, именно она оказывает существенное влияние на внутренние издержки предприятия и себестоимость автомобиля. Культура штамповочного производства оказывает существенное влияние на качество деталей автомобиля и на работу других производств в целом.

Проблемы в штамповочном производстве можно разделить на следующие: 1) проблемы, возникающие при выборе исходных материалов и типа заготовки; 2) проблемы, возникающие при выборе числа и типа штамповочных операций; 3) проблемы, возникающие при расчете операций; 4) проблемы, возникающие при конструировании и расчете инструмента (штампа); 5) проблемы, возникающие при выборе оборудования; 6) проблемы, возникающие при выборе состава и расположения единиц оборудования на участке; 7) проблемы контроля качества изделия на операциях; 8) проблемы, возникающие при выборе нагревательных устройств; 9) проблемы назначения термообработки;10) проблемы ремонта, наладки оборудования; 11) проблемы ремонта, смазывания, настройки штампов; 12) проблемы повторного использования штампов и их утилизации; 13) проблемы связи конструкторских отделов с технологическими; 14) проблемы оптимизации технологических процессов обработки металлов давлением; 15) проблемы связи рабочих мест с конструкторскими и технологическими отделами; 16) проблемы, связанные с высокой стоимостью нового оборудования.

Данный комплекс проблем связан, во-первых, с недостаточной изученностью некоторых вопросов, во-вторых, с неправильной организацией труда, в-третьих, со слабой связью предприятий с научно-исследовательскими организациями, институтами и консалтинговыми центрами.

При создании современного завода «с нуля» большинство указанных проблем просто отсутствует, т.к. современное оборудование имеет необходимые устройства контроля диагностики и настройки. Однако в условиях имеющихся предприятий все эти проблемы присутствуют в полном объеме. Авторы статьи утверждают, что есть принципиальные возможности решения всех вышеперечисленных проблем, при этом требуется создание рабочих мест, расширение производства, его постепенное обновление. Также здесь сразу укажем на то, что если рассматривать проблемы в комплексе, то можно выделить проблемы на «этажах»: 1) проблемы в профильном министерстве; 2) проблемы, возникающие в высшем управлении завода (стратегия и маркетинг); 3) проблемы, возникающие в отделах учета и управления; 4) проблемы в конструкторских и технологических бюро (подготовка производства); 5) проблемы непосредственно в цехе [5]. Так, авторы [5] утверждают, что правильно организованное предприятие стремится к правильной пирамиде, где каждый этаж пирамиды имеет определенное число людей. Ниже рассматриваются проблемы 3 и 4.

Наиболее важная проблема - проблема связи конструкторских отделов с технологическими. Необходимо состыковать работу этих отделов и ни в коем случае не разделять их деятельность. Работа технолога напрямую зависит от решений, принятых конструктором. Если конструктор разработал очень сложную с точки зрения технолога деталь, это может привести к необоснованным затратам при ее производстве, увеличить брак и прочее. Поэтому работа технолога и конструктора должна происходить «за одним столом». Требуется анализировать множество решений и находить наиболее рациональное для данных заводских условий.

Проблемы, возникающие при выборе исходных материалов и типа заготовки, тесно связаны с типом применяемого штампа или штампов, а также прямо влияют на количество бра-

ка и качество изделий. Поэтому требования технологов по применяемому материалу должны быть приоритетными. Если же деталь по конструктивным требованиям прочности необходимо изготовить из другого материала, то следует тщательно проанализировать все варианты. Этот этап очень важен, т.к. некоторые детали очень «капризны» и получить их штамповкой очень проблематично. Здесь можно порекомендовать делать деталь составной с последующей сваркой. В некоторых случаях это упрощает и удешевляет производство детали.

Проблемы, возникающие при выборе числа и типа штамповочных операций, оказывают непосредственное влияние на себестоимость детали, т.к. каждая операция требует либо дополнительного штампа, либо усложняет существующий штамп. Также может понадобиться увеличение числа оборудования. Лучшим решением здесь может явиться использование минимального числа оборудования с достаточным числом штампов при использовании быстрой переналадки. Это решение наиболее дешевое. Если число операций велико, то требуется в ряде случаев их совмещать в одном штампе. Однако усложнение штампа усложняет его ремонт и наладку. Поэтому следует заранее предусмотреть возможность быстрой замены вышедших из строя деталей и быструю наладку. В любом случае требуется заранее на этапе проектирования выделить проблемные части штампа и принять решение, необходимо ли усложнять штамп совмещением операций.

Проблемы, возникающие при расчете операций, могут приводить к быстрому износу оборудования и штампа. Данные проблемы характерны для крупных рельефных деталей, а также для сложных по форме объемных горячештампованных деталей. В настоящее время есть апробированные системы автоматизированного проектирования, позволяющие с высокой степенью достоверности провести анализ напряженно-деформированного состояния материала заготовки и деталей штампа и получить информацию о правильности технологических решений. Аналитическое решение таких задач в настоящий момент затруднено.

Проблемы, возникающие при конструировании и расчете инструмента (штампа), приводят к увеличению стоимости штампа, повышению травматизма, износу оборудования, быстрому выходу штампа из строя. Штамп является достаточно дорогим инструментом и при правильном изготовлении многократно себя окупает. Быстрому выходу из строя и износу обычно подвержены рабочие детали, находящиеся в непосредственном контакте с металлом. Здесь следует заранее предусмотреть меры по уменьшению числа выходящих из строя деталей, а также по их быстрой замене.

Проблемы, возникающие при выборе оборудования, приводят к существенному завышению расходов либо на само оборудование, либо на его дальнейшую эксплуатацию. При выборе оборудования следует принимать во внимание известность фирмы, опыт работы на российском рынке, предложения по сервисному обслуживанию и настройке. Предпочтение следует отдавать современным образцам с системой диагностики и возможностью использования со SCADA-системами.

Проблемы, возникающие при выборе состава и расположения единиц оборудования на участке, приводят к увеличению пути детали или рабочего и в общем случае увеличивают время изготовления продукции и приводят к браку. Поэтому при расстановке оборудования необходимо учитывать последовательность операций и возможность непрерывного движения детали к следующей стадии обработки.

Проблемы контроля качества изделия на операциях могут приводить к отбраковке всей партии отштампованных изделий. Во избежание этого необходимо предусмотреть возможность автоматического контроля на каждой операции каждой детали. Это решит раз и навсегда проблему с браком.

Проблемы, возникающие при выборе нагревательных устройств, могут привести к не-

хватке мощности оборудования при изготовлении определенного типа деталей или к увеличенному расходу электроэнергии. Поэтому такое оборудование необходимо выбирать с расчетом на перспективу. Также необходимо учесть возможность дополнительного использования этого типа оборудования для обеспечения его непрерывной работы.

Проблемы назначения термообработки, особенно при изготовлении инструмента, приводят к быстрому выходу инструмента из строя. Термообработке деталей и инструмента должно уделяться самое пристальное внимание, поскольку механические характеристики стальных изделий напрямую зависят от правильно проработанной микроструктуры.

Проблемы ремонта, наладки и настройки оборудования заключаются в длительном выходе оборудования из строя. Необходимо заранее предусмотреть диагностику оборудования, предотвратить возможность перегрузки оборудования, заклинивания. Для быстрой наладки оборудования необходимо также разработать необходимый комплект механизмов и приспособлений. Все это позволит своевременно вернуть единицу оборудования к работе и не нарушить сроки поставки продукции.

Проблемы ремонта, смазывания, настройки штампов. Данные процессы при неправильной организации труда могут занимать очень значительное время (до нескольких часов или дней). Автор книги [1] приводит опыт применения системы SMED - быстрой переналадки инструмента, используемой фирмой «Toyota». Возможность быстрой переналадки позволяет уменьшить число единиц оборудования и резко сократить простои оборудования (до нескольких минут). Для реализации SMED требуется комплексный анализ каждого конкретного процесса с привлечением специалистов в области изобретательства, технологов, конструкторов.

Проблемы повторного использования штампов и их утилизации. Внутри завода штампы должны использоваться повторно, для чего необходимо предусмотреть их переналадку под другие детали. Утилизация штампов должна также производиться с целью их переплава и повторного использования внутри завода.

Проблемы оптимизации технологических процессов обработки металлов давлением являются наиболее наукоемкими. Решение этих проблем позволит существенно сократить время производства изделий, устранить вредные явления, например, интенсивное образование окалины. В целом оптимизация позволяет упростить штамповую оснастку и, следовательно, продлить срок службы штампов, а также устраняются дефекты при штамповке особенно объемных деталей, снижается сила штамповки. В некоторых случаях удается получить в два раза меньшее потребное усилие штамповки. Усилие штамповки существенно влияет на стоимость оборудования (иногда в 5-10 раз дороже). Поэтому решение проблем оптимизации является важным шагом в повышении конкурентоспособности получаемой продукции.

Проблемы связи рабочих мест с конструкторскими и технологическими отделами должны быть устранены немедленно. Технологи должны иметь визуальное представление о возникшей проблеме, находясь у себя в кабинете. Это позволит им немедленно приступить к поиску решения. Конструкторы также смогут оценить причины и последствия произошедших сбоев.

Проблемы, связанные с высокой стоимостью нового оборудования. Данный комплекс проблем не позволяет широко распространять штамповочное производство. Пока большинство изделий, особенно средних и крупных, получается внутри крупных заводов. Решение этой проблемы позволит создать множество рабочих мест за счет развития предпринимательства. В настоящее время есть решения, позволяющие снижать технологическую силу: использование установок с эффектом электрогидравлического удара; штамповка на молотах; секционная штамповка; штамповка частей изделия с последующей сваркой; использование

специальных установок, например, сферодвижной раскатки, где удается существенно снизить силу штамповки по сравнению с прессами. Также следует отметить, что необходимо сотрудничать с российскими заводами тяжелого машиностроения.

В заключение хотелось бы показать альтернативное использование штамповочного производства, т.е. не только для производства автомобилей определенного типа. Для успешного выживания предприятий автопрома им необходимо произвести анализ рынка на предмет востребованной продукции, которую можно реализовать в заводских условиях. Здесь есть множество вариантов: от наборов автомобильных инструментов для всех типов авто до производства отдельных агрегатов-аналогов для зарубежных грузовиков и легковых автомобилей. Для обеспечения юридической чистоты следует произвести анализ защищенных в данных устройствах решений и разработать их модификации с последующим оформлением патента. В 2008-2009 годах автопарк легковых автомобилей вырос на 2,5 миллиона штук, в основном это автомобили иностранного производства. Здесь есть «не паханное» поле для производства наборов инструментов, приспособлений для ремонта, изготовления аналогичных запчастей и пр. Также необходимо рассмотреть возможность изготовления инструментов для нужд строителей, изготовления метизов, фурнитуры, станков для деревообработки и прочего. Рынок можно наполнить оборудованием и приспособлениями для производства отдельных запчастей, что вызовет возрождение и подъем предпринимательства. Можно организовать производство легких стальных конструкций для нужд дачников и жителей поселков. Нет продукции, облегчающей труд жителей сел и деревень. Также следует заполнить нишу рынка малолитражными автомобилями с гибридными установками или электрическими двигателями. Разработки таких автомобилей уже давно есть в вузах.

Выводы. В результате анализа проблем штамповочного производства удалось предложить конкретные меры для обеспечения конкурентоспособности и выживания автомобильной промышленности, в частности ОАО «КАМАЗ» за счет эффективного использования штамповочного производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Быстрая переналадка: Революционная технология оптимизации производства / *Сигео Синго;* Пер. с англ. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2006. – 344 с.

2. *Гонаров С.Н., Ососков М.А.* Использование СРС-технологий для повышения эффективности разработки технологических процессов обработки металлов давлением // Проектирование и исследование технических систем. – 2007. - №11. – С. 118-124

3. Гемба кайдзен: Путь к снижению затрат и повышению качества / *Масааки Имаи;* Пер. с англ. – М.: «Альрина Бизнес Букс», 2005. – 346 с.

4. Кайдзен: ключ к успеху японских компаний / *Масааки Имаи;* Пер. с англ. – М.: «Альпина Бизнес Букс», 2004. – 274 с.

5. *Бирбраер Р.А., Альтшулер И.Г.* Основы инженерного консалтинга. – М.: Дело, 2005. – 208 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Г. Шибаковым.
Поступила в редакцию 22.04.09 г.

УДК 658.52.011.56

ЛОКАЛЬНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ УПРОЧНЯЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБИЛЯ И ИНСТРУМЕНТА

Ю.Г. Гончарова, С.Н. Гончаров
Камская государственная инженерно-экономическая академия

Рассмотрены возможности одновременного снижения металлоемкости и себестоимости, повышения прочности при производстве деталей автомобиля или инструмента на основе локального применения термомеханической обработки.

Современная экономика автомобилестроения и производства инструмента диктуют необходимость эффективного использования свойств стали. Опыт применения термомеханической обработки в промышленности с последующим испытанием термомеханически упрочненных изделий в эксплуатации показал [1], что на нелегированных или низколегированных сталях можно достичь необычно высокого комплекса механических свойств (при сравнимой прочности более высокий уровень пластичности и вязкости, повышенное сопротивление разрушению), который не может быть достигнут обычными способами термообработки или усложненного легирования. При этом решаются три важнейшие задачи: экономия дорогостоящих легирующих элементов, общая экономия металла за счет облегчения веса деталей, повышение надежности и долговечности изделий [1]. Описанный эффект достигается за счет управления распределением несовершенств в структуре стали. Эффективность термомеханической обработки зависит от природы сплава, и ее схема осуществления для достижения максимального эффекта должна выбираться индивидуально для каждого сплава.

Совместное применение пластической деформации и фазовых превращений позволяют управлять структурой стали, использовать свойства стали более глубоко, нежели это делается в настоящее время в большинстве технологических процессов. Также следует отметить, что возможность достижения этого эффекта на относительно крупных изделиях осложнена, во-первых, существенной силой деформирования, во-вторых, быстрым износом штамповой оснастки за счет возрастания поверхности контакта и более быстрым разогревом штампов.

Из опыта эксплуатации деталей автомобиля известно, что разрушению, изнашиванию, выходу из строя в основном подвержена не вся деталь целиком, а лишь некоторые вполне определенные участки. Это позволяет подвергать специальной обработке не всю деталь целиком, что часто и не нужно, а лишь нужный ее участок, что важно для средних и крупных деталей. Обычно так и делается, когда, например, термообработке подвергают только поверхность детали или инструмента, зубья и пр. Однако для существенного повышения механических характеристик требуется объемная проработка структуры металла, что достигается пластической деформацией.

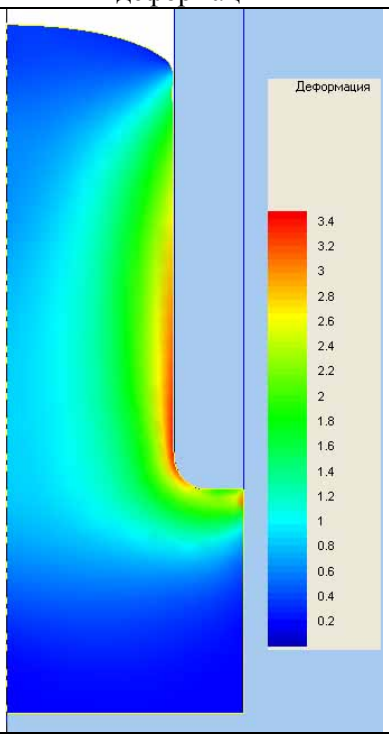
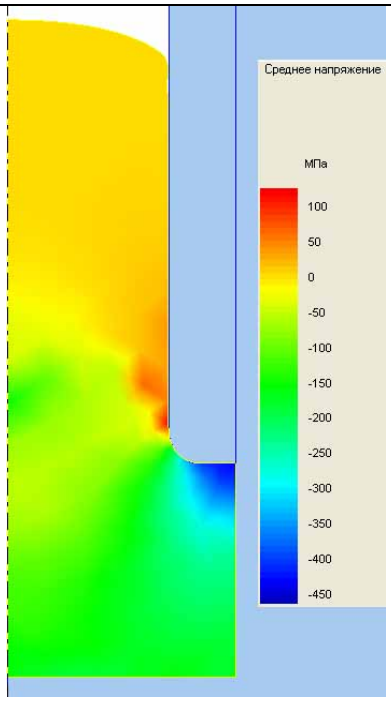
При производстве горячештампованных деталей на качество получаемого изделия существенно влияют следующие факторы: параметры подготовки структуры исходных материалов (степень обжатия), схема осуществления технологического процесса изготовления детали, параметры последующей термообработки. Уровень подготовки структуры исходных материалов зависит от технологических процессов производства проката. Таким образом, если проработка структуры металла заготовки неудовлетворительна, то это, несомненно, скажется на механических характеристиках будущего изделия.

Известно [1,2], что степень пластической деформации оказывает существенное влияние на текстуру деформации. При высоких степенях деформации и схемах объемного сжатия удается получить сильное измельчение зерен, что в свою очередь вызывает существенное улучшение механических характеристик стали.

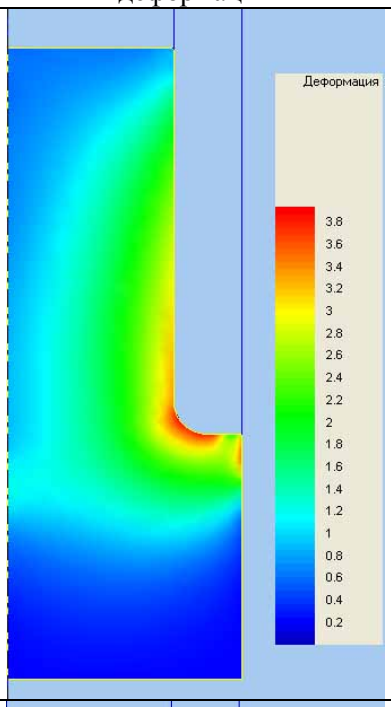
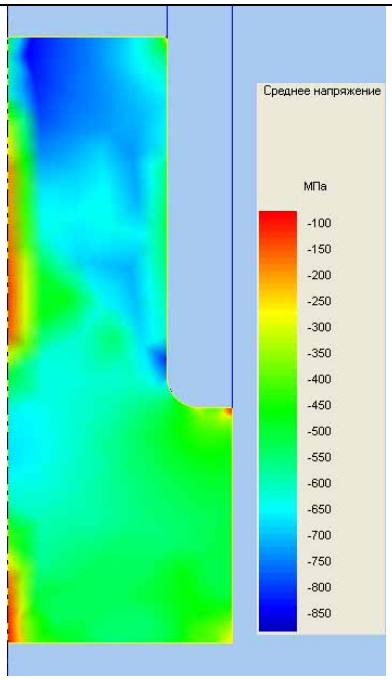
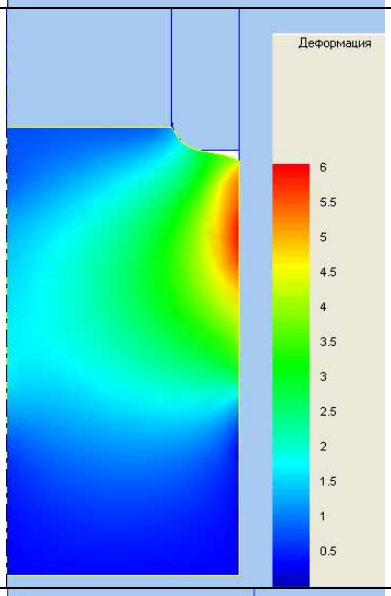
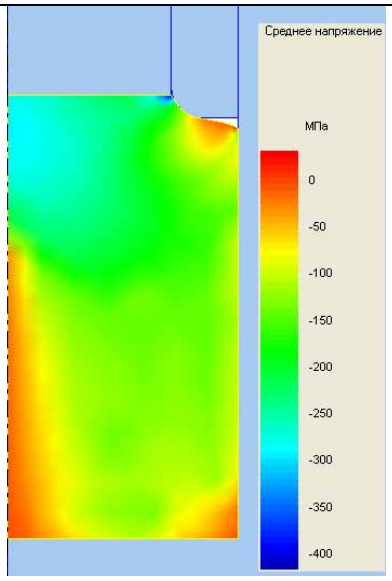
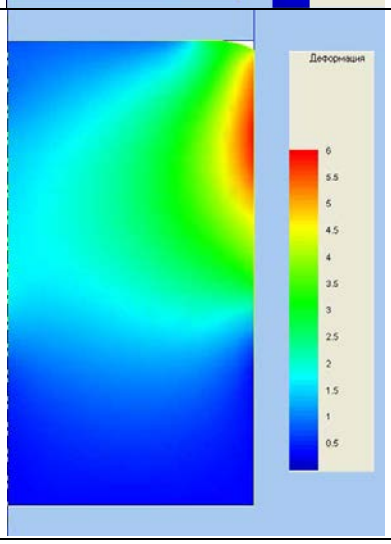
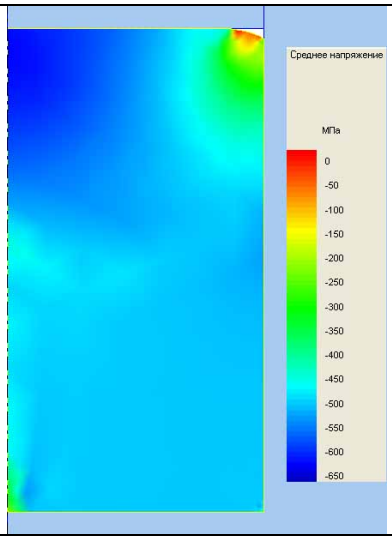
Анализ данных экспериментов, а также данные компьютерного моделирования процессов пластической деформации на ряде деталей автомобиля «КАМАЗ» [3] показали, что в существующих технологических процессах далеко не всегда удается получить равномерную проработку структуры металла в объеме, что объясняется особенностью течения металла как физической среды.

Исследование течения металла позволяет прогнозировать, как будет расположена текстура деформации, отслеживать дефекты пластической обработки металла (прострелы, складки, трещины), следить за схемой напряженного состояния. Использование специальных технологических процессов [4], позволяющих реализовать интенсивную пластическую деформацию, позволяет произвести подготовку структуры исходной заготовки. При практическом использовании таких заготовок наблюдается резкое повышение пластичности без разрушения. В опытах на свинце [4] было показано, что при использовании отлитых заготовок и заготовок, подготовленных специальным образом, уже после незначительной степени деформации (10-20%) при сжатии заготовок на свободной поверхности образовывались трещины. В заготовках, подготовленных интенсивной пластической деформацией, после значительной деформации (100-300%) даже на свободной поверхности разрушений не наблюдалось. Подобные опыты совпадают с результатами других авторов, использующих интенсивную пластическую деформацию при подготовке структуры стали. Так, при изготовлении холодновысадочного инструмента наблюдалось повышение прочностных характеристик стали в два раза.

Таблица 1 - Параметры процесса интенсивной пластической деформации [4]

Поле распределения накопленной степени деформации	Поле распределения среднего напряжения
	

Продолжение таблицы 1

Поле распределения накопленной степени деформации	Поле распределения среднего напряжения
	
	
	

При подготовке структуры стали и более прочных сплавов процесс необходимо проводить при повышенных температурах для снижения силы деформирования, т.е. с осуществлением термомеханической обработки. Процессы нагрева стали до ковочных температур неизбежно приводят к протеканию процессов рекристаллизации и уменьшению эффекта создания текстуры деформации. Поэтому крайне важно в технологическом процессе предусмотреть проведение механической обработки тогда, когда к моменту ее окончания температура деформации будет на уровне нижнего интервала ковочной температуры.

В таблице 1 показаны данные имитационного моделирования процесса интенсивной пластической деформации по схеме [4]. Проработке подвергается только верхняя часть заготовки, после чего заготовка восстанавливает свою первоначальную форму. Из таблицы 1 также видно, что особенностью процесса является состояние объемного сжатия, что способствует повышению пластичности и залечиванию микродефектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Термомеханическая обработка стали / *Бернштейн М.Л., Займовский В.А., Капуткина Л.М.* - М.: Металлургия, 1983. - 480 с.

2. Механические свойства металлов / *Бернштейн М.Л., Займовский В.А* . - М.: Металлургия, 1979. - 496 с.

3. *Гончаров С.Н., Гончаров М.Н.* Компьютерный анализ процессов пластической деформации. - Набережные Челны: Изд-во ИНЭКА, 2009. - 170 с.

4. *Гончаров С.Н., Шибаков В.Г., Мухин М.В.* Способ пластического структурообразования металлов при интенсивной пластической деформации и устройство для его осуществления. Патент РФ №2189883 от 21.02.01.

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Г. Шибаковым.
Поступила в редакцию 22.04.09 г.

УДК 338.242 + 330.4 + 004.02

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАНОВЫХ И РАСЧЕТНЫХ ЗАДАЧ БИЗНЕС-ПРОЦЕССА «ОСНОВНОЕ ПРОИЗВОДСТВО»

А.Р. Загирова
Камская государственная инженерно-экономическая академия

Рассматривается проблема повышения экономической и управленческой деятельности производственного предприятия. Приводятся математические модели оптимизации параметров плановых задач бизнес-процесса «Основное производство».

Введение. Основное производство характеризует процесс, в результате которого исходные товарно-материальные ценности (сырье, материалы) с помощью орудий труда и при участии человека превращаются в готовую продукцию [1].

Одной из основных функций управления производственно-хозяйственной деятельностью предприятия является планирование. Планирование – это функция управления, заключающаяся в принятии решений о главных направлениях экономического развития предприятия на основе разработки количественных и качественных показателей, а также в определении способов их выполнения.

Планирование – это непрерывный процесс установления или уточнения целей развития предприятия и его структурных подразделений (процесс практического воплощения стратегии предприятия). А также это:

- определение средств достижения целей, сроков и последовательности реализации;
- процесс выявления ресурсов и установления пропорций между ресурсами и производством, между отдельными участками, цехами, производствами;
- разработка плана и его корректировка, включающее предвидение, обоснование, конкретизацию и описание деятельности хозяйственного объекта на ближайшую и отдаленную перспективу.

Планирование позволяет уменьшить неопределенность будущего и обеспечить эффективное функционирование и развитие предприятия.

Все задачи любого бизнес-процесса можно разбить на четыре класса задач:

1. Аналитические;
2. Организационные;
3. Технологические (технические, инженерные);
4. Учетные.

Плановые задачи относятся к аналитическому классу.

Аналитические (управленческие) задачи включают задачи расчета, анализа, планирования программы развития предприятия. Для решения этих задач, как правило, используются различные методики, алгоритмы, математические методы и модели. Такими задачами могут являться, в частности, задачи планирования финансов и движения денежных ресурсов, объемного и календарного планирования производства, анализа и прогнозирования параметров рынка входящих ресурсов или готовой продукции, расчета объема незавершенного производства, расчета показателей эффективности бизнес-процесса и т.д. [2]

Управляющим потоком для аналитических задач является алгоритм решения, как правило, - математическая модель [3].

Математические модели оптимизации параметров аналитических задач бизнес-процесса “Основное производство”. Согласно процессно-задачной технологии можно выделить следующие аналитические задачи бизнес-процесса “Основное производство”:

2.1.1. Среднесрочное планирование;

2.1.2. Размещение производства;

2.1.3. Календарное планирование производства;

2.1.4. Расчет потребности в материальных ресурсах на производственную программу;

2.1.5. Составление графиков обеспечения рабочих мест.

Все эти задачи взаимодействуют друг с другом и с другими задачами через входные и выходные потоки.

2.1.1. Среднесрочное планирование. При планировании объемов производства и ассортимента продукции учитываются объемы заказов и тенденции спроса на продукцию, а также финансовые средства, направленные на производственную программу, т.е. бюджетирование. Одним из методов решения задачи планирования производства продукции является математический метод линейного программирования. Целевая функция будет иметь вид:

$$z = \sum_j c_j \cdot x_j - \sum_i s_i \cdot b_i \to \max,$$

где x_j - объем произведенной продукции j-го вида (план производства); c_j - цена (доход) от продажи продукции j-го вида; z - суммарный доход (прибыль) от продажи произведенной продукции; s_i - цена на i-ый вид ресурса; b_i - объем i-го вида ресурса, который следует закупить.

Ограничения задачи:

$\sum_i a_{ij} \cdot x_j \le b_i + b_i^0$ - ограничения на ресурсы, где a_{ij} - нормы затрат i-го ресурса на j-ый вид продукции; b_i^0 - объем i-го вида ресурса, который имеется на складе.

$\sum_i b_i \cdot s_i \le Q$ - ограничение на финансы, где Q - объем финансовых средств, выделенных на производство.

$d_j \le x_j \le D_j$ - ограничение на объем производства, где d_j и D_j - объем заказов и емкость рынка соответственно.

2.1.2. Размещение производства. При изготовлении продукции разного вида используются различное оборудование и производственные линии. Задача размещения производства решает основную проблему: оборудование должно быть загружено, но объем производства не должен превышать производственные мощности.

Математическая модель задачи “Размещение производства” тесно связана с задачей 2.1.1. “Среднесрочное планирование”. В общей математической модели появляется новое ограничение:

$\sum_j to_{pj} \cdot x_j \le k_p$ - ограничение на производственные мощности, где to_{pj} - норма затрат времени на частичное производство j-го вида продукции на p-ом оборудовании; k_p - мощность p-го оборудования. $\sum_p to_{pj}$ - нормы затрат времени на весь производственный цикл j-го вида продукции.

2.1.3. Календарное планирование производства. От покупателей (потребителей и дилеров) поступают заказы на производство разных видов продукции к определенному сроку. Задача календарного планирования производства решает основную проблему: все заказы должны быть выполнены в срок.

Задача “Календарное планирование” тесно связана с задачами “Среднесрочное планирование” и “Размещение производства”, общая математическая модель согласно новым условиям преобразуется следующим образом:

Пусть имеются заказы на производство каждого вида продукции в определенные сроки, тогда

$$d = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1j} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{j1} & d_{j2} & \dots & d_{jt} \end{pmatrix}$$ - матрица заказов каждого вида продукции на планируемый период, где t - время, j - количество видов продукции.

Целевая функция будет иметь следующий вид:

$z = \sum_j c_j \cdot \sum_t x_{j,t} - \sum_i b_i \cdot s_i \to \max$, где $x_{j,t}$ - объем произведенной продукции j-го вида (план производства) в момент времени t;

Ограничения задачи:

$\sum_i a_{ij} \cdot \sum_t x_{j,t} \le b_i + b_i^0$ - ограничения на ресурсы,

$\sum_i b_i \cdot s_i \le Q$ - ограничение на финансы,

$\sum_j to_{pj} \cdot \sum_t x_{jt} \le k_p$ - ограничение на производственные мощности;

ограничения на объем производства:

$\sum_{t=1}^{l} x_{j,t} \ge d_{j,l} - \sum_{t=1}^{l-1} d_{j,t}$, $l = 1 \dots T$, где T - количество временных периодов (период планирования),

$\sum_t x_{j,t} \le D_j$, где D_j - плановый показатель емкости рынка.

2.1.4. Расчет потребности в материальных ресурсах на производственную программу. Задача позволяет рассчитать общий объем ресурсов, требуемых для выполнения плана производства.

$$b_i + b_i^0 = \sum_i a_{ij} \cdot \sum_t x_{j,t},$$

2.1.5. Составление графиков обеспечения рабочих мест. Т.к. существует план-график производства, то согласно этому плану-графику каждый день на рабочих местах должны быть все материальные ресурсы, необходимые для производства продукции в назначенный срок.

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1t} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2t} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{j1} & x_{j2} & \dots & x_{jt} \end{pmatrix}$$ - матрица объемов производства продукции каждого вида за планируемый период.

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1j} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \dots & a_{ij} \end{pmatrix}$$ - матрица норм затрат.

$B = A \cdot X$, где

$$B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{i1} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{i2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{1t} & b_{2t} & \dots & b_{it} \end{pmatrix}$$ - матрица потребностей в ресурсах за планируемый период.

Заключение. В результате оптимизации параметров решения аналитических задач бизнес-процесса “Основное производство” обеспечивается максимизация прибыли от реализации продукции производственного предприятия с учетом мощностей производственного оборудования, а также рыночных показателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Зайцев Н.Л.* Экономика, организация и управление предприятием: учеб. пособие. – М.: ИНФРА-М, 2004. – 491 с. – (Серия “Высшее образование”).

2. *Смирнов Ю.Н.* Информационно-математическая модель деятельности предприятия. /Проблемы экономики: поиск новых подходов: межвузовский научный сборник. Вып.9./Мин-во образования и науки РФ; Камская госуд. инж.-экон. акад. - Набережные Челны: Изд-во Камской государственной инженерно-экономической академии, 2007. - С. 220-223.

3. *Смирнов Ю.Н.* Общая и имитационная информационно-математические модели деятельности предприятия // Научно-практический журнал «Интеграл» – 2007. - № 6.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Б.Л. Кузнецовым.
Поступила в редакцию 2.03.09 г.

Научное издание

УДК 62
П 79

Проектирование и исследование технических систем: межвузовский научный сборник. Вып. 13. / Под ред. доктора техн. наук проф. *В.Г. Шибакова;* Мин-во образования и науки РФ; ГОУ ВПО «Камская госуд. инж.-экон. акад.» – Набережные Челны: Изд-во Камской государственной инженерно-экономической академии, 2009. – 172 с.

ISBN 978-5-9536-0184-9 (№ 13)

ISBN 5-9536-0004-6

Главный редактор *Д.К.Мухамадеева,*
Технический редактор *Г.Н. Ахметшина*

Подписано в печать 22.06.2009 г.
Формат 60x84/8 Бумага писчая Печать ризографическая
Уч.-изд.л. 21,5 Усл.-печ.л. 21,5 Тираж 150 экз.
Заказ 1250
Издательско-полиграфический центр
Камской государственной инженерно-экономической академии

423810, г. Набережные Челны, Новый город, проспект Мира, 68/19
тел./факс (8552) 39-65-99 e-mail: ic@ineka.ru