

# ВЕСТНИК

*Белорусско-Российского университета*

*Научно-методический журнал  
Издается с октября 2001 г.*

*Периодичность – 4 раза в год*

4 (37) 2012

---

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАШИНОСТРОЕНИЕ

<b>БЕЛОКОНЬ В. М., КОРОТЕЕВ А. О.</b> О сварке в двух струях защитного газа .....	6
<b>БЕРЕЗИЕНКО В. П., БЕНДИК Т. И.</b> Определение параметров режима контактной рельефной сварки на основе математических моделей процессов .....	15
<b>КАЗАКОВ А. В., ЖОЛОБОВ А. А.</b> Оптимизация режимов резания технологических переходов наружной токарной обработки ступенчатых валов на станке с ЧПУ .....	23
<b>КАПИТОНОВ А. В., ЧЕРНЯКОВ С. Г.</b> Обеспечение точности сборки планетарного эксцентрикового редуктора с модифицированными зубьями сателлита методами расчета линейных размерных цепей.....	32
<b>МЕЛЬНИКОВ А. С., САЗОНОВ И. С., КИМ В. А., БИЛЫК О. В., ВАСИЛЕВСКИЙ В. И.</b> Алгоритм системы активной безопасности двухколесной мобильной машины .....	40
<b>МИНАКОВ А. П., КАМЧИЦКАЯ И. Д., ИЛЬЮШИНА Е. В., ЮШКЕВИЧ Н. М.</b> Современные конструкции инструментов для упрочняющей импульсно-ударной пневмовибродинамической обработки плоских поверхностей.....	50

<b>МИШУТА Д. В., АЛЬГИН В. Б., МИХАЙЛОВ В. Г.</b> Оценка напряженно-деформированного состояния кузова-контейнера переменного объема .....	61
<b>СИВАЧЕНКО Л. А., ДОБРОВОЛЬСКИЙ Ю. К.</b> История развития и современный уровень техники измельчения .....	69
<b>САЗОНОВ И. С., ГУРСКИЙ Н. Н., АМЕЛЬЧЕНКО Н. П.</b> Моделирование активного подрессоривания сиденья водителя колесного трактора .....	77

#### ОХРАНА ТРУДА. ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ. ГЕОЭКОЛОГИЯ

<b>ИЛЬИЧЕВ В. А., КОЛЧУНОВ В. И., ГОРДОН В. А.</b> Математическая модель динамики закрытой биосфе- росовместимой территории .....	86
---	----

#### ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

<b>МАРКОВ А. П.</b> Особенности световодной мутномет- рии .....	93
<b>НОВИКОВ В. А., СКРЯБИНА Г. И., ШИЛОВ А. В., КУШНЕР А. В.</b> Расчет коэффициента отражения плен- ки, визуализирующей магнитные поля, в области де- фекта .....	104
<b>ШИЛОВА И. В.</b> Многоэлементный волоконно-оптиче- ский датчик избыточного давления .....	116

#### ФИЗИКА

<b>ЮРЕВИЧ В. А., СКАПЦОВ А. С., ЮРЕВИЧ Ю. В.</b> Резонансная трансформация коротких оптических им- пульсов при прохождении через среду из монодисперс- ных наночастиц .....	125
--	-----

#### ЭКОНОМИКА. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

<b>ИВАНОВСКАЯ И. В., ДРАГУН Н. П.</b> Выявление це- нового сговора производителей на товарных рынках Беларуси: теория на практике .....	132
---	-----

<b>ШМАРКОВ М. С., ШМАРКОВА Л. И.</b> Анализ эволюции сезонных колебаний характеристик деятельности туристских фирм и прогнозирование их развития .....	144
--	-----

---

- *Журнал включен в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим наукам*
- *Публикуемые материалы рецензируются*
- *Подписные индексы: для индивидуальных подписчиков – 00014  
для предприятий и организаций – 000142*

## CONTENTS

### MECHANICAL ENGINEERING

<b>BELOKON V. M., KOROTEYEV A. O.</b> On welding in two shielding gas flows .....	6
<b>BEREZIENKO V. P., BENDIK T. I.</b> Determination of the Projection welding process parameters on the basis of mathematical modelling.....	15
<b>KAZAKOV A. V., ZHOLOBOV A. A.</b> Optimization of cutting conditions of manufacturing steps in external turning of stepped shafts on a CNC machine .....	23
<b>KAPITONOV A. V., CHERNYAKOV S. G.</b> Assurance of accuracy in assembling a planetary eccentric reduction gear with modified teeth of a satellite gear by using methods of calculation of linear dimension chains.....	32
<b>MELNIKOV A. S., SAZONOV I. S., KIM V.A., BILYK O. V., VASILEVSKY V. I.</b> The algorithm of the system of active safety of a two-wheeled mobile machine .....	40
<b>MINAKOV A. P., KAMCHITSKAYA I. D., ILYUSHINA E. V., YUSHKEVICH N. M.</b> Modern designs of tools for strengthening pulse-impact-pneumo-vibro-dynamic treatment of flat surfaces .....	50
<b>MISHUTA D. V., ALGIN V. B., MIKHAILOV V. G.</b> Assessment of the deflected mode of a container body of varying volume.....	61
<b>SIVACHENKO L. A., DOBROVOLSKY Y. K.</b> History of development of grinding engineering and its up-to-date level .....	69
<b>SAZONOV I. S., HURSKY N. N., AMELCHENKO N. P.</b> Simulation of active cushioning of a wheeled tractor driver seat .....	77

### LABOUR PROTECTION. ENVIRONMENT PROTECTION. GEOECOLOGY

<b>ILICHEV V. A., KOLCHUNOV V. I., GORDON V. A.</b> Mathematical model of dynamics of closed biosphere compartmentible territory.....	86
---	----

### INSTRUMENT MAKING

<b>MARKOV A. P.</b> Features of light guide turbidity .....	93
<b>NOVIKOV V. A., SKRYABINA G. I., SHILOV A. V., KUSHNER A. V.</b> Calculation of the reflection coefficient of the magnetic field visualizing film in the zone of defects.....	104
<b>SHILOVA I. V.</b> Multi-element fiber-optic excess pressure sensor .....	116

### PHYSICS

<b>YUREVICH V. A., SCAPTSOV A. S., YUREVICH Y. V.</b> Resonant transformation of short optical pulses during their propagation through the medium formed by mono- dispersive nanoparticles.....	125
--	-----

### ECONOMICS. ECONOMIC SCIENCES

<b>IVANOVSKAYA I. V., DRAGUN N. P.</b> The disclosure of the price collusion of manufacturers on commodity mar- kets of Belarus: theory and practice .....	132
<b>SHMARKOV M. S., SHMARKOVA L. I.</b> The analysis of evolution of seasonal fluctuations of characteristics of tourism companies activity and forecasting of their development .....	144

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.791.763.1

*В. М. Белоконь, А. О. Коротеев*

### О СВАРКЕ В ДВУХ СТРУЯХ ЗАЩИТНОГО ГАЗА

UDC 621.791.763.1

*V. M. Belokon, A. O. Koroteyev*

### ON WELDING IN TWO SHIELDING GAS FLOWS

#### **Аннотация**

Сварка без коротких замыканий с двойной газовой защитой зоны сварки имеет преимущество перед сваркой в среде углекислого газа. Дуга защищается аргоном, а сварочная ванна углекислым газом, подаваемыми с помощью двух концентрично расположенных сопел. Проведён расчёт радиуса сварочной дуги в её наибольшем сечении. На основании этого расчёта предлагается выбирать диаметр внутреннего сопла для подачи аргона. Для наиболее распространенных режимов сварки рекомендуется применять внутреннее сопло диаметром 9 мм. Расчёт длины сварочной ванны позволяет определить диаметр сопла для подачи углекислого газа. Применение повышенных режимов сварки требует повышения диаметра сопел, рассчитать которые можно по аналогичной методике.

#### **Ключевые слова:**

зона сварки, дуга, сопло, сварочная ванна, защитные газы, активные газы, инертные газы, смеси газов.

#### **Abstract**

The paper shows the advantages of arc welding without short circuits with a dual gas shield to protect the welding zone. The electric arc is protected by argon, and the weld pool is protected by carbon dioxide, fed through two concentrically arranged nozzles. The radius of the arc in its largest section was calculated. It is suggested to select the diameter of the inner nozzle for argon feeding based on this calculation. The inner nozzle diameter of 9 mm is recommended for the most common welding conditions. The calculation of the weld pool length allows determining the diameter of the nozzle for feeding carbon dioxide. Higher currents require increased nozzle diameters, which can be calculated by using this technique.

#### **Key words:**

welding zone, arc, nozzle, weld pool, shielding gases, active gases, inert gases, mixture of gases.

Производство сварных конструкций в большинстве случаев связано с применением сварки плавящимся электродом в защитных газах. В качестве защитных газов применяются активные газы (углекислый газ, кислород, водород, азот), инертные газы (аргон, гелий), двойные смеси ( $Ar + CO_2$ ,  $Ar + O_2$ ,  $CO_2 + O_2$  и др.) и тройные смеси.

В настоящее время наиболее рас-

пространенным способом с точки зрения защиты сварочной дуги при механизированной сварке является сварка в среде углекислого газа. Однако при таком способе защиты сварочной ванны и зоны горения дуги имеется ряд недостатков. Наиболее существенными из них являются потери электродного металла на разбрызгивание и испарение (в среднем около 10 % от расплавленного

электродного металла). Возникает необходимость зачистки околошовной зоны от налипших брызг (трудозатраты могут составлять до 9 мин на 1 м шва). Сварные швы часто имеют неудовлетворительный внешний вид и чешуйчатую форму поверхности.

Частично устранить недостатки позволяет введение в углекислый газ кислорода в оптимальном количестве (до 20 %). При этом улучшается внешний вид шва, уменьшается разбрызгивание электродного металла и, как следствие, снижаются трудозатраты на зачистку от брызг околошовной зоны. Это происходит главным образом из-за влияния кислорода на поверхностное натяжение жидкого металла и окисления поверхности капель. В целом, потери электродного металла существенно не изменяются, а на угар – увеличиваются.

Сварка в среде гелия позволяет получить высококачественные сварные соединения. Однако вследствие его малой плотности повышение расхода защитного газа с целью обеспечения надёжной защиты зоны горения дуги и сварочной ванны при сварке, а также высокая стоимость гелия приводят к значительным затратам. В отличие от сварки в среде гелия, сварка в среде аргона более экономична. По сравнению с гелием аргона расходуется на 30...40 % меньше. При таком способе защиты потери электродного металла при сварке без коротких замыканий связаны главным образом с испарением и составляют 1...3 %.

Однако аргон, как и гелий, является весьма дорогостоящим газом. Частично снизить затраты на защитный газ в этом случае возможно путём применения двойных и тройных газовых смесей. Это снижает затраты на защитный газ, но увеличивает потери на разбрызгивание до 3...5 %.

Перспективной является сварка, при которой столб дуги защищается аргоном, а сварочная ванна – углекислым газом, подающимися раздельно по двум концен-

трично расположенным соплам. При этом необходимо решить ряд вопросов, связанных с определением оптимального соотношения аргона и углекислого газа, а также разработать методику расчёта диаметров сопел сварочной горелки.

При сварке плавящимся электродом в качестве источника энергии используется электрическая дуга, состоящая из трёх основных областей: катодной, анодной и столба дуги. Катодная и анодная области имеют очень малые размеры как по протяжённости, так и по диаметру, в отличие от столба дуги (рис. 1). Его длина, как правило, определяется режимом сварки. Сложнее определить размеры поперечного сечения столба дуги. Точных расчётов поперечных сечений в источниках литературы не имеется.

При сварке в аргоне анодное пятно может занимать всю торцовую поверхность электрода и переходить на его боковую поверхность. При этом перенос электродного металла осуществляется в виде мелких капель или в виде струи, что благоприятно влияет на процесс переноса электродного металла, снижая разбрызгивание и набрызгивание.

При сварке в двух концентричных газовых потоках обеспечить процесс сварки, связанный с положительным эффектом горения дуги в аргоне, возможно при защите аргоном катодной и анодной областей, а также столба дуги.

При ряде разумных допущений, учитывая, что сварочная дуга горит в парах железа (при сварке сталей), разумной идеализацией дуги, достаточно близкой к практике и не нарушающей основных физических представлений, является приведение столба дуги к однородному каналу, в пределах которого температура и ток распределены равномерно. Принятая схема известна как «каналовая» модель столба дуги [1, 2].

Согласно этой модели, средняя плотность тока в дуге распределяется по сечению с эффективным радиусом  $r_{эф}$  (рис. 2).

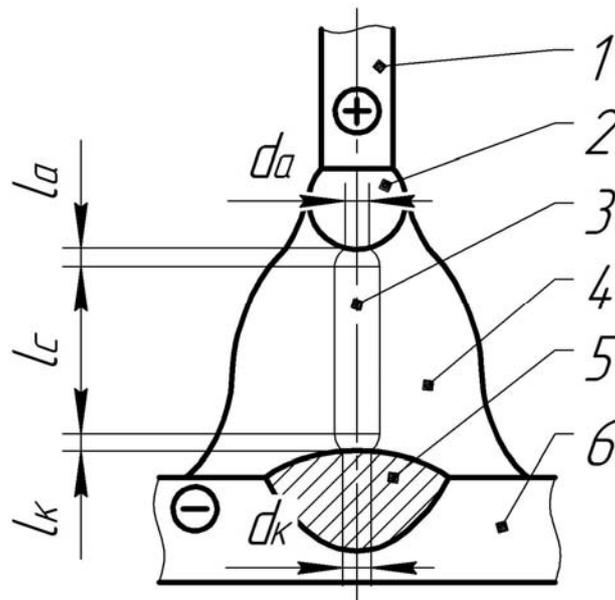


Рис. 1. Схема дуги при сварке: 1 – плавящийся электрод; 2 – капля жидкого металла; 3 – столб дуги; 4 – ореол; 5 – жидкая ванна; 6 – свариваемое изделие;  $L_c$  – длина столба дуги;  $L_k$ ,  $L_a$  – длина катодной и анодной областей;  $d_k$ ,  $d_a$  – диаметры катодного и анодного пятен

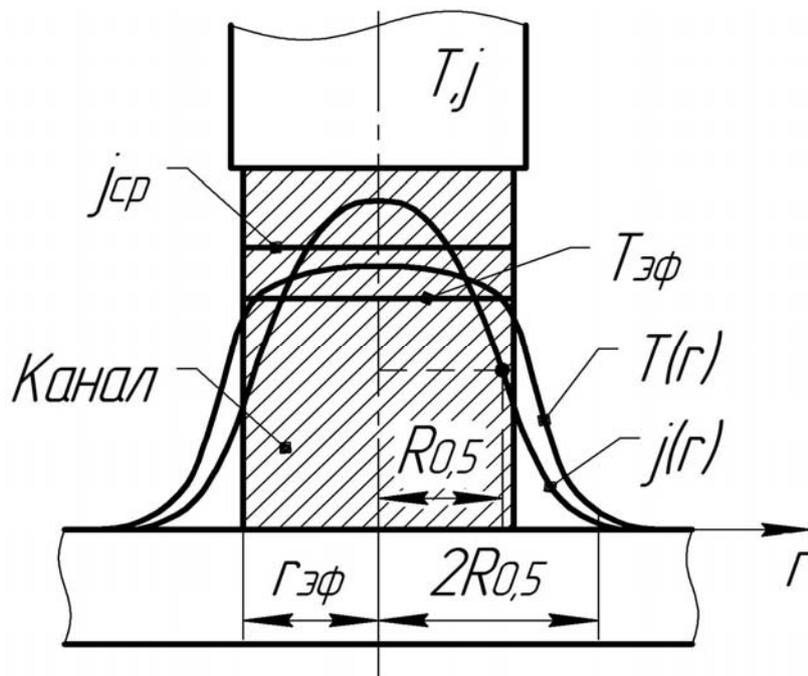


Рис. 2. Каналовая модель столба дуги:  $r_{эф}$  – эффективный радиус дуги;  $j_{cp}$  – средняя плотность тока дуги;  $T_{эф}$  – средняя эффективная температура дуги;  $R_{0,5}$  – условный радиус столба дуги

Средняя плотность тока, согласно «каналовой» модели, определяется по формуле

$$j_{cp} = 5,5 \cdot 10^{-8} \frac{U_i^{12} \cdot a^{\frac{2}{3}}}{g_e^{\frac{3}{2}} \cdot I_{\partial}^{\frac{1}{3}}}, \quad (1)$$

где  $U_i$  – потенциал ионизации паров металла,  $U_i = 7,83$  В;  $a$  – отношение статических весов ионов и атомов паров железа,  $a = \sqrt{\frac{12}{5}}$ ;  $g_e$  – сечение столкновения атомов с электронами, при сварке

в аргоне  $g_e = 35 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$ ;  $I_{\partial}$  – ток сварочной дуги, А.

Эффективный радиус столба дуги

$$r_{\phi} = \sqrt{\frac{I_{\partial}}{\pi \cdot j_{cp}}} = \frac{2,4 \cdot 10^3 \cdot I_{\partial}^{\frac{2}{3}} \cdot g_e^{\frac{1}{3}}}{U^{12} \cdot a^{\frac{1}{3}}}. \quad (2)$$

Результаты расчёта эффективного радиуса столба дуги в зависимости от силы сварочного тока приведены в табл. 1.

Табл. 1. Эффективный радиус столба дуги

Сварочный ток, А	200	250	300	350	400	450
Эффективный радиус столба дуги, мм	1,92	2,23	2,51	2,78	3,05	3,29

Весь ток дуги, согласно «каналовой» модели, протекает по сечению радиусом  $R$ , определяемому по формуле

$$R = 2R_{0,5}, \quad (3)$$

где  $R_{0,5}$  – условный радиус дуги.

Условный радиус дуги  $R_{0,5}$  связан с эффективным радиусом соотношением

$$r_{\phi} = 1,4R_{0,5}. \quad (4)$$

Решая совместно выражения (2)...(4), получим

$$R = \frac{3,4 \cdot 10^3 \cdot I_{\partial}^{\frac{2}{3}} \cdot g_e^{\frac{1}{3}}}{U^{12} \cdot a^{\frac{1}{3}}}. \quad (5)$$

Результаты расчёта действительного радиуса дуги в зависимости от силы сварочного тока приведены в табл. 2.

Табл. 2. Действительный радиус столба дуги

Сварочный ток, А	200	250	300	350	400	450
Действительный радиус столба дуги, мм	2,72	3,15	3,56	3,95	4,32	4,67

Результаты расчёта показали, что для того чтобы полностью защитить сварочную дугу аргонотом от окружающей среды на нормальных режимах сварки (до 450 А), достаточно иметь внутреннее сопло, подающее струю аргона диаметром около 9 мм. Для режи-

мов сварки  $\geq 450$  А необходимо увеличить диаметр сопла.

Очевидно, что защиты только сварочной дуги для получения качественного сварного шва недостаточно. Необходимо обеспечить защиту поверхности расплавленного металла сварочной ван-

ны от взаимодействия с атмосферой. Сварочная ванна состоит из характер-

ных зон (рис. 3).

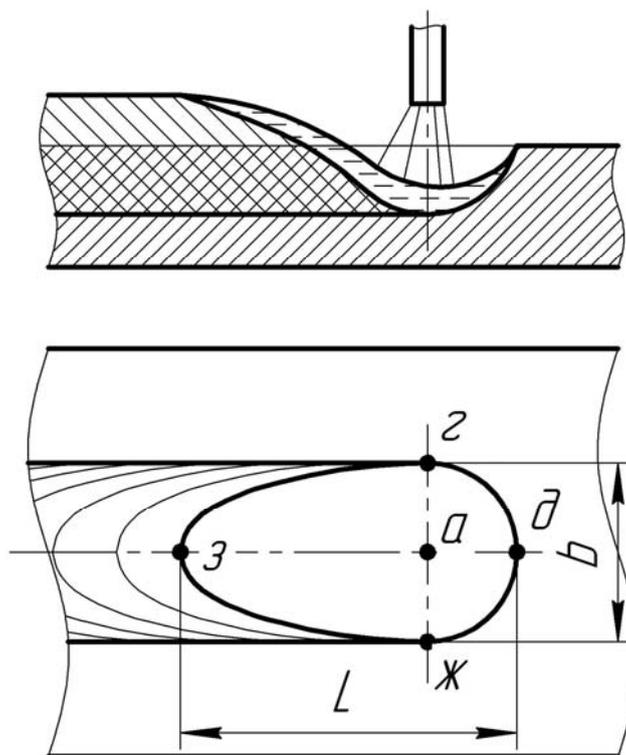


Рис. 3. Сварочная ванна:  $L$  – длина сварочной ванны;  $b$  – ширина сварочной ванны;  $z, \delta, ж$  – головная часть ванны;  $z, ж$  – хвостовая часть ванны;  $a$  – центр воздействия дуги

Центральная зона включает головную часть сварочной ванны и часть хвостовой. Поперечное сечение активной зоны совпадает с шириной шва [3]. В действительности она несколько меньше.

Ширину шва можно определить по следующей формуле:

$$b = 2 \sqrt{\frac{2q}{\pi c_{\gamma} v_{св} T}}, \quad (6)$$

где  $q$  – эффективная тепловая мощность дуги,  $q = 0,24 I_{\delta} U_{\delta} \eta$ ;  $U_{\delta}$  – напряжение на дуге, В;  $\eta$  – КПД,  $\eta = 0,8$ ;  $c_{\gamma}$  – объёмная теплоёмкость,  $c_{\gamma} = 4,8$  Дж/(см<sup>3</sup> · К);  $v_{св}$  – скорость

сварки, м/ч;  $T$  – температура, °С.

Формула (6) также может быть применена для расчёта поперечного размера активной зоны сварочной ванны. Для этого в формуле следует принять температуру, равную температуре испарения металла. Результаты таких расчётов показывают, что размер активной зоны практически совпадает с действительным размером сечения столба дуги, рассчитанным по формуле (5), через которое проходит весь ток дуги. Отклонение составляет не более 5...10 %. Результаты расчёта ширины шва и поперечного размера активной зоны сварочной ванны представлены в табл. 3 и 4.

Табл. 3. Ширина шва и активной зоны при сварке проволокой диаметром 1,2 мм

Сварочный ток, А	250	300	350	400
Напряжение на дуге, В	27	30	35	38
Ширина шва, мм	7,33	8,47	9,88	11,01
Ширина активной зоны (см. формулу (6)), мм	5,62	6,49	7,57	8,43
Размер активной зоны $2R$ (см. формулу (5)), мм	6,3	7,12	7,89	8,63

Табл. 4. Ширина шва и активной зоны при сварке проволокой диаметром 1,6 мм

Сварочный ток, А	250	300	350	400	450
Напряжение на дуге, В	28	31	33	35	37
Ширина шва, мм	7,46	8,6	9,6	10,55	11,51
Ширина активной зоны (см. формулу (6)), мм	5,72	6,59	7,35	8,1	8,83
Размер активной зоны $2R$ (см. формулу (5)), мм	6,3	7,12	7,89	8,63	9,33

Длина сварочной ванны определяется по формуле [5]

$$L = \frac{q}{2\pi\lambda T}, \quad (7)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности стали,  $\lambda = 47$  Вт/(м·К).

Радиус наружного сопла для подачи углекислого газа с учётом защиты

поверхности сварочной ванны от взаимодействия с атмосферой может быть рассчитан по формуле

$$R_n = L - b/2. \quad (8)$$

Результаты расчётов сведены в табл. 5 и 6.

Табл. 5. Результаты расчётов длины сварочной ванны и радиуса наружного сопла при сварке проволокой диаметром 1,2 мм

Сварочный ток, А	250	300	350	400
Напряжение на дуге, В	27	30	35	38
Длина сварочной ванны, мм	13,07	17,43	23,73	29,44
Радиус наружного сопла (см. формулу (8)), мм	9,4	13,2	18,79	23,94

Табл. 6. Результаты расчётов длины сварочной ванны и радиуса наружного сопла при сварке проволокой диаметром 1,6 мм

Сварочный ток, А	250	300	350	400	450
Напряжение на дуге, В	28	31	33	35	37
Длина сварочной ванны, мм	13,56	18,01	22,37	27,12	32,25
Радиус наружного сопла (см. формулу (8)), мм	9,82	13,71	17,58	21,84	26,5

Схема защиты сварочной ванны представлена на рис. 4.

Расчёты по формулам показывают, что для дуг со сварочным током до

350 А и проволоками диаметрами 1,2 и 1,6 мм достаточно применить сопло радиусом 20 мм.

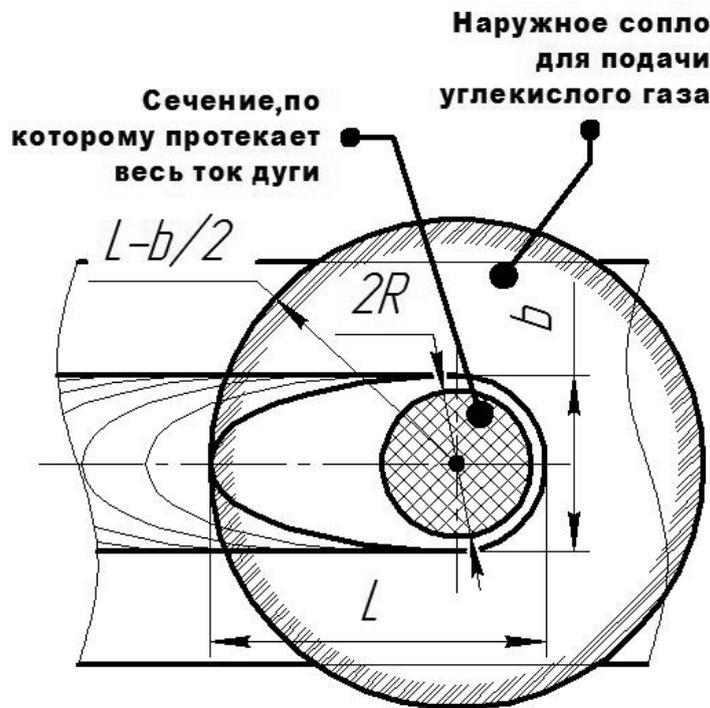


Рис. 4. Схема защиты сварочной ванны

В случае сварки на больших токах радиус сопла для наружной струи газа должен быть больше.

Зависимости радиусов наружного и внутреннего сопел от силы сварочного тока представлены на рис. 5.

С целью экономии защитного газа при повышенных токах наружное сопло может быть выполнено в виде эллипса, поперечный размер которого равен ширине ванны, а продольный – длине.

Анализ и расчёты показывают, что оптимальное соотношение защитных газов должно составлять 1:4, т. е. 20 % аргона и 80 %  $\text{CO}_2$  от необходимого общего расхода.

Элементарные технико-экономические расчёты показывают, что сварка в двух отдельных струях газа может быть применена не только для специ-

альных материалов, но и для сварки низкоуглеродистых сталей. Только экономия электродного металла при этом составит 20...95 кг на 1 т проволоки.

### Выводы

1. Для реализации преимуществ процесса сварки в аргоне без коротких замыканий в случае использования смесей аргона с углекислым газом необходимо применять отдельную подачу защитных газов в виде двух концентричных струй. Внутренняя струя аргона защищает зону горения дуги, а внешняя кольцевая струя углекислого газа – поверхность сварочной ванны.

2. Сварка в двух струях защитного газа имеет ряд преимуществ перед сваркой в  $\text{CO}_2$  в части потерь электродного металла, вспомогательных работ после

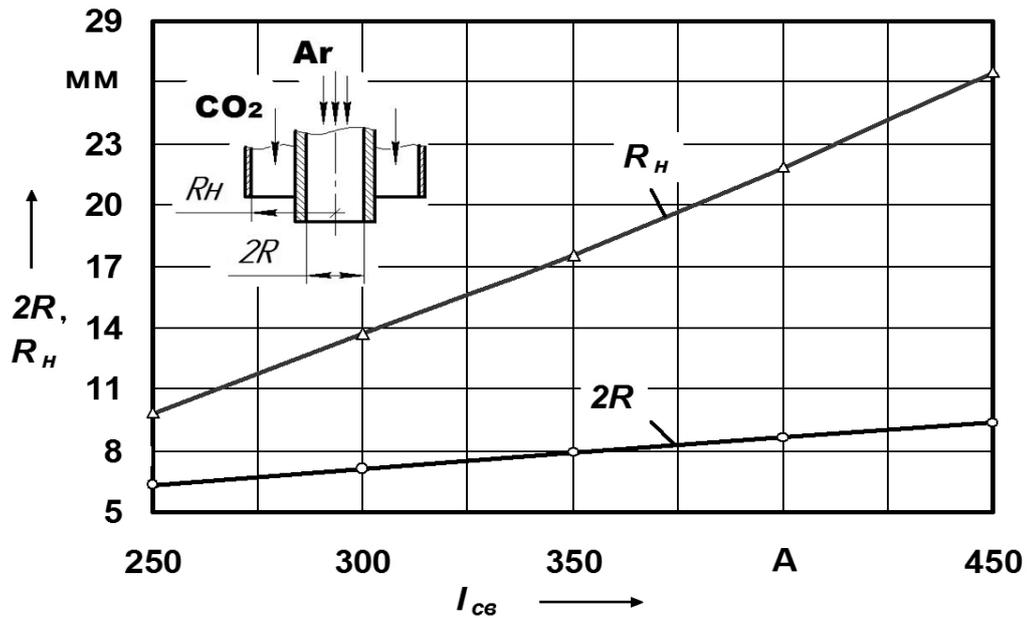
сварки, качества сварных швов. Экономия только электродного металла значительно превосходит дополнительные затраты на защитный газ.

3. Определены наибольший диаметр столба дуги и диаметр сопла для подачи аргона при комбинированной

защите.

4. Рассчитана длина сварочной ванны для наиболее распространенных режимов сварки и на этой основе определены размеры внутреннего и внешнего сопел для подачи защитных газов.

а)



б)

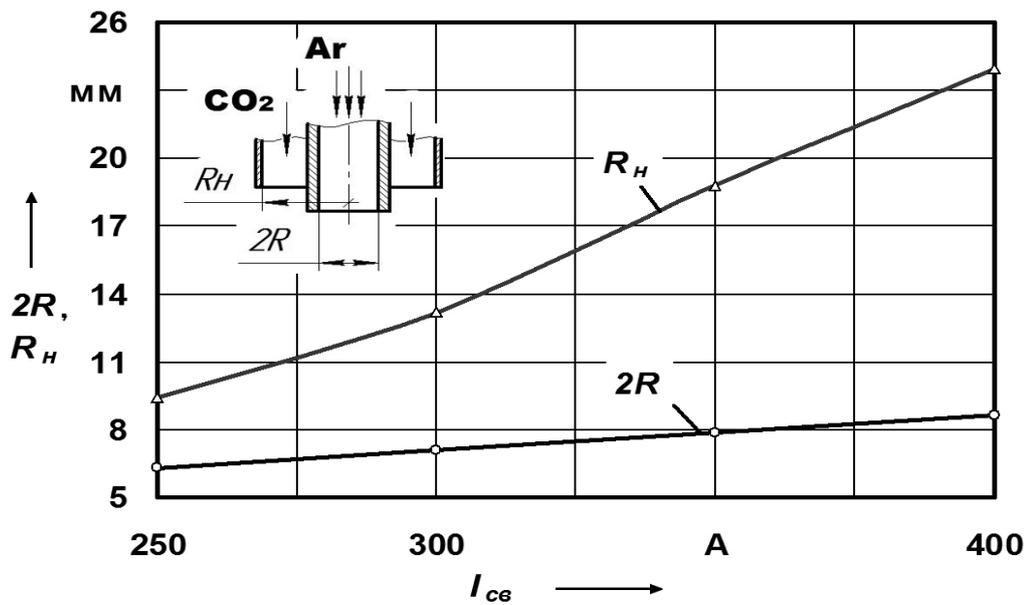


Рис. 5. Зависимость размеров сопел горелки от сварочного тока: а – сварка проволокой 1,2 мм; б – сварка проволокой 1,6 мм

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лесков, Г. И.** Электрическая сварочная дуга / Г. И. Лесков. – М. : Машиностроение, 1971. – 335 с. : ил.
2. **Павлюк, С. К.** Об устойчивости процесса зажигания дуги при сварке плавящимся электродом / С. К. Павлюк, В. М. Белоконь // Сварочное производство. – 1974. – № 4. – С. 51–53.
3. **Ерохин, А. А.** Основы сварки плавлением / А. А. Ерохин. – М. : Машиностроение, 1973. – 448 с. : ил.
4. **Акулов, А. И.** Технология и оборудование сварки плавлением / А. И. Акулов, Г. А. Бельчук, В. П. Демянцевич. – М. : Машиностроение, 1977. – 432 с. : ил.
5. **Петров, Г. А.** Теория сварочных процессов / Г. А. Петров, А. С. Тумарев. – М. : Высш. шк., 1967. – 508 с. : ил.

*Статья сдана в редакцию 23 июля 2012 года*

**Владимир Михайлович Белоконь**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-297-40-80-24.

**Артур Олегович Коротеев**, инженер, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-298-46-49-70.

**Vladimir Mikhailovich Belokon**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Tel.: +375-297-40-80-24.

**Artur Olegovich Koroteyev**, engineer, Belarusian-Russian University. Tel.: +375-298-46-49-70.

---

---

УДК 621.791.763.2

*В. П. Березиенко, Т. И. Бендик*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА КОНТАКТНОЙ РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКИ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ

---

---

UDC 621.791.763.2

*V. P. Berezienko, T. I. Bendik*

## DETERMINATION OF THE PROJECTION WELDING PROCESS PARAMETERS ON THE BASIS OF MATHEMATICAL MODELLING

---

---

### **Аннотация**

Разработана математическая модель термодформационного процесса контактной Т-образной рельефной сварки, с помощью которой проведена оценка влияния основных параметров режима сварки и геометрических характеристик применяемых рельефов на формирование сварных соединений.

Предложены рекомендации по выбору основных параметров режима Т-образной рельефной сварки низкоуглеродистых сталей: размеров рельефа, величины сварочного тока и времени его протекания.

### **Ключевые слова:**

метод конечных элементов, рельефная сварка, параметры режима, размеры рельефа, направленная пластическая деформация.

### **Abstract**

The mathematical model of the thermal deformation process of T-shaped resistance projection welding has been developed, by means of which it has been determined how basic welding parameters and geometrical characteristics of used projections influence the welded joints formation process.

The recommendations for choosing the key parameters of T-shaped projection welding of low-carbon steels are presented, such as projection sizes, welding current magnitude and time of its flow.

### **Key words:**

finite element method, projection welding, welding parameters, projection size, directed plastic deformation.

---

Основные трудности с широким применением в промышленности такого высокопроизводительного способа, как контактная рельефная сварка, связаны с большим разнообразием конструктивных форм свариваемых деталей и отсутствием обобщенных рекомендаций по выбору основных параметров режима сварки и геометрических характеристик применяемых рельефов.

Изменяя форму и размеры рельефа, можно воздействовать на характер нагрева и деформирования металла в зоне сварки, а следовательно, и на геометрические и прочностные показатели

соединений.

Характерной особенностью рельефной сварки Т-образных соединений бобышек с листовой деталью (рис. 1) является отсутствие зоны взаимного расплавления.

Для получения надежных соединений при сварке в твердой фазе необходима совместная пластическая деформация металла свариваемых деталей, приводящая к разрушению оксидных пленок, активации контактных поверхностей, образованию между ними физического контакта и объемного взаимодействия [1, 2]. Если условия

процесса исключают возможность пластической деформации металла в нужном объеме, то прочность соединений в твердой фазе оказывается низкой и нестабильной.

Анализ производственной практики применения контактной рельефной

сварки показывает, что большинство дефектов сварных соединений вызваны нерациональным выбором параметров режима сварки, а также отсутствием нормативной базы, регламентирующей требования к форме и размерам применяемых рельефов (табл. 1).

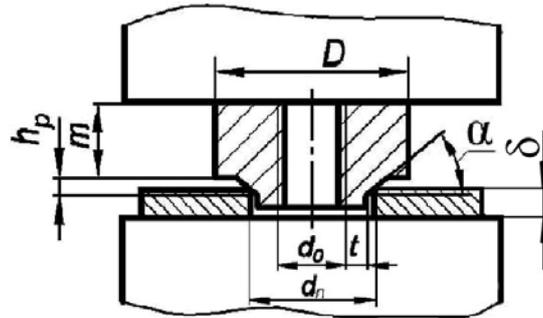
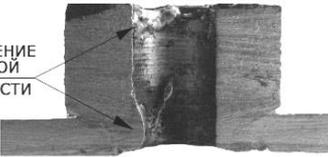
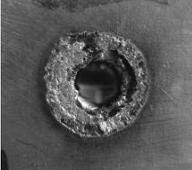
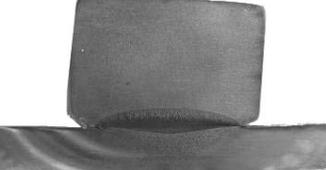


Рис. 1. Схема процесса рельефной сварки «острой гранью»: D – диаметр бобышки;  $h_p$  – высота рельефа;  $\alpha$  – угол рельефа;  $\delta$  – толщина листа; m – высота бобышки;  $d_0$  – диаметр внутренней резьбы;  $d_n$  – диаметр отверстия в листовой детали; t – толщина стенки

Табл. 1. Нарушение точности геометрических параметров при возникновении дефектов в Т-образных сварных соединениях

Вид дефекта и причина его возникновения	Макрошлифы Т-образных сварных соединений	
Выплески на лицевых и резьбовых поверхностях изделия из-за нерационального выбора параметров режима сварки и формы рельефа	 <p data-bbox="587 1258 721 1326">ПОВРЕЖДЕНИЕ РЕЗЬБОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ</p>	
Повреждение лицевых поверхностей изделия из-за грубой механической обработки и нерациональной формы рельефа		
Непровар из-за отклонения от параллельности поверхностей свариваемых деталей		
Непровар из-за нерационального выбора параметров режима сварки	 <p data-bbox="1123 1912 1187 1935">НЕПРОВАР</p>	

Целью данного исследования является теоретическое обоснование параметров режима контактной рельефной сварки Т-образных соединений бобышек с листом, основанное на изучении кинетики формирования сварного соединения при помощи математической модели процесса.

Математическое моделирование – перспективное направление в оптимизации формы и размеров рельефов, параметров режима для такого быстропротекающего процесса, как контактная рельефная сварка. Проведенные в данной области исследования пока не позволили полностью решить проблемы, связанные с необходимостью анализа совмещенной электротермодеформационной задачи с учетом быстропротекающих пластических деформаций, которым подвергается зона сварного соединения в процессе осадки рельефа Т-образных соединений [3, 4].

Для теоретического обоснования параметров режима сварки, формы и геометрических характеристик рельефов разработана математическая модель термоупругопластического деформирования металла зоны соединения при сварке, учитывающая особенности нагрева при прохождении электрического тока, характер неизотермического упругопластического деформирования, зависимости теплофизических и механических свойств материалов от температуры, скрытую теплоту плавления.

Модель отличается использованием конечно-элементного пошагово-совмещенного анализа электрических, температурных и деформационных полей с учетом изменения электрических и тепловых сопротивлений контактов, а также возможностью обеспечения сходимости вычислительного процесса при значительных пластических деформациях металла рельефа [5–7]. Результаты проведенного математического моделирования, а также ряда металлографиче-

ских исследований показали, что процесс образования сварного соединения при сварке Т-образных соединений можно охарактеризовать следующими четырьмя этапами:

1) совместной деформации рельефа и листовой детали до включения сварочного тока;

2) интенсивной высокоскоростной деформации листовой детали в начальный период протекания сварочного тока;

3) дальнейшей низкоскоростной деформации листовой детали в процессе протекания сварочного тока;

4) охлаждения металла зоны сварки и окончательного формирования сварного соединения под действием усилия сжатия электродов.

Первый этап формирования сварного соединения в твердой фазе начинается с предварительного сжатия деталей и создания между ними механического контакта. В качестве параметра, описывающего контактное взаимодействие бобышки и листа, использовался размер контактной площадки  $l_k$  (рис. 2). Как показали проведенные вычислительные эксперименты, размер контактной площадки  $l_k$  в момент включения сварочного тока составляет 0,3...1,2 мм в зависимости от угла рельефа  $\alpha$  и усилия сжатия электродов.

Наличие контакта между бобышкой и листом в момент включения сварочного тока обеспечивает высокое начальное контактное электрическое сопротивление и высокую плотность тока, что приводит к интенсивному нарастанию температуры в зоне контакта деталь–деталь (до  $10^4$  К/С). Предварительная деформация рельефа способствует стабилизации электрического сопротивления сварочного контакта в зоне деталь–деталь в момент включения сварочного тока и является необходимым условием получения качественных сварных соединений.

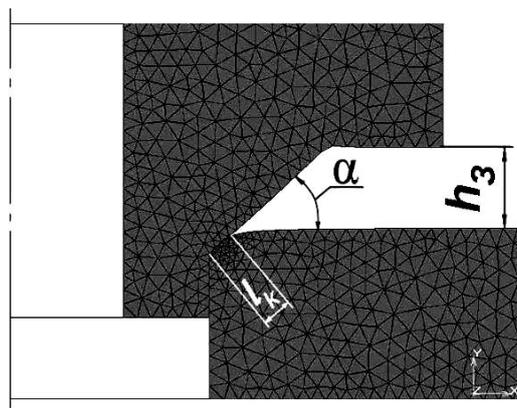


Рис. 2. Образование начального контакта свариваемых деталей

Второй этап образования сварного соединения начинается с момента включения сварочного тока. В процессе сварки активация контактных поверхностей происходит посредством нагрева (термическая активация) и пластической деформации (механическая активация) под действием усилия сжатия электродов.

При прохождении первых импульсов сварочного тока металл зоны сварного соединения нагревается до температуры разупрочнения  $T > 800 \text{ K}$ , что сопровождается ростом контактной площадки  $l_k$ . Интенсивная пластическая деформация металла кромки листовой детали и рельефа обеспечивает разрушение и удаление оксидных пленок из зоны сварки, ускоряет активацию контактных поверхностей.

Отличительной особенностью процесса рельефной сварки Т-образных соединений является преимущественная деформация кромки листовой детали, металл рельефа бобышки практически не претерпевает значительных деформаций в радиальном направлении. Это позволяет успешно реализовывать данный способ сварки для изделий с внутренней или наружной резьбой.

Стабильность процесса сварки на данном этапе зависит от соблюдения следующих условий:

- наличие плавного увеличения

сварочного тока, компенсирующего малую площадь контакта деталь–деталь в момент включения сварочного тока;

- нарастание величины сварочного тока должно соответствовать изменению размера контактной площадки  $l_k$  при деформации рельефа.

На третьем этапе формирования сварного соединения значительно снижается скорость перемещения подвижного электрода, что объясняется интенсивным ростом размера контактной площадки  $l_k$  и некоторым снижением плотности тока. При нормальном ходе процесса сварки на этом этапе наблюдается процесс разогрева и значительной пластической деформации металла листовой детали и бобышки. В процессе протекания сварочного тока размеры зоны сварки, а значит, и прочность сварного соединения растут, и к моменту выключения сварочного тока металл разогревается до температур порядка  $1450 \text{ K}$ .

В литературных источниках [8–11] приводятся различные значения угла рельефа ( $\alpha = 30, 45 \text{ и } 60^\circ$ ), однако обобщенных рекомендаций по выбору данного параметра нет. Проведенный на основе математической модели анализ кинетики образования сварного соединения показал, что величина угла рельефа  $\alpha$  оказывает существенное влияние на температурное поле и изменение

размера контакта деталь–деталь в процессе сварки.

При углах рельефа менее  $30^\circ$  значительно снижается интенсивность тепловыделения в зоне контакта деталь–деталь и для достижения температуры образования сварного соединения в твердой фазе ( $T > 1450 \text{ K}$ ), а также полной осадки рельефа на всю его высоту требуется увеличивать величину сварочного тока либо длительность его протекания.

При углах рельефа более  $60^\circ$  достижение высоких температур в зоне сварного соединения происходит при малых значениях контактной площадки. Это приводит к росту вероятности появления выплеска, что резко снижает прочностные показатели и параметры точности сварного соединения.

Установлено, что при Т-образной сварке с целью предотвращения возникновения деформаций внутренней стенки бобышки (резьбовое отверстие не должно повреждаться после выполнения сварочной операции) угол рельефа следует выбирать в пределах  $40 \dots 45^\circ$ .

Для обеспечения требуемых параметров точности сварного соединения толщина стенки бобышки должна быть не менее  $t \geq 0,8 + 0,2d_0$ , а высота рельефа находится в следующей функциональной зависимости от диаметра резьбы  $h_p = 0,17 \cdot d_0^{0,95}$ .

Четвертый этап образования сварного соединения начинается с момента выключения сварочного тока. Согласно [11] на данном этапе развивается объемное взаимодействие в зоне сварки. Оно начинается в активных центрах (дислокациях, вакансиях и других дефектах структуры) и протекает путем роста и слияния очагов взаимодействия по всей контактной поверхности. Затем происходит релаксация напряжений, образование промежуточных фаз, рекристаллизация и т. д.

Проведенные исследования структур сварных соединений при сварке «острой гранью» подтверждают, что

формирование сварного соединения происходит без наличия расплавленной зоны. Характерно, что при сварке в твердой фазе более благоприятными являются такие условия протекания процесса, при которых достигается максимальная степень пластического деформирования металла зоны сварного соединения. Как показал проведенный анализ кинетики процесса сварки, такие условия могут быть обеспечены выбором формы и размеров рельефа, а также сочетанием соответствующих параметров режима сварки [7].

Анализ осциллограмм скорости перемещения электрода при сварке образцов показал, что наблюдается заметное снижение скорости перемещения электрода, обусловленное сложными условиями деформирования металла рельефа и его вытеснением в радиальном направлении. Для интенсификации процесса пластического деформирования металла предложена новая форма рельефа (пат. ВУ 5654 U *Рельеф для Т-образной рельефной сварки*), при которой:

- обеспечивается стабильность прочностных показателей из-за увеличения фактической площади сварки путем создания направленной пластической деформации металла;

- обеспечивается точность изделия (путем уменьшения зазора между бобышкой и листом, т. к. пластифицированный металл рельефа заполняет пространство предварительно сформированной канавкой тороидальной формы радиусом  $R$  (рис. 3, а));

- плоская площадка среза длиной  $l = R$  (см. рис. 3, а) обеспечивает точную центровку верхней детали в отверстии пластины и гарантирует наличие первоначального контакта деталь–деталь, стабилизируя контактное сопротивление в зоне сварки;

- наличие фаски размером  $b \times 45^\circ$  позволяет исключить повреждение резьбового отверстия при контакте торцевой поверхности свариваемых деталей с электродом.

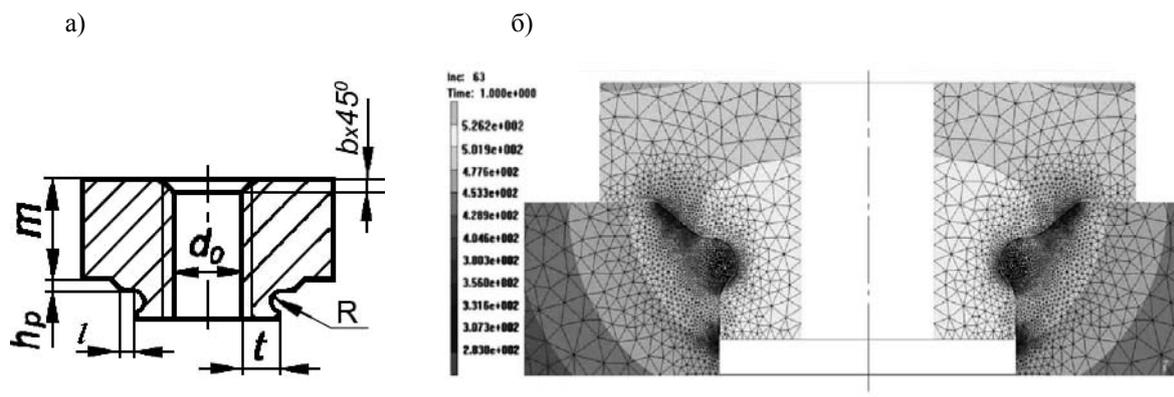


Рис. 3. Рельеф для сварки «острой гранью»: а – конструктивные размеры; б – характер пластического деформирования металла зоны сварного соединения (данные математического моделирования)

Данная форма рельефа обеспечивает направленную пластическую деформацию металла, требуемую точность геометрических характеристик при сохранении высоких и стабильных прочностных показателей сварных соединений из-за увеличения площади сварки и уменьшения зазора между деталями. При использовании предлагаемой формы рельефа часть пластифицированного металла заполняет полость предварительно сформированной выточки, процесс осадки рельефа происходит без значительных колебаний скорости перемещения электрода (см. рис. 3, б).

Для обеспечения качественного процесса сварки необходимо осуществлять модуляцию сварочного тока, что позволяет существенно снизить вероятность возникновения начальных выплесков. Выбор величины сварочного тока осуществлялся исходя из расчетного значения площади сварки и допустимой плотности тока.

Установлено, что для определения величины сварочного тока в зависимости от диаметра отверстия бобышки следует использовать эмпирическую формулу (рис. 4)

$$I_{CB} = 650 \cdot d_0^{1,45} \cdot \delta^{0,18}, \quad (1)$$

где  $d_0$  – диаметр резьбового отверстия бобышки, мм;  $\delta$  – толщина листа, мм;  $\delta^{0,18}$  – коэффициент для учета толщины листа.

Длительность протекания сварочного тока следует выбирать прямо пропорционально диаметру резьбового отверстия бобышки исходя из зависимости

$$\tau_{CB} = (0,06 + 0,03d_0) \cdot \delta^{0,18}. \quad (2)$$

При реализации технологического процесса сварки использовалась схема с прямым токоподводом к торцу бобышки и циклограмма с постоянным усилием сжатия электродов и модуляцией сварочного тока. На основе проведенных экспериментальных исследований выдвинуты следующие требования к подготовке деталей под сварку:

- поверхности деталей, контактирующие с электродами, должны иметь шероховатость не более  $R_z = 40$ ;
- отклонения угла рельефа от номинальных значений не должны превышать  $\pm 1^\circ$ ;
- несоосность отверстий бобышки и листа не должна превышать 0,1 мм;
- детали не должны иметь заусенцев на поверхностях контактирования с электродами, на поверхности рельефа и на поверхности внешнего отверстия в зоне контакта с пластиной.

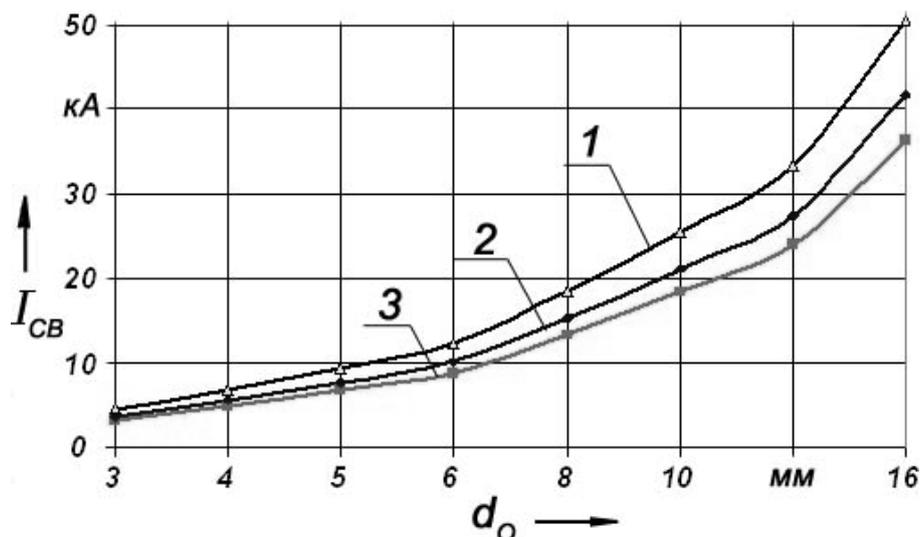


Рис. 4. Зависимость величины сварочного тока от диаметра резьбы бобышки при сварке «острой гранью»: 1 – толщина пластины  $\delta = 3$  мм; 2 –  $\delta = 2$  мм; 3 –  $\delta = 1$  мм

Анализ гистограмм усилия на отрыв сварных соединений с предложенной формой рельефа показал, что размах прочности снизился в 1,5 раза по сравнению с образцами, сваренными при помощи традиционной формы рельефа, а среднее значение прочности соединений увеличилось на 18...20 %.

### Выводы

1. С целью теоретического изучения процесса Т-образной рельефной сварки разработана математическая модель, которая осуществляет совместный температурный, электрический и деформационный расчет, позволяет задавать граничные условия в контактах электрод–деталь и деталь–деталь, учитывает нелинейность электротеплофизических свойств материала деталей и электродов, изменение плотности тока и размеры контактной поверхности, а также отличается возможностью обеспечения сходимости вычислительного процесса при значительных пластических деформациях металла рельефа.

2. На основании разработанной математической модели и проведенных металлографических исследований изучена кинетика образования сварного соединения при рельефной сварке Т-образных соединений бобышек с листом. Показано, что отличительной особенностью данного процесса сварки является преимущественная деформация кромки листовой детали, при этом металл рельефа бобышки практически не претерпевает значительных деформаций. В то же время величина угла рельефа оказывает существенное влияние на температурное поле и изменение размера контакта деталь–деталь в процессе сварки.

3. Предложена новая форма рельефа, обеспечивающая направленную пластическую деформацию металла зоны сварного соединения, даны рекомендации по выбору геометрических параметров рельефа, величины сварочного тока, а также длительности его протекания в зависимости от размеров свариваемых деталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гилевич, В. А.** Технология и оборудование рельефной сварки / В. А. Гилевич. – Л. : Машиностроение, 1976. – 152 с. : ил.
2. **Кочергин, К. А.** Контактная сварка / К. А. Кочергин. – Л. : Машиностроение, 1987. – 240 с.
3. **Sun, X.** Modeling of projection welding processes using coupled finite element analyses / X. Sun // Welding Journal. – 2000. – № 79. – С. 244–251.
4. **Sun, X.** Effect of projection height of projection collapse and nugget formation-a finite element study / X. Sun // Welding Journal. – 2000. – № 80. – С. 211–216.
5. **Березиенко, В. П.** Перспективы использования математического моделирования для выбора технологических параметров процесса Т-образной рельефной сварки / В. П. Березиенко, С. М. Фурманов, Т. И. Бендик // Контактная сварка и другие виды сварки давлением. Технологии и оборудование : материалы VI Междунар. науч.-техн. семинара, Санкт-Петербург, 23–25 окт. 2007 г. / Институт сварки России. – СПб. : ВиТ-Принт, 2008. – С. 54–59.
6. **Березиенко, В. П.** Совершенствование технологии контактной точечной и рельефной сварки / В. П. Березиенко, В. А. Попковский, С. Ф. Мельников. – Минск : Выш. шк., 1990. – 120 с.
7. О кинетике образования сварного соединения при Т-образной рельефной сварке «острой гранью» / В. П. Березиенко [и др.] // Сварка и родственные технологии : Респ. межведомственный сб. науч. тр., Минск, 2008. – № 10. – С. 85–90.
8. Оборудование для контактной сварки : справ. пособие / Под ред. В. В. Смирнова. – СПб. : Энергоатомиздат, 2000. – 848 с.
9. **Липа, М.** Контактная рельефная сварка / М. Липа, Я. Голасек. – Киев : Техника, 1971. – 324 с. : ил.
10. Технология и оборудование контактной сварки: учебник для машиностроительных вузов / Под общ. ред. Б. Д. Орлова. – М. : Машиностроение, 1986. – 352 с.
11. Особенности образования соединения при контактной рельефной сварке «острой гранью» / Э. С. Каракозов [и др.] // Сварочное производство. – 1985. – № 1. – С. 10–12.

*Статья сдана в редакцию 1 октября 2012 года*

**Валерий Петрович Березиенко**, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-295-44-11-75.

**Татьяна Ивановна Бендик**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-293-42-76-56.

**Valery Petrovich Berezienko**, DSc (Engineering), Belarusian-Russian University. Tel.: +375-295-44-11-75.

**Tatiana Ivanovna Bendik**, PhD (Engineering), Belarusian-Russian University. Tel.: +375-293-42-76-56.

---

УДК 621.9

*А. В. Казаков, А. А. Жолобов*

---

**ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДОВ НАРУЖНОЙ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ СТУПЕНЧАТЫХ ВАЛОВ НА СТАНКЕ С ЧПУ**

---

UDC 621.9

*A. V. Kazakov, A. A. Zholobov*

---

**OPTIMIZATION OF CUTTING CONDITIONS OF MANUFACTURING STEPS IN EXTERNAL TURNING OF STEPPED SHAFTS ON A CNC MACHINE**

---

**Аннотация**

Рассмотрены вопросы оптимизации режимов резания технологических переходов наружной токарной обработки ступенчатых валов. Использован подход, базирующийся на применении математической модели, описанной с помощью технических ограничений в виде системы неравенств. Предложен способ определения оптимальных режимов резания, основанный на методе линейного математического программирования.

**Ключевые слова:**

токарная обработка, режимы резания, оптимизация, математическая модель, технологический процесс, ступенчатый вал, металлорежущие станки, варианты обработки.

**Abstract**

The optimization of cutting conditions of manufacturing steps of stepped shafts external turning is considered. The approach based on applying the mathematical model described with the help of engineering constraints in the form of the inequality system is used. The technique of determining optimum cutting conditions, which is based on the method of linear mathematical programming, is offered.

**Key words:**

turning, cutting parameters, optimization, mathematical model, technological process, stepped shaft, metal-cutting machine tools, machining options.

---

При проектировании технологических процессов технолог сталкивается с необходимостью расчета режимов резания по всем переходам технологического процесса. Существующие методики расчета [1–3] требуют больших затрат времени и не обеспечивают назначения оптимальных режимов резания, позволяющих вести обработку с наибольшей экономичностью при заданных требованиях к точности и качеству обрабатываемых поверхностей.

В настоящее время известно большое количество различных методов оптимизации режимов резания на ме-

таллорежущих станках [4–9]. Выбор метода зависит от типа оборудования, структуры технологической операции, способа обработки, сведений о его технологических возможностях, имеющихся в распоряжении технолога, количества инструментов в инструментальном магазине, их прочности и других параметров технологической операции. В основу каждого метода положена математическая модель процесса обработки, состоящая из целевой функции и ограничений, отражающих цели оптимизации и закономерности резания металлов. Поэтому в дальнейшем рассматри-

вается схема построения математической модели оптимизации режимов резания технологических переходов при одноинструментальной наружной обработке ступенчатых валов на токарном станке с бесступенчатым регулированием частоты вращения шпинделя и скорости подачи режущего инструмента. Модель имеет следующие ограничения:

- 1) режущие свойства инструмента, определяемые его материалом, геометрией, рациональным периодом стойкости и условиями обработки;
- 2) мощность электродвигателя привода главного движения станка;
- 3) наименьшая и наибольшая допустимая скорость резания;
- 4) наибольшая составляющая силы резания, допускаемая прочностью элементов технологической системы;
- 5) наименьшая и наибольшая подача;
- 6) шероховатость обработанной поверхности;
- 7) наименьшая и наибольшая технологически приемлемая глубина резания.

*Режущие свойства инструмента.* Экономически выгодная скорость резания  $V$ , м/мин, т. е. скорость, соответствующая рациональному (экономическому) периоду стойкости инструмента  $T$ , мин, учитывающая экономику производства и организацию инструментального хозяйства, определяется по формуле [1]

$$V = \frac{C_v \cdot K_v}{T^{m_v} \cdot S^{y_v} \cdot t^{x_v}}, \quad (1)$$

где  $C_v$ ,  $m_v$ ,  $y_v$ ,  $x_v$  – коэффициент и показатели степени в формуле скорости резания при обработке резцами;  $K_v$  – коэффициент, учитывающий влияние свойств обрабатываемого материала и геометрических параметров режущего инструмента на скорость резания;  $T$  – экономически выгодный период стойкости инструмента, мин;  $S$  – продольная подача, мм/об;  $t$  – глубина резания, мм.

С другой стороны, скорость резания, определяемая процессом точения, выражается формулой

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot n_{cm}}{1000}, \quad (2)$$

где  $D$  – диаметр, для которого производится оптимизация режимов резания, мм;  $n_{cm}$  – частота вращения шпинделя станка, мин<sup>-1</sup>.

Приравняв правые части формул (1) и (2), получаем

$$n_{cm} \cdot S^{y_v} \cdot t^{x_v} = \frac{C_v \cdot K_v \cdot 1000}{T^{m_v} \cdot \pi \cdot D}. \quad (3)$$

*Мощность электродвигателя привода главного движения станка*  $N_{эд}$ , кВт, должна обеспечивать эффективную мощность процесса резания  $N$ , поэтому

$$N \leq N_{эд} \cdot \eta, \quad (4)$$

где  $\eta$  – КПД привода станка.

Эффективная мощность процесса резания  $N$ , кВт, определяется по формуле [1]

$$N = \frac{10 \cdot C_{Pz} \cdot t^{x_{Pz}} \cdot S^{y_{Pz}} \cdot V^{n_{Pz}} \cdot K_{Pz} \cdot V}{1020 \cdot 60}, \quad (5)$$

где  $C_{Pz}$ ,  $x_{Pz}$ ,  $y_{Pz}$ ,  $n_{Pz}$  – коэффициент и показатели степени в формуле силы резания  $P_z$  при обработке резцами;  $K_{Pz}$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние свойств обрабатываемого материала и геометрических параметров режущего инструмента на силу резания  $P_z$ .

С учётом (2) и (5) неравенство (4) принимает вид:

$$\begin{aligned} n_{cm}^{(1+n_{Pz})} \cdot S^{y_{Pz}} \cdot t^{x_{Pz}} &\leq \\ &\leq \frac{N_{эд} \cdot \eta \cdot 6120 \cdot 1000^{(1+n_{Pz})}}{C_{Pz} \cdot K_{Pz} \cdot (\pi \cdot D)^{(1+n_{Pz})}}. \end{aligned} \quad (6)$$

*Наименьшая допустимая скорость резания.* Скорость резания не может быть меньше некоторой определенной величины  $V_{\min}$ , т. к. при чрезмерном её занижении ухудшаются условия стружкообразования, на передней поверхности инструмента образуется нарост, усиливается выкрашивание и износ режущей кромки. С другой стороны, частота вращения шпинделя не может быть меньше, чем это предусмотрено кинематикой станка. Неравенство, соответствующее этому ограничению, имеет вид:

$$n_{cm} \geq \max\left(\frac{1000 \cdot V_{\min}}{\pi \cdot D}; n_{cm.min}\right), \quad (7)$$

где  $V_{\min}$  – минимально допустимая скорость резания, м/мин;  $n_{cm.min}$  – минимальная частота вращения шпинделя станка,  $\text{мин}^{-1}$ .

*Наибольшая возможная скорость резания.* Скорость резания не может быть больше некоторой величины, определяемой для каждого инструментального материала, т. к. в результате повышенного износа режущей кромки ухудшается точность обработки. С другой стороны, частота вращения шпинделя не может быть больше, чем это предусмотрено кинематикой станка. Общее неравенство, описывающее это ограничение, имеет вид:

$$n_{cm} \leq \min\left(\frac{1000 \cdot V_{\max}}{\pi \cdot D}; n_{cm.max}\right), \quad (8)$$

где  $V_{\max}$  – скорость резания, допустимая красностойкостью режущей пластины, м/мин;  $n_{cm.max}$  – максимальная частота вращения шпинделя станка,  $\text{мин}^{-1}$ .

*Наибольшая составляющая силы резания, допускаемая прочностью или жесткостью элементов технологической системы.* При обработке составляющие силы резания  $P_x, P_y, P_z$  [1] не должны превышать соответствующих допустимых значений  $[P_x], [P_y], [P_z]$ :

$$\begin{cases} P_x = 10 \cdot C_{P_x} \cdot t^{x_{P_x}} \cdot S^{y_{P_x}} \cdot V^{n_{P_x}} \cdot K_{P_x} \leq [P_x]; \\ P_y = 10 \cdot C_{P_y} \cdot t^{x_{P_y}} \cdot S^{y_{P_y}} \cdot V^{n_{P_y}} \cdot K_{P_y} \leq [P_y]; \\ P_z = 10 \cdot C_{P_z} \cdot t^{x_{P_z}} \cdot S^{y_{P_z}} \cdot V^{n_{P_z}} \cdot K_{P_z} \leq [P_z]. \end{cases} \quad (9)$$

С учётом (2) неравенство (9) принимает вид:

$$\begin{cases} n_{cm}^{n_{P_x}} \cdot S^{y_{P_x}} \cdot t^{x_{P_x}} \leq \\ \leq \frac{\min([P_{x.cm}]; [P_{x.u}]; [P_{x.pn}])}{10^{(1-3 \cdot n_{P_x})} \cdot C_{P_x} \cdot (\pi \cdot X)^{n_{P_x}} \cdot K_{P_x}}; \\ n_{cm}^{n_{P_y}} \cdot S^{y_{P_y}} \cdot t^{x_{P_y}} \leq \\ \leq \frac{\min([P_{y.cm}]; [P_{y.u}]; [P_{y.pn}])}{10^{(1-3 \cdot n_{P_y})} \cdot C_{P_y} \cdot (\pi \cdot X)^{n_{P_y}} \cdot K_{P_y}}; \\ n_{cm}^{n_{P_z}} \cdot S^{y_{P_z}} \cdot t^{x_{P_z}} \leq \\ \leq \frac{\min([P_{z.cm}]; [P_{z.u}]; [P_{z.pn}])}{10^{(1-3 \cdot n_{P_z})} \cdot C_{P_z} \cdot (\pi \cdot X)^{n_{P_z}} \cdot K_{P_z}}, \end{cases} \quad (10)$$

где  $[P_{x.cm}], [P_{y.cm}], [P_{z.cm}], [P_{x.u}], [P_{y.u}], [P_{z.u}], [P_{x.pn}], [P_{y.pn}], [P_{z.pn}]$  – допускаемое приводом подач станка, конструкцией режущего инструмента и режущей пластиной значение соответствующей составляющей силы резания.

*Наименьшая подача.* Технологически допустимая подача  $S$ , мм/об, не может быть меньше некоторой определенной величины  $S_{\min}$ , т. к. при чрезмерном её занижении ухудшаются условия резания. С другой стороны, подача не может быть меньше обеспечиваемой кинематикой станка  $S_{cm.min}$ , мм/об.

Следовательно, должно соблюдаться неравенство

$$S \geq \max(S_{cm.min}; S_{\min}). \quad (11)$$

*Наибольшая подача.* Верхний предел технологически допустимой подачи  $S$  ограничивается одним из следующих факторов [10, 11]:

- 1) прочностью и жёсткостью режущего инструмента  $S_{p.u.}$ , мм/об;
- 2) прочностью механизма подач станка  $S_{m.n.}$ , мм/об;

3) максимальной подачей  $S_{cm.max}$ , мм/об, которую обеспечивает кинематика станка;

4) значением радиуса скругления при вершине резца  $r$ , мм.

$$S \leq \min(S_{p.u.}; S_{m.n.}; S_{cm.max}; r). \quad (12)$$

*Шероховатость обработанной поверхности.* При необходимости получить поверхность с требуемой шероховатостью  $[R_a]$  в математическую модель оптимизации режимов резания добавляется следующее ограничение:

$$R_a \leq [R_a]. \quad (13)$$

Шероховатость обработанной поверхности  $R_a$ , мкм, определяется по формуле [1]

$$R_a = k_0 \cdot \frac{S^{k_1} \cdot (90 + \gamma)^{k_4}}{r^{k_2} \cdot V^{k_3}}, \quad (14)$$

где  $k_0, k_1, k_2, k_3, k_4$  – поправочный коэффициент и показатели степени в формуле для вычисления шероховатости обработанной поверхности, учитывающие влияние режимов резания и параметров инструмента на шероховатость [1];  $\gamma$  – передний угол, град.

С учётом (2) и (13) неравенство (12) принимает следующий вид:

$$\frac{n_{cm}^{k_3}}{S^{k_1}} \geq \frac{k_0 \cdot (90 + \gamma)^{k_4} \cdot 1000^{k_3}}{[R_a] \cdot r^{k_2} \cdot (\pi \cdot X)^{k_3}}. \quad (15)$$

*Наименьшая технологически приемлемая глубина резания.* Глубина резания  $t$ , мм, не может быть меньше некоторой определенной для каждого инструмента и обрабатываемого металла величины  $t_{min}$ , мм, т. к. в противном случае процесс резания частично заменяется смятием-выглаживанием срезаемого слоя металла, ухудшается процесс образования стружки, резко возрастает интенсивность износа режущих кромок инструмента, ухудшается качество обработанной поверхности. Поэтому всегда должно соблюдаться не-

равенство [10]

$$t \geq t_{min}. \quad (16)$$

*Наибольшая возможная глубина резания.* С одной стороны, глубина резания  $t$ , мм, не может быть больше припуска на обработку  $h_p$ . С другой стороны, значение глубины резания не должно превышать значение, допускаемое конструктивными параметрами режущего инструмента. Поэтому всегда должно соблюдаться неравенство [10]

$$t \leq \min\left(\frac{c \cdot \sin \varphi}{1,5 \dots 2}; h_p\right), \quad (17)$$

где  $c$  – длина режущей кромки инструмента, мм;  $\varphi$  – главный угол в плане, град;  $h_p$  – текущая величина припуска, мм.

Уравнение целевой функции (критерия оптимальности) имеет следующий вид [10]:

$$Q = \frac{h_p \cdot L_K}{n \cdot S \cdot t} \rightarrow \min, \quad (18)$$

где  $L_K$  – длина  $k$ -го рабочего хода.

Для приведения полученных ограничений и критерия оптимальности к линейным формам необходимо их прологарифмировать. После соответствующих преобразований выполним следующие замены [9]:

$$X_1 = \ln(n_{cm}); \quad (19)$$

$$X_2 = \ln(S); \quad (20)$$

$$X_3 = \ln(t); \quad (21)$$

$$b_1 = \ln\left(\frac{C_v \cdot K_v \cdot 10^3}{T^{m_v} \cdot \pi \cdot X}\right); \quad (22)$$

$$b_2 = \ln\left(\frac{N_{эд} \cdot \eta \cdot 6120 \cdot 10^{3 \cdot (1+n_{P_z})}}{C_{P_z} \cdot K_{P_z} \cdot (\pi \cdot X)^{(1+n_{P_z})}}\right); \quad (23)$$

$$b_3 = \max \left( \ln \left( \frac{1000 \cdot V_{\min}}{\pi \cdot X} \right); \ln(n_{cm.\min}) \right); \quad (24)$$

$$b_4 = \min \left( \ln \left( \frac{1000 \cdot V_{\max}}{\pi \cdot X} \right); \ln(n_{cm.\max}) \right); \quad (25)$$

$$b_5 = \ln \left( \frac{10^{(3 \cdot n_{P_x} - 1)} \cdot [P_x]}{C_{P_x} \cdot (\pi \cdot X)^{n_{P_x}} \cdot K_{P_x}} \right); \quad (26)$$

$$b_6 = \ln \left( \frac{10^{(3 \cdot n_{P_y} - 1)} \cdot [P_y]}{C_{P_y} \cdot (\pi \cdot X)^{n_{P_y}} \cdot K_{P_y}} \right); \quad (27)$$

$$b_7 = \ln \left( \frac{10^{(3 \cdot n_{P_z} - 1)} \cdot [P_z]}{C_{P_z} \cdot (\pi \cdot X)^{n_{P_z}} \cdot K_{P_z}} \right); \quad (28)$$

$$b_8 = \max(\ln(S_{cm.\min}); \ln(S_{\min})); \quad (29)$$

$$b_9 = \min \left( \ln(S_{p.u.}); \ln(S_{m.n.}); \ln(S_{cm.\max}); \ln(r) \right); \quad (30)$$

$$b_{10} = \ln \left( \frac{k_0 \cdot (90 + \gamma)^{k_4} \cdot 10^{3 \cdot k_3}}{[R_a] \cdot r^{k_2} \cdot (\pi \cdot X)^{k_3}} \right); \quad (31)$$

$$b_{11} = \ln(t_{\min}); \quad (32)$$

$$b_{12} = \min \left( \ln \left( \frac{c \cdot \sin \varphi}{1,5 \dots 2} \right); \ln(h_p) \right). \quad (33)$$

Уравнение целевой функции после логарифмирования имеет следующий вид [10]:

$$\ln \left( \frac{Q}{10^4} \right) = \ln(h_p \cdot L_K) - X_1 - X_2 - X_3 \rightarrow \min. \quad (34)$$

После преобразований система ограничений примет следующий вид:

$$\begin{cases} X_1 + y_v \cdot X_2 + x_v \cdot X_3 = b_1; \\ (1 + n_{P_z}) \cdot X_1 + y_{P_z} \cdot X_2 + x_{P_z} \cdot X_3 \leq b_2; \\ X_1 \geq b_3; \\ X_1 \leq b_4; \\ n_{P_x} \cdot X_1 + y_{P_x} \cdot X_2 + x_{P_x} \cdot X_3 \leq b_5; \\ n_{P_y} \cdot X_1 + y_{P_y} \cdot X_2 + x_{P_y} \cdot X_3 \leq b_6; \\ n_{P_z} \cdot X_1 + y_{P_z} \cdot X_2 + x_{P_z} \cdot X_3 \leq b_7; \\ X_2 \geq b_8; \\ X_2 \leq b_9; \\ k_3 X_1 - k_1 X_2 \geq b_{10}; \\ X_3 \geq b_{11}; \\ X_3 \leq b_{12}; \\ \ln(h_p \cdot |Z_K(P_{klm}) - Z_H(P_{klm})|) - \\ - X_1 - X_2 - X_3 \rightarrow \min. \end{cases} \quad (35)$$

В данном случае решение задачи может быть упрощено за счет приведения системы (35) с тремя неизвестными к системе с двумя неизвестными [10]. В результате такого преобразования значительно упростится математическая модель и решение задачи будет производиться в двухмерном пространстве (на плоскости). Из первого уравнения системы ограничений (35) следует, что неизвестный параметр  $X_1$  определяется по формуле

$$X_1 = b_1 - y_v \cdot X_2 - x_v \cdot X_3. \quad (36)$$

С учётом (35) линейная форма целевой функции (34) примет следующий вид:

$$\ln \left( \frac{Q}{10^4} \right) = \ln(h_p \cdot L_K) - b_1 - [(1 - y_v) \cdot X_2 + (1 - x_v) \cdot X_3] \rightarrow \min. \quad (37)$$

Так как величины  $h_P$ ,  $L_K$ ,  $b_1$  имеют постоянное значение для каждого рабочего хода, то линейная форма (37) достигнет минимума при следующем условии:

$$q = (1 - y_v) \cdot X_2 + (1 - x_v) \cdot X_3 \rightarrow \max. \quad (38)$$

Все неравенства системы (35), содержащие неизвестный параметр  $X_1$ , преобразовываются с учётом (36) и в результате итоговая система ограничений (39) содержит только два неизвестных:  $X_2$  и  $X_3$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} (y_{P_z} - y_v(1+n_{P_z})) \cdot X_2 + \\ + (x_{P_z} - x_v(1+n_{P_z})) \cdot X_3 \leq \\ \leq b_2 - b_1 \cdot (1+n_{P_z}); \\ y_v X_2 + x_v X_3 \leq b_1 - b_3; \\ y_v X_2 + x_v X_3 \geq b_1 - b_4; \\ (y_{P_x} - y_v \cdot n_{P_x}) \cdot X_2 + \\ + (x_{P_x} - x_v \cdot n_{P_x}) \cdot X_3 \leq \\ \leq b_5 - b_1 \cdot n_{P_x}; \\ (y_{P_y} - y_v \cdot n_{P_y}) \cdot X_2 + \\ + (x_{P_y} - x_v \cdot n_{P_y}) \cdot X_3 \leq b_6 - b_1 \cdot n_{P_y}; \\ (y_{P_z} - y_v \cdot n_{P_z}) \cdot X_2 + \\ + (x_{P_z} - x_v \cdot n_{P_z}) \cdot X_3 \leq b_7 - b_1 \cdot n_{P_z}; \\ X_2 \geq b_8; \\ X_2 \leq b_9; \\ (k_3 \cdot y_v + k_1) \cdot X_2 + k_3 \cdot x_v \cdot X_3 \leq b_1 \cdot k_3 - b_{10}; \\ X_3 \geq b_{11}; \\ X_3 \leq b_{12}; \\ \hline q = (1 - y_v) \cdot X_2 + (1 - x_v) \cdot X_3 \rightarrow \max. \end{array} \right. \quad (39)$$

Из теории линейного математического программирования известно, что если система линейных неравенств совместна, то оптимальное решение находится в одной из вершин выпуклого многоугольника, образованного пересечением линий, соответствующих уравнениям модели (39) [10]. Однако постоянный коэффициент  $C_v$  и показатели степени  $x_v$ ,  $y_v$ ,

$m_v$  в выражениях (22)...(33) определяются системой (40) [1]

$$\left\{ \begin{array}{l} x_v = 0,15; \\ m_v = 0,2; \\ S \leq 0,3 : C_v = 420, \quad y_v = 0,2; \\ 0,3 < S \leq 0,7 : C_v = 350, \quad y_v = 0,35; \\ S > 0,7 : C_v = 340, \quad y_v = 0,45. \end{array} \right. \quad (40)$$

Из системы (40) следует, что область поиска оптимального решения разделена на три зоны, в каждой из которых любая прямая из системы (39) изменяет свой угол наклона. Например, рассмотрим прямую, ограничивающую максимальную частоту вращения шпинделя:  $y_v X_2 + x_v X_3 \geq b_1 - b_4$ . Угол между этой прямой и осью  $X_2$  определяется как  $\arctan(-y_v/x_v)$  и составляет, соответственно,  $-53$ ,  $-67$  и  $-72^\circ$  (рис. 1). Таким образом, многоугольник, образованный системой ограничений (39), не является выпуклым.

При решении системы (39) возможны три случая.

1 Ограничения подачи лежат в одной из зон:

- а)  $S_{\min} < S_{\max} \leq 0,3$ ;
- б)  $S_{\min} > 0,3, S_{\max} \leq 0,7$ ;
- в)  $S_{\max} > S_{\min} > 0,7$ .

2 Ограничения подачи охватывают две зоны одновременно:

- а)  $S_{\min} \leq 0,3 < S_{\max} < 0,7$ ;
- б)  $0,3 < S_{\min} \leq 0,7, S_{\max} > 0,7$ .

3 Ограничения подачи охватывают три зоны одновременно:  $S_{\min} \leq 0,3, S_{\max} > 0,7$ .

В первом случае для аналитического определения оптимальных режимов, на основе полученной линейной системы ограничений, необходимо решить задачу в следующей последовательности.

1 Найти координаты точек пересечения всех линий системы (39).

2 Последовательно определить значения целевой функции в найденных точках.

3 Выявить координаты точки, в которой целевая функция (38) имеет

наибольшее значение.

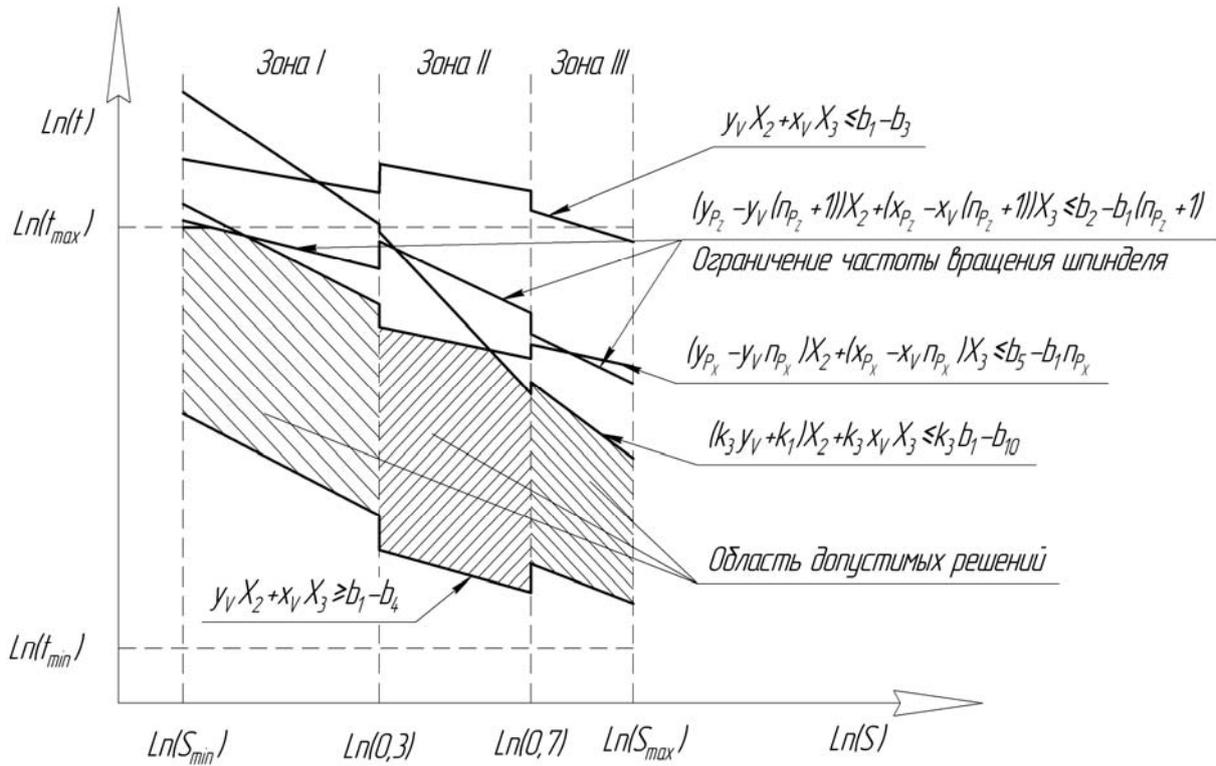


Рис. 1. Графическое решение задачи линейного математического программирования

Координаты найденной точки будут являться оптимальными значениями  $S, t$  режима точения [10–12]:

$$S_{opt} = e^{X_2}; \quad (41)$$

$$t_{opt} = e^{X_3}; \quad (42)$$

$$n_{opt} = e^{(b_1 - y_V \cdot X_2 - x_V \cdot X_3)}. \quad (43)$$

Во втором случае задача решается в следующей последовательности.

1 Найти координаты точек пересечения всех линий системы (39) при ограничении максимальной подачи  $S_{\max} = 0,3$  – для случая 2 (а) и  $S_{\max} = 0,7$  – для случая 2 (б).

2 Последовательно определить значения целевой функции в найденных точках.

3 Выявить вершину  $q^I$ , в которой целевая функция (38) имеет наибольшее

значение.

4 Найти координаты точек пересечения всех линий системы (39) при ограничении минимальной подачи  $S_{\min} = 0,31$  – для случая 2 (а) и  $S_{\min} = 0,71$  – для случая 2 (б).

5 Последовательно определить значения целевой функции в найденных точках.

6 Выявить вершину  $q^{II}$ , в которой целевая функция (38) имеет наибольшее значение.

7 Определить максимальное из  $q^I$  и  $q^{II}$ .

8 Определить  $X_1, X_2, X_3$ , соответствующие максимальному из  $q^I$  и  $q^{II}$ .

9 Определить  $S, t, n$  по (41)...(43).

В третьем случае задача решается в следующей последовательности.

1 Найти координаты точек пересечения всех линий системы (39) при ог-

раничении максимальной подачи  $S_{\max} = 0,3$ .

2 Последовательно определить значения целевой функции в найденных точках.

3 Выявить координаты точки  $q^I$ , в которой целевая функция (38) имеет наибольшее значение.

4 Найти координаты точек пересечения всех линий системы (39) при ограничении минимальной  $S_{\min} = 0,31$  и максимальной  $S_{\max} = 0,71$  подач.

5 Последовательно определить значения целевой функции в найденных точках.

6 Выявить координаты точки  $q^{II}$ , в которой целевая функция (38) имеет наибольшее значение.

7 Найти координаты точек пересечения всех линий системы (39) при ограничении минимальной подачи  $S_{\min} = 0,71$ .

8 Последовательно определить значения целевой функции в найденных точках.

9 Выявить координаты точки  $q^{III}$ , в которой целевая функция (38) имеет наибольшее значение.

10 Определить максимальное из  $q^I$ ,  $q^{II}$  и  $q^{III}$ .

11 Определить  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ , соответствующие максимальному из  $q^I$ ,  $q^{II}$  и  $q^{III}$ .

12 Определить  $S$ ,  $t$ ,  $n$  по (41)...(43).

Для определения варианта обработки, который обеспечивает наименьшее основное время  $T_0$ , мин, необходимо определить основное время для каждого из допустимых вариантов обработки по формуле

$$T_0 = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^{i_k} \left( \frac{L_K}{S_{kj} \cdot n_{cmkj}} + \frac{L_K}{V_{xx}} \right), \quad (44)$$

где  $n_{cmkj}$  – частота вращения шпинделя на  $j$ -м рабочем ходу при удалении припуска  $k$ -й ступени,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $S_{kj}$  – продольная подача на  $j$ -м рабочем ходу при удалении припуска  $k$ -й ступени,  $\text{мм/об}$ ;  $V_{xx}$  – скорость перемещения суппорта при выполнении холостого хода,  $\text{мм/мин}$ .

Разработанная математическая модель параметрической оптимизации отличается от описанных в [4–12] тем, что дает возможность учитывать зависимость постоянного коэффициента и показателей степени от подачи при расчете скорости резания. Это позволяет определить режимы резания, обеспечивающие минимальное основное время, и рационально использовать дорогостоящее оборудование.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник технолога-машиностроителя : справочник / Под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1986. – Т. 2. – 496 с. : ил.
2. Барановский, Ю. В. Режимы резания металлов : справочник / Ю. В. Барановский, Л. А. Брахман, Ц. З. Бродский ; под ред. Ю. В. Барановского. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1972. – 408 с. : ил.
3. Гузеев, В. И. Режимы резания для токарных и сверлильно-фрезерно-расточных станков с числовым программным управлением : справочник / В. И. Гузеев, В. А. Батуев, И. В. Сурков ; под ред. В. И. Гузеева. – М. : Машиностроение, 2005. – 368 с.
4. Сикора, В. Оптимизация процесса обработки резанием с применением вычислительных машин / В. Сикора. – М. : Машиностроение, 1983. – 226 с.
5. Оптимизация режимов обработки на металлорежущих станках / Под ред. М. И. Клушина. – М. : Машиностроение, 1972. – 188 с.
6. Реклейтис, Г. Оптимизация в технике : пер. с англ. : в 2 кн. / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел. – М. : Мир, 1986. – 352 с.
7. Рыжов, Э. В. Оптимизация технологических процессов механической обработки / Э. В. Рыжов, В. И. Аверченков. – Киев : Наук. думка, 1989. – 192 с.

8. **Старков, В. К.** Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве / В. К. Старков. – М. : Машиностроение, 1989. – 296 с.

9. **Якобс, Г. Ю.** Оптимизация резания. Параметризация способов обработки резанием с использованием технологической оптимизации / Г. Ю. Якобс, Э. Якобс, Д. Кохан. – М. : Машиностроение 1981. – 279 с. : ил.

10. **Горанский, Г. К.** Автоматизация технического нормирования работ на металлорежущих станках с помощью ЭВМ / Г. К. Горанский, Е. В. Владимиров, Л. Н. Ламбин. – М. : Машиностроение, 1970. – 224 с.

11. **Горанский, Г. К.** Расчет режимов резания при помощи электронно-вычислительных машин / Г. К. Горанский. – Минск : Госиздат БССР, 1963. – 192 с. : ил.

12. **Рязанцев, А. Н.** Автоматизация проектирования технологических процессов. Сборник задач : учеб. пособие / А. Н. Рязанцев, А. А. Жолобов. – Минск : Дизайн ПРО, 1997 – 121 с.

*Статья сдана в редакцию 2 октября 2012 года*

**Алексей Владимирович Казаков**, ассистент, Белорусско-Российский университет.  
Тел.: +375-299-99-61-84.

**Александр Алексеевич Жолобов**, канд. техн. наук, Белорусско-Российский университет.

**Aleksei Vladimirovich Kazakov**, assistant lecturer, Belarusian-Russian University. Tel.: +375-299-99-61-84.

**Aleksandr Alekseyevich Zholobov**, PhD (Engineering), Belarusian-Russian University.

---

УДК 621.83.06

*А. В. Капитонов, С. Г. Черняков*

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ СБОРКИ ПЛАНЕТАРНОГО ЭКСЦЕНТРИКОВОГО РЕДУКТОРА С МОДИФИЦИРОВАННЫМИ ЗУБЬЯМИ САТЕЛЛИТА МЕТОДАМИ РАСЧЕТА ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ**

---

UDC 621.83.06

*A. V. Kapitonov, S. G. Chernyakov*

**ASSURANCE OF ACCURACY IN ASSEMBLING A PLANETARY ECCENTRIC REDUCTION GEAR WITH MODIFIED TEETH OF A SATELLITE GEAR BY USING METHODS OF CALCULATION OF LINEAR DIMENSION CHAINS**

---

**Аннотация**

Приведены исследования точности сборки планетарного эксцентрикового редуктора с модифицированными зубьями сателлита на основе методик расчета размерных цепей. Представлены результаты расчета размерной цепи редуктора методом неполной взаимозаменяемости и методом регулирования с применением неподвижного компенсатора. Проведен анализ результатов исследования и выработаны рекомендации по использованию полученных результатов в условиях производства.

**Ключевые слова:**

планетарный эксцентриковый редуктор, точность сборки, размерные цепи, взаимозаменяемость, метод регулирования, компенсатор.

**Abstract**

The paper presents the research into the accuracy of assembly of a planetary eccentric reduction gear with modified teeth of a satellite gear based on the methods of calculation of dimension chains. The results of the calculation of the dimension chain of a reduction gear by using the method of incomplete interchangeability and the control method with the application of a stationary compensator are given. The analysis of the research results is presented, and recommendations for the application of the obtained results in the production environment are elaborated.

**Key words:**

planetary eccentric reduction gear, assembling accuracy, dimension chains, interchangeability, control method, compensator.

---

Исследуемый редуктор представляет собой планетарный редуктор с разностью чисел зубьев центрального колеса внутреннего зацепления и сателлита, равной единице. Однако при использовании стандартного эвольвентного профиля зубьев сателлита такая передача не смогла бы функционировать вследствие наличия в зацеплении явления интерференции зубьев. Безытерференционное зацепление обеспечивается только при условии модификации

зубчатого зацепления, вследствие чего уменьшается толщина зубьев сателлита.

Положительным моментом модификации профиля зуба является то, что после нее наблюдается многопарность зубчатого зацепления, т. е. в зацеплении находится не одна пара зубьев, как это происходит в обычном зубчатом зацеплении прямозубых колес, а две или три в зависимости от числа зубьев сателлита. Поэтому можно сделать вывод, что данная передача будет обладать повы-

шенной нагрузочной способностью по сравнению с другими планетарными передачами при равных габаритных размерах.

На рис. 1 представлен планетарный эксцентриковый редуктор с моди-

фицированными зубьями сателлита.

До настоящего времени не проводились исследования точности изготовления деталей и сборки планетарных эксцентриковых редукторов с модифицированными зубьями сателлита.

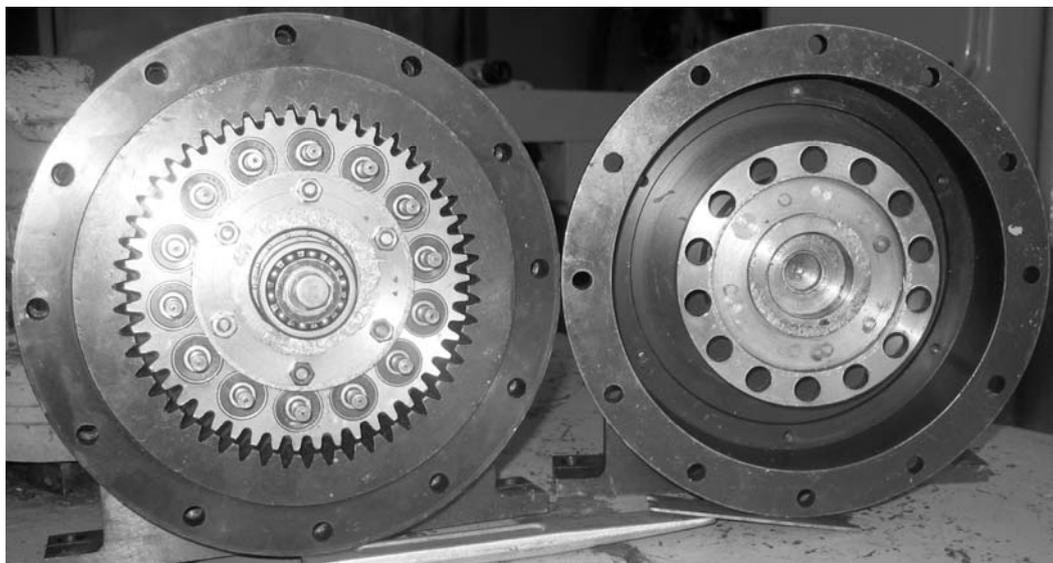


Рис. 1. Планетарный эксцентриковый редуктор

Схема планетарного эксцентрикового редуктора [1, 2] представлена на рис. 2.

Принцип работы указанного редуктора состоит в следующем. При вращении ведущего вала 1 редуктора вращается также эксцентрик 6, закрепленный на нем с помощью шпонки. На эксцентрике 6 установлен сателлит 3 с подшипником. При вращении эксцентрика сателлит 3 обкатывается по центральному колесу внутреннего зацепления 4, совершая планетарное движение. Вращение сателлита передается ведомому валу 2 редуктора посредством пальцев 5, установленных в сателлите на подшипниках качения.

Схема зацепления эксцентриковой передачи представлена на рис. 3.

Для обеспечения точности сборки планетарного эксцентрикового редуктора с модифицированными зубьями са-

теллита была использована методика расчета размерных цепей [4–7].

Замыкающим звеном в линейной размерной цепи редуктора примем осевой зазор между торцом кольца 10 (звено  $A_{10}$ ) и торцом эксцентрика 6 (звено  $A_{11}$ ), равный  $0^{+0,25}$  мм. Осевой зазор необходим для обеспечения сборки редуктора, компенсации температурных деформаций и погрешностей формы и расположения собираемых деталей. Точность замыкающего звена может быть обеспечена двумя методами: методом неполной взаимозаменяемости и методом регулирования с применением неподвижного компенсатора.

В разрабатываемую размерную цепь входят звенья:  $A_1$  – высота крышки 9;  $A_2$  – высота крышки 8;  $A_3$  – монтажная толщина центрального колеса 4;  $A_4$  – высота крышки 7;  $A_5$  – толщина упорного буртика в отверстии крышки 9;

$A_6$ ,  $A_8$  и  $A_{16}$  – ширины подшипников 14, 15 и 13 соответственно;  $A_7$  – толщина распорного кольца 16;  $A_9$  – расстояние от упорного буртика до торца ведомого вала 2;  $A_{10}$  – толщина кольца 10;  $A_{11}$  – толщина эксцентрика 6;  $A_{12}$  – толщина

кольца 12;  $A_{13}$  – толщина диска 11;  $A_{14}$  – размер упорного буртика на ведущем валу;  $A_{15}$  – толщина упорного буртика ведомого вала;  $A_{17}$  – толщина упорного буртика в отверстии крышки 7.

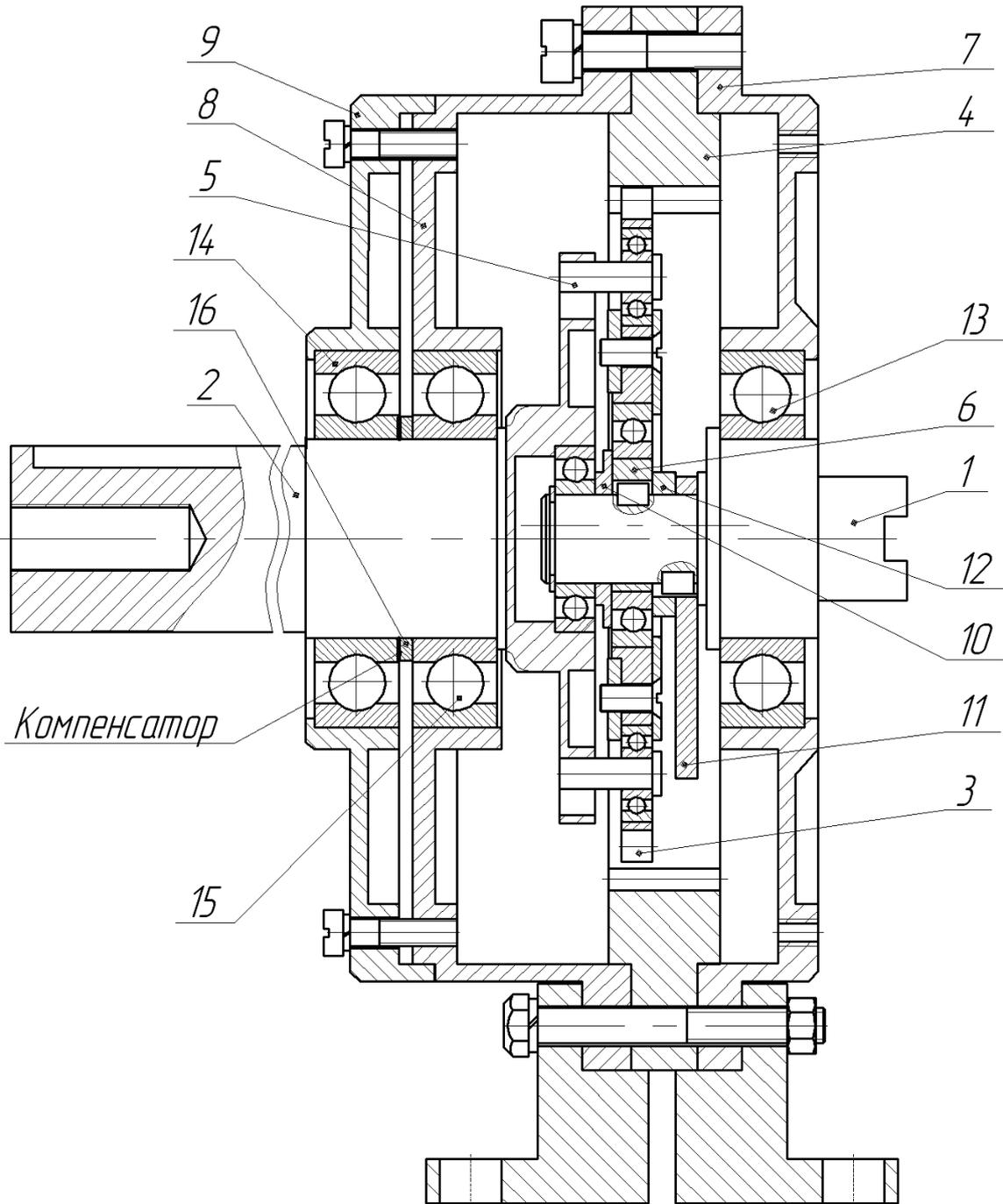


Рис. 2. Планетарный эксцентриковый редуктор: 1 – вал ведущий; 2 – вал ведомый; 3 – сателлит; 4 – центральное колесо; 5 – палец; 6 – эксцентрик; 7...9 – крышки; 10 – кольцо; 11 – диск; 12 – кольцо; 13...15 – подшипники; 16 – распорное кольцо

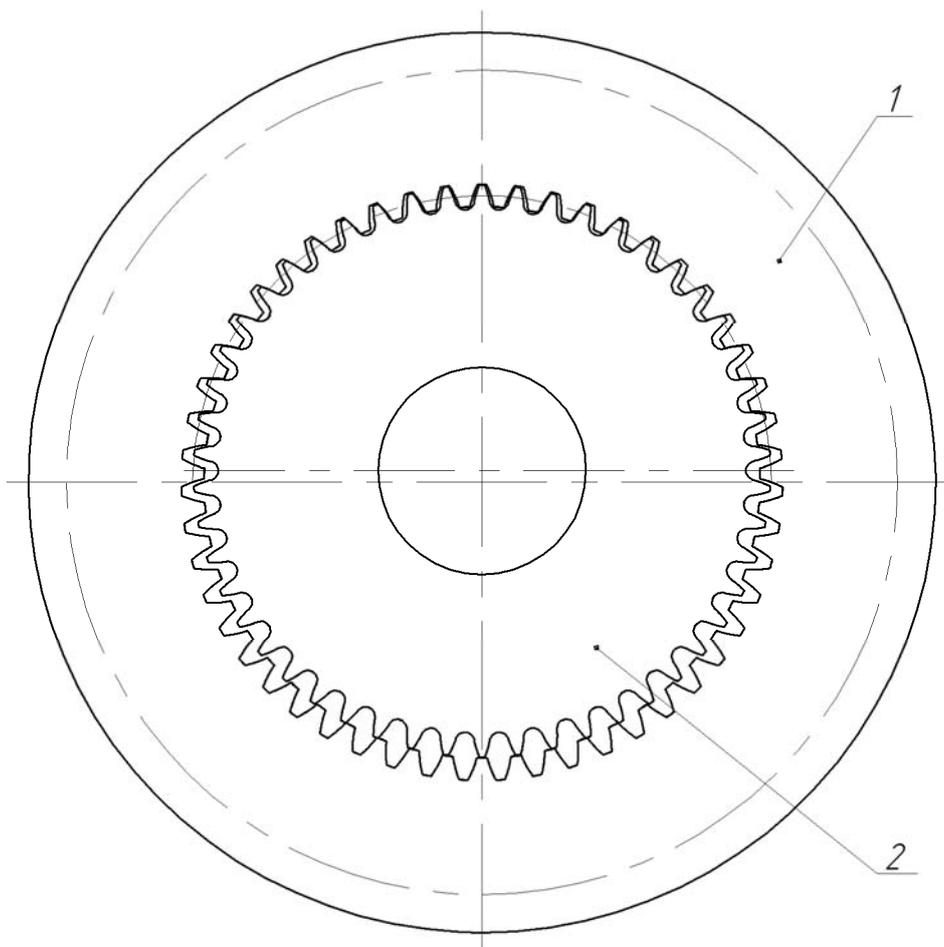


Рис. 3. Схема зацепления эксцентриковой передачи: 1 – центральное колесо; 2 – сателлит

Выполним расчет допусков составляющих звеньев по методу неполной взаимозаменяемости [4–7].

Сущность метода состоит в том, что точность замыкающего звена будет обеспечиваться не у всех изделий, а только у заранее обусловленной их части. При этом предварительно принимают процент риска, т. е. процент изделий, у которых может не обеспечиваться точность замыкающего звена. Задача решается теоретико-вероятностным методом, а процент риска в ней принят на уровне  $P = 0,27\%$ . При этом применяются следующие математические зависимости.

Для нахождения номинального размера замыкающего звена использу-

ется уравнение размерной цепи в номиналах

$$A_{\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i A_i, \quad (1)$$

где  $A_{\Delta}$  – номинальное значение замыкающего звена;  $A_i$  – номинальное значение составляющих звеньев;  $\xi_i$  – передаточное отношение  $i$ -го звена размерной цепи (в линейных размерных цепях для увеличивающих звеньев  $\xi = +1$ , для уменьшающих –  $\xi = -1$ );  $m$  – количество увеличивающих звеньев в размерной цепи.

Допуск замыкающего звена

$$TA_{\Delta} = t \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \cdot \lambda_i^2 \cdot TA_i^2}, \quad (2)$$

где  $TA_i$  – допуски составляющих звеньев;  $\lambda_i^2$  – коэффициент, характеризующий закон рассеяния размеров;  $t$  – коэффициент риска, при принятом проценте риска  $P = 0,27\%$   $t = 3$ .

Координата середины поля допуска замыкающего звена

$$Ec_{\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i Ec_i, \quad (3)$$

где  $Ec_i$  – координата середины поля допуска составляющих звеньев.

Верхнее предельное отклонение замыкающего звена

$$ESA_{\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i Ec_i + t \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \cdot \lambda_i^2 \cdot \left(\frac{TA_i}{2}\right)^2}. \quad (4)$$

Нижнее предельное отклонение замыкающего звена

$$EIA_{\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i Ec_i - t \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \cdot \lambda_i^2 \cdot \left(\frac{TA_i}{2}\right)^2}. \quad (5)$$

Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Табл. 1. Результаты расчетов допусков составляющих звеньев методом неполной взаимозаменяемости

Обозначение звена	Номинальный размер, мм	Допуск $TA$ , мм	Верхнее отклонение $ES$ , мм	Нижнее отклонение $EI$ , мм	Координата середины поля допуска $Ec$ , мм
$A_{\Delta}$	0	0,25	0,25	0	0,125
$A_1$	29	0,052	0	-0,052	-0,026
$A_2$	43	0,062	0	-0,062	-0,031
$A_3$	15	0,043	0	-0,043	-0,0215
$A_4$	27	0,052	0	-0,052	-0,026
$A_5$	2	0,025	0	-0,025	-0,0125
$A_6$	19	0,12	0	-0,12	-0,06
$A_7$	3	0,014	0,1995	0,1855	0,1925
$A_8$	19	0,12	0	-0,12	-0,06
$A_9$	22	0,052	0	-0,052	-0,026
$A_{10}$	3	0,025	0	-0,025	-0,0125
$A_{11}$	9	0,022	0	-0,022	-0,011
$A_{12}$	5	0,03	0	-0,03	-0,015
$A_{13}$	5	0,03	0	-0,03	-0,015
$A_{14}$	2	0,025	0,0125	-0,0125	0
$A_{15}$	3	0,025	0	-0,025	-0,0125
$A_{16}$	19	0,12	0	-0,12	-0,06
$A_{17}$	3	0,025	0	-0,025	-0,0125

При расчете допусков на размеры составляющих звеньев размерной цепи этим методом были получены допуски по девятому качеству точности.

Расчет размерной цепи методом регулирования с применением неподвижного компенсатора проводился согласно методике и рекомендациям [4–10].

Сущность метода заключается в том, что на составляющие звенья допуски увеличивают до экономически целесообразных в данных производственных условиях величин, а точность замыкающего звена обеспечивается за счет изменения размеров компенсирующего звена. Такой метод предполагает наличие в изделиях неподвижных компенсаторов – колец или прокладок.

При обеспечении точности замыкающего звена методом регулирования используют следующие математические зависимости.

Производственный допуск замыкающего звена

$$TA'_\Delta = \sum_{i=1}^{m-1} TA'_i, \quad (6)$$

где  $TA'_i$  – производственные допуски, установленные на составляющие звенья, кроме компенсирующего звена.

Величина компенсации определяется по формуле

$$T_K = TA'_\Delta - TA_\Delta + T_{MK}, \quad (7)$$

где  $TA_\Delta$  – допуск замыкающего звена;  $T_{MK}$  – допуск на изготовление компенсатора.

Координата середины поля производственного допуска замыкающего звена

$$Ec'_\Delta = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i Ec'_i, \quad (8)$$

где  $Ec'_i$  – середина поля производственного допуска составляющих звеньев.

Величина компенсации координа-

ты середины поля производственного допуска замыкающего звена

$$Ec_K = \pm(Ec'_\Delta - Ec'_\Delta). \quad (9)$$

Знак «+» ставится в том случае, если компенсатор является увеличивающим звеном, а знак «-» – если уменьшающим.

Предельные значения величины необходимой компенсации

$$ES_K = Ec_K + \frac{T_K}{2}; \quad (10)$$

$$EI_K = Ec_K - \frac{T_K}{2}. \quad (11)$$

При расчете получена величина  $EI_K < 0$ , поэтому необходимо изменить координату середины поля допуска одного из составляющих звеньев. Изменим координату середины поля допуска звена  $A_9$ , являющегося уменьшающим.

Искомая величина определяется по формуле

$$Ec''_i = Ec'_i + EI_K. \quad (12)$$

Новые предельные отклонения для измененного звена

$$ESA''_i = Ec''_i + \frac{TA'_i}{2}; \quad (13)$$

$$EIA''_i = Ec''_i - \frac{TA'_i}{2}. \quad (14)$$

Толщина одной прокладки определяется из зависимости

$$S \leq TA_\Delta. \quad (15)$$

Число прокладок  $N$  определяется по формуле

$$N = \frac{T_K}{S}. \quad (16)$$

Расчетное количество прокладок  $N = 11$ .

Расположение компенсатора указано на рис. 2.

Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Табл. 2. Результаты расчетов допусков составляющих звеньев методом регулирования

Обозначение звена	Номинальный размер, мм	Допуск $TA$ , мм	Верхнее отклонение $ES$ , мм	Нижнее отклонение $EI$ , мм	Координата середины поля допуска $Es$ , мм
$A_{\Delta}$	0	0,25	0,25	0	0,125
$A_1$	29	0,21	0	-0,21	-0,105
$A_2$	43	0,25	0	-0,25	-0,125
$A_3$	15	0,18	0	-0,18	-0,09
$A_4$	27	0,21	0	-0,21	-0,105
$A_5$	2	0,1	0	-0,1	-0,05
$A_6$	19	0,12	0	-0,12	-0,06
$A_7$	3	2,1	1,18	-0,92	0,13
$A_8$	19	0,12	0	-0,12	-0,06
$A_9$	22	0,21	-0,92	-1,13	-1,025
$A_{10}$	3	0,1	0	-0,1	-0,05
$A_{11}$	9	0,15	0	-0,15	-0,075
$A_{12}$	5	0,12	0	-0,12	-0,06
$A_{13}$	5	0,12	0	-0,12	-0,06
$A_{14}$	2	0,1	0,05	-0,05	0
$A_{15}$	3	0,1	0	-0,1	-0,05
$A_{16}$	19	0,12	0	-0,12	-0,06
$A_{17}$	3	0,1	0	-0,1	-0,05

Расчетом размерной цепи методом регулирования получены допуски на размеры составляющих звеньев, соответствующие двенадцатому качеству точности.

Таким образом, точность сборки планетарного эксцентрикового редуктора может быть обеспечена как методом неполной взаимозаменяемости, так и методом регулирования с применением неподвижного компенсатора.

Для изготовления планетарного эксцентрикового редуктора в условиях опытно-экспериментального производства рекомендуется использовать метод регулирования, т. к. при этом полученные расчетные допуски на составляющие звенья шире допусков, рассчитан-

ных по методу неполной взаимозаменяемости, а следовательно, ниже затраты на обработку деталей редуктора. Допуски, полученные методом неполной взаимозаменяемости, целесообразно использовать при изготовлении редуктора в условиях серийного производства, т. к. при этом из технологического процесса сборки редуктора исключаются регулировочные работы, вследствие чего снижаются затраты труда на сборку и уменьшается ее время.

### Заключение

1. Проведен размерный анализ точности сборки редуктора методом неполной взаимозаменяемости и методом регулирования с применением неподвижного

компенсатора. В результате размерного анализа методом неполной взаимозаменяемости установлено, что для обеспечения заданной точности сборки редуктора составляющие звенья должны быть изготовлены с допусками, соответствующими девятому качеству точности. Размерный анализ методом регулирования показал, что составляющие звенья редуктора могут быть выполнены с допусками, соответствующими двенадцатому качеству точности.

2. В результате исследования точности сборки редуктора была составле-

на линейная размерная цепь, установлены составляющие звенья и замыкающее звено, определено расположение компенсатора, рассчитаны допуски на осевые размеры деталей, входящих в размерную цепь.

3. Даны рекомендации по практическому использованию результатов проведенных исследований в условиях машиностроительного производства, позволяющие обеспечить точность сборки планетарных эксцентриковых редукторов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Планетарная передача : пат. 5092 С 1 Респ. Беларусь, МПК 7 F 16 Н 1 / 28 / А. М. Пашкевич, В. М. Пашкевич, В. В. Герашенко, М. Ф. Пашкевич ; заявитель Могилев. гос. техн. ун-т. – № 19981087 ; заявл. 30.11.98 ; опубл. 30.03.03 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2003. – № 1. – С. 161.
2. **Пашкевич, М. Ф.** Планетарные передачи с повышенной нагрузочной способностью для реверсивной работы в приводах строительных и дорожных машин / М. Ф. Пашкевич, О. Е. Печковская // Вестн. МГТУ. – 2005. – № 2. – С. 127–131.
3. **ГОСТ 16319-80.** Размерные цепи. Термины и определения. – Введ. 1981–01–01. – М. : Изд-во стандартов, 1980. – 29 с.
4. **ГОСТ 16320-80.** Цепи размерные. Расчет плоских цепей. – Введ. 1981–01–01. – М. : Изд-во стандартов, 1982. – 31 с.
5. **Якушев, А. И.** Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения / А. И. Якушев, Л. Н. Воронцов, Н. М. Федотов. – М. : Машиностроение, 1986. – 352 с.
6. Допуски и посадки : справочник в 2 ч. / В. Д. Мягков [и др.] ; под ред. В. Д. Мягкова. – Л. : Машиностроение, 1982. – Ч. 2. – 1032 с.
7. **Солонин, И. С.** Расчет сборочных и технологических размерных цепей / И. С. Солонин, С. И. Солонин. – М. : Машиностроение, 1980. – 110 с.
8. **Сергеев, А. Г.** Метрология, стандартизация, сертификация : учеб. пособие / А. Г. Сергеев, М. В. Латышев, В. В. Терегеря. – М. : Логос, 2003. – 536 с.
9. **Сергеев, А. Г.** Метрология : учебник / А. Г. Сергеев. – М. : Логос, 2005. – 272 с.
10. **Новиков, М. П.** Основы технологии сборки машин и механизмов / М. П. Новиков. – М. : Машиностроение, 1980. – 592 с.

*Статья сдана в редакцию 27 сентября 2012 года*

**Александр Валентинович Капитонов**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0222-26-62-98.

**Сергей Геннадьевич Черняков**, аспирант, Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0336-90-79-60.

**Aleksandr Valentinovich Kapitonov**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Тел.: 8-0222-26-62-98.

**Sergey Gennadyevich Chernyakov**, PhD student, Belarusian-Russian University. Тел.: 8-0336-90-79-60.

УДК 629.113

*А. С. Мельников, И. С. Сазонов, В. А. Ким, О. В. Билык, В. И. Василевский*

## АЛГОРИТМ СИСТЕМЫ АКТИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ДВУХКОЛЕСНОЙ МОБИЛЬНОЙ МАШИНЫ

UDC 629.113

*A. S. Melnikov, I. S. Sazonov, V. A. Kim, O. V. Bilyk, V. I. Vasilevsky*

## THE ALGORITHM OF THE SYSTEM OF ACTIVE SAFETY OF A TWO-WHEELED MOBILE MACHINE

### **Аннотация**

Рассматривается работа системы активной безопасности двухколесной мобильной машины, адаптивной к механическому приводу тормозов и представляющей собой электромеханическую систему. Принципиальной особенностью предлагаемого алгоритма системы активной безопасности является то, что в основу формирования сигналов управления положен принцип анализа величин и знаков производных, фактически реализуемых силовых факторов, возникающих в контакте колес машины с опорной поверхностью.

### **Ключевые слова:**

система активной безопасности, двухколесная мобильная машина, алгоритм управления, регулирование режимов движения, силовые факторы, повышение устойчивости и управляемости курсового движения и эффективности торможения.

### **Abstract**

The paper deals with the operation of the system of active safety of a two-wheeled mobile machine, which is an electromechanical system and is adaptive to the mechanical drive of brakes. The basic feature of the suggested algorithm of the system of active safety is the fact that the formation of control signals is based on the analysis of values and signs of derivatives, and on actually realizable force factors occurring through the contact of car wheels and the bearing surface.

### **Key words:**

active safety system, two-wheeled mobile machine, control algorithm, traffic conditions control, force factors, increase of stability and controllability of course-keeping motion and braking efficiency.

### **Введение**

Интенсивное развитие получают такие системы регулирования динамики движения мобильных машин (СРДД, международное обозначение – VDC) [1–8, 10–18], как системы BAS («Брэйк эсист» (Brake Assist)), ESP («Электроник Стабилити Программ» (Electronic Stability Program)) и др., производимые известными фирмами «Вабко» (Wabco), «Бош» (Bosch), «Лукас» (Lucas), «Гирлинг» (Girling), «Бендикс» (Bendix), «Дана» (Dana) и рядом других фирм

[5–10, 17–20]. Кроме того, наряду с повышением безопасности мобильных машин, современная система активной безопасности (САБ) решает проблему повышения их эксплуатационных качеств. Однако главной задачей практически всех САБ остается обеспечение управляемости и устойчивости движения мобильных машин в любых режимах движения.

Появление систем регулирования динамики движения автомобиля (СРДД, VDC) объясняется тем, что функции АБС и ПБС ограничивались лишь кор-

ректировкой основных порогов срабатывания. Стремление к учету в алгоритмах управления непрогнозируемых внешних воздействий привело к созданию СРДД, позволяющих автоматическую коррекцию параметров управления. Таким образом, СРДД являются дальнейшим логическим развитием АБС/ПБС, использующих в качестве источников первичной информации кинематические параметры управляемого объекта.

СРДД производит: корректировку формируемых параметров управления при произвольном движении; повышение курсовой устойчивости автомобиля путем использования максимальных боковых реакций колес по условиям их сцепления с опорной поверхностью на всех режимах движения; сохранение управляемости автомобиля путем максимального использования коэффициентов сцеплений; максимальное использование потенциала функционирования ABS и ASR.

Повышение эффективности систем активной безопасности мобильных машин привело к необходимости использования в качестве источников информации силовых факторов, возникающих в контакте колес мобильной машины с опорной поверхностью.

Основная цель работы – формирование алгоритма системы активной безопасности двухколесной мобильной машины. При этом принципиальной особенностью данного алгоритма является то, что в основу формирования сигналов управления положен принцип анализа величин и знаков производных, фактически реализуемых силовых факторов, возникающих в контакте колес машины с опорной поверхностью.

#### ***Обобщенный алгоритм системы активной безопасности двухколесной мобильной машины***

Современная система управления движением мобильных машин (СРДД или VDC) представляет собой систему с

обратной связью, главное назначение которой – сохранить курсовую устойчивость движения мобильной машины. Она объединена с тормозной системой и силовой передачей [4–10, 16–20].

Работа систем управления движением мобильных машин осуществляется на основании обобщенного алгоритма. В обобщенном алгоритме [18–22] под регулированием тормозных и тяговых сил понимается регулирование, обеспечивающее максимальное использование коэффициентов сцеплений колес двухколесной мобильной машины с опорной поверхностью. Главной задачей данного алгоритма является обеспечение курсовой устойчивости в любом режиме движения двухколесной мобильной машины, поэтому в качестве приоритетных сигналов формирования управления в алгоритме САБ [18–20] предложены отрицательные знаки производных боковых реакций колес или же отрыв любого из колес двухколесной мобильной машины. Все другие сигналы, характеризующие отрицательными знаками производных тормозных, тяговых сил, превышение нормальных реакций колес и т. д. являются второстепенными.

В обобщенном алгоритме операции регулирования в интервале времени от выключения до включения исполнительного механизма выполняются в зависимости от электромеханических свойств исполнительного механизма и характеристик опорной поверхности. Данный алгоритм предусматривает выполнение операции регулирования подачи топлива с одновременным воздействием на исполнительные механизмы.

В обобщенном алгоритме критерием формирования сигналов управления параметрами подвески двухколесной мобильной машины являются нулевые значения нормальных реакций колес или его превышение заданному значению как по модулю, так и по частоте. По существу, изменение нормальной реакции колеса на опорную поверхность представляет собой ускорение переме-

щения, а его вторая производная – эквивалент третьей производной от перемещения. Кроме того, алгоритм предусматривает частотный контроль изменения нормальных реакций колес с опорной поверхностью.

Обобщенный алгоритм предусматривает полную реализацию коэффициента сцепления колес с опорной поверхностью путем выполнения операции регулирования давления рабочей среды в тормозном приводе для ее приведения к соответствующим значениям, фактически реализуемым колесами моментам. Отметим, что для формирования сигналов управления важны не модули сил, а знаки их производных.

Рассмотрим силы и моменты, фактически реализуемые колесами двухколесной мобильной машины, которые подлежат анализу для формирования сигналов управления. Как известно, колесо движется с поступательной скоростью  $V$  под действием касательных сил  $T$ . На колесо действуют вес машины  $G$ , нормальные реакции  $N_{\text{ведущ}}$ ,  $N_{\text{ведом}}$ , касательная сила тяги  $R_k$ , боковая реакция  $R_\delta$ , тяговый момент  $M_k$  в тяговом режиме движения, в тормозном механизме – момент  $M_{\text{тор}}$  [3–4, 11–22 и др.].

Максимальные значения касательной сил  $R_\delta$ ,  $R_k$  и  $T$  ограничены нормальной реакцией  $N$  и коэффициентом сцепления  $\varphi_{\text{сц}}$  и определяются по формулам:

$$R_\delta = N \cdot \varphi_{\text{сц}} ; \quad (1)$$

$$R_k = N \cdot \varphi_{\text{сц}} ; \quad (2)$$

$$T = N \cdot \varphi_{\text{сц}} ; \quad (3)$$

$$M_k = N \cdot \varphi_{\text{сц}} \cdot r . \quad (4)$$

При угле поворота  $\alpha$  продольной оси симметрии колеса относительно своего начального положения оно совершает криволинейное движение. В зависимости от характеристик шин и скорости движения центра колеса возникает отклонение вектора скорости  $V$  центра колеса от направления продоль-

ной оси, которая характеризуется углом увода  $\delta$ . Кроме того, при криволинейном движении боковая реакция  $R_\delta$  связана с углом увода соотношением [3–4, 11–22 и др.]

$$R_\delta = k_y \cdot \delta , \quad (5)$$

где  $k_y$  – коэффициент сопротивления уводу.

Предельная величина боковой реакции  $R_\delta$  ограничена значениями  $N$  и  $\varphi_{\text{сц}}$ . Например, при превышении углом увода своего предельного значения  $\delta > N \cdot \varphi_{\text{сц}} / k_y$  последует процесс проскальзывания пятна контакта колеса в боковом направлении, что в последующем повлечет спад коэффициента сцепления как в боковом, так и в продольном направлениях. Вследствие этого в тормозном и в тяговом режимах производные  $dR_\delta/dt$  и  $dT/dt$  будут характеризоваться отрицательными знаками.

Структурная схема системы активной безопасности представлена на рис. 1.

В состав структурной схемы входят следующие элементы: силоизмерительные датчики; датчик скорости; блок управления подтормаживанием колес; блок управления подачей топлива; блок управления свойствами подвески; блок управления силовым исполнительным элементом механизма оттормаживания; блок аналого-цифрового преобразования сигналов; усилитель сигналов; микропроцессорный блок обработки информации. Состав приведенной системы активной безопасности двухколесной мобильной машины имеет некоторые особенности, отличающие её от подобных систем активной безопасности как двухколесных мобильных машин, так и от подобных систем, устанавливаемых на автомобилях. Данная система является адаптивной к механическому приводу, используемому для управления тормозными механизмами. Она может работать как с дисковыми тормозами, так и с барабанными, имеющими

механический привод. Элементы системы, отвечающие за контроль параметров движения двухколесной мобильной машины, выполнены по электрическим

схемам. Таким образом, система представляет собой электромеханическую систему без использования гидравлических элементов.

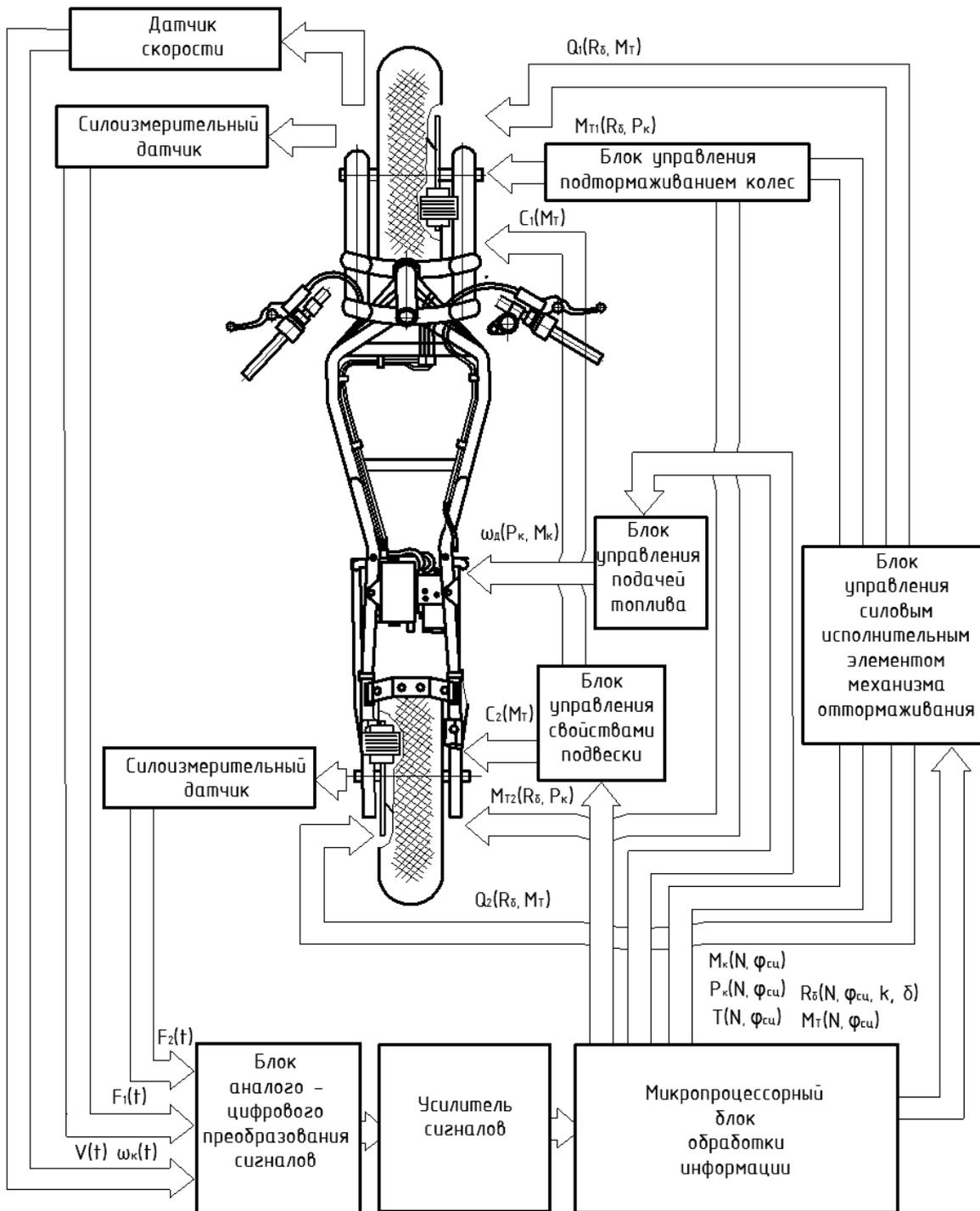


Рис. 1. Схема системы активной безопасности двухколесной мобильной машины

В связи с этим устройством, изменяющим усилия прижатия тормозных колодок к тормозному диску  $Q_{1,2}$ , является блок управления силовым исполнительным механизмом, представляющий собой тяговый магнит. Тяговый магнит, интегрированный в систему управления тормозного механизма посредством механических элементов и силовой электрической схемы управления, воздействует на механизм прижатия тормозных колодок  $Q_{1,2}$  к тормозному диску, тем самым уменьшая усилия их прижатия. Через электрическую схему управления тяговый магнит управляется микропроцессорным блоком обработки информации.

Сигналы  $F_{1,2}$  от силоизмерительных датчиков, датчика скорости  $V$ , а также информация о частоте вращения коленчатого вала двигателя  $\omega_d$ , частоте вращения колеса  $\omega_k$  проходят преобразование в блоке аналого-цифрового преобразования и после усиления обрабатываются в микропроцессорном блоке. На основании поступивших сигналов микропроцессорный блок обработки информации вычисляет значения нормальных реакций  $N_{ведущ}$ ,  $N_{ведом}$ , касательную силу тяги  $R_k$ , боковые реакции  $R_b$ , тяговый момент  $M_k$  в тяговом режиме движения, в тормозном механизме – момент  $M_{тор}$ . Проанализировав полученные значения с учетом условий движения на текущий момент времени и определив значения производных боковых реакций, микропроцессорный блок вырабатывает управляющие сигналы для блока управления силовым исполнительным элементом, блока управления подачи топлива в двигатель, блока управления подтормаживанием колес, блока управления свойствами подвески. Управляющие сигналы для блоков формируют их воздействие на тормозные механизмы, подвеску и двигатель с целью достижения оптимальных значений касательной силы тяги  $R_k$ , боковых реакций  $R_b$ , тягового момента  $M_k$  и тормозного момента  $M_{тор}$ . В связи с тем,

что управление движением осуществляется двухколесной мобильной машиной, для которой высока вероятность опрокидывания при потере устойчивости движения, необходимо учитывать скорость движения машины и возникающие при этом гироскопические моменты.

Схема обобщенного алгоритма системы активной безопасности двухколесной мобильной машины представлена на рис. 2.

Принципиальной особенностью предлагаемого алгоритма является то, что в основу формирования сигналов управления положен принцип анализа величин и знаков производных, фактически реализуемых силовых факторов, возникающих в контакте колес машины с опорной поверхностью, а не кинематических параметров колес, которые являются следствиями силовых воздействий.

При всем многообразии факторов, оказывающих воздействие на управляемую машину, предыдущие исследования [18–22] показали, что существуют определенные закономерности изменения некоторых силовых факторов. Установление закономерностей изменения силовых факторов весьма важно для анализа соответствующих групп сил, характер изменения которых оказывает наиболее существенное влияние на кинематические параметры движения двухколесной мобильной машины.

Использование внешних силовых факторов, нормальных реакций опорной поверхности на колеса, тормозных моментов, внутренних силовых факторов, усилия прижатия тормозных колодок к тормозному диску позволяет прийти к созданию систем следящего регулирования торможением двухколесной мобильной машины [18–22].

Обобщенный алгоритм предусматривает работу системы активной безопасности в тормозном, тяговом и транспортном режимах после измерения сигналов:  $Q$  – усилия прижатия тормозных колодок к тормозному диску;  $V$  –

скорости движения;  $P_k$  – касательной силы тяги;  $\omega_d$  – частоты вращения двигателя,  $\omega_k$  – частоты вращения колеса;  $N_i$  – нормальных реакций;  $F_{1,2}$  – силоиз-

мерительных датчиков;  $R_b$  – боковых сил;  $M_i$  – момента, существующего в данное время.

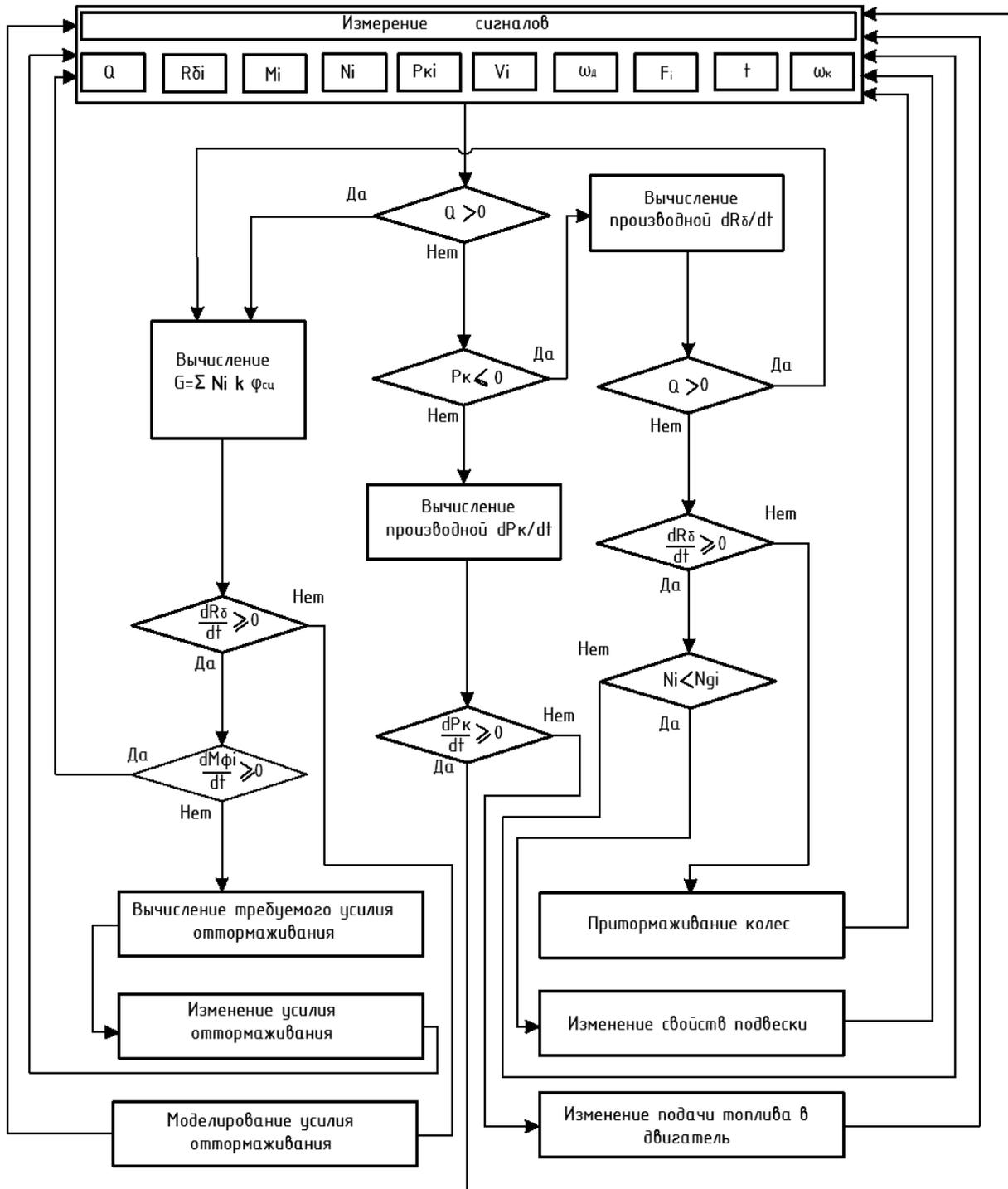


Рис. 2. Схема обобщённого алгоритма системы активной безопасности двухколесной мобильной машины

После сбора исходных данных, необходимых для работы системы, получаемых измерением и вычислением величин, приведенных выше, определяется значение усилия прижатия тормозных колодок к тормозному диску  $Q$ .

В зависимости от режима движения величина усилия прижатия тормозных колодок к тормозному диску  $Q$  может изменять свое значение. При наличии положительного значения  $Q$  система активной безопасности работает по той части алгоритма, работа которой обеспечивает устойчивое движение машины в режиме торможения.

Иначе говоря, признаком начала торможения является появление сигналов от датчиков контроля усилия прижатия тормозных колодок к тормозному диску и датчиков фактически реализуемого тормозного момента. При этом операцию регулирования двигателем прекращают, и цикл управления переходит на обработку сигналов фактически реализуемых колесами тормозных моментов и боковых реакций. В результате обработки сигналов устанавливают знаки производных от боковых реакций. При отрицательных производных осуществляют операции автоматического изменения усилия оттормаживания с помощью блока силового исполнительного элемента, показанного на рис. 1. Для этого вычисляется производная  $dR_{\phi}/dt$ ; при ее отрицательных знаках производится моделирование усилия оттормаживания. В противном случае осуществляют операции регулирования усилия оттормаживания по способу следящего регулирования торможением. При этом решается проблема полной диссипации кинетической энергии в самом тормозном механизме, а не в контакте колес с опорной поверхностью. После каждого расчета усилия оттормаживания осуществляют проверку знака производной тормозного момента. Производится вычисление производной  $dM_{\phi i}/dt$  и в случае отрицательного значения определяется необходимое уси-

лие оттормаживания, которое изменяется блоком управления силовым исполнительным элементом, управляемым через силовую электрическую схему микропроцессорным блоком, показанным на рис. 1. При положительном значении производной  $dM_{\phi i}/dt$  информация поступает в блок сбора исходных данных для анализа существующих условий движения.

Значение усилия прижатия тормозных колодок к тормозному диску  $Q$  учитывается системой для обеспечения устойчивого движения машины на всех режимах движения.

При отсутствии усилия прижатия тормозных колодок к тормозному диску  $Q$  выполняется вычисление и анализ касательной силы тяги  $P_k$ . При ее положительных значениях производится вычисление производной  $dP_k/dt$ . При отрицательных значениях производной выполняется регулирование подачи топлива в двигатель. Регулирование позволяет, в первую очередь, предотвратить потерю устойчивости движения машины в случае превышения значений  $P_k$  допустимых значений по условиям сцепления с опорной поверхностью и, как следствие, буксование ведущего колеса и занос транспортного средства, а также уменьшить расход топлива. После выполнения операции ограничения подачи топлива в двигатель производится проверка наличия тормозного момента и усилия прижатия тормозных колодок к тормозному диску. При равенстве нулю указанных параметров продолжается проверка знака производной боковых реакций. Если имеет место отрицательный знак производной, операция ограничения подачи топлива в двигатель повторяется.

При положительном значении производной  $dP_k/dt$  информация поступает в блок сбора исходных данных для анализа существующих условий движения.

Для значений  $P_k \leq 0$  производится вычисление производной  $dR_{\phi}/dt$ , затем анализируется значение  $Q$ , и в случае положительного значения система работает

по алгоритму, соответствующему случаю торможения мобильной машины.

При движении двухколесной мобильной машины силоизмерительные датчики производят непрерывное измерение нормальных реакций колес на опорную поверхность. Сигналы от датчиков поступают на микропроцессорный блок, где подвергаются обработке, и формируется сигнал управления.

Если усилия прижатия тормозных колодок к тормозному диску отсутствуют, анализируется значение производной  $dR_6/dt$  и при положительном либо равном нулю значении оценивается текущее значение нормальной реакции  $N_i$ . Для случая, когда текущее значение  $N_i$  меньше допустимого значения нормальной реакции по условиям сцепления  $Ng_i$ , осуществляется изменение свойств подвески. Регулирование характеристик подвесок производят путем изменения коэффициентов жесткости, демпфирования известными способами. Для случая равенства либо превышения текущего значения  $N_i$  допустимого значения нормальной реакции по условиям сцепления  $Ng_i$  информация поступает в блок исходных для анализа существующих условий движения и принятия управляющих решений.

### **Выводы**

Проведенные исследования, разработанные теоретические положения, методы расчета и конструкции [18–22] систем активной безопасности мобильных машин позволили сформулировать алгоритм системы активной безопасности двухколесной мобильной машины. Рассматриваемая система дает возможность управлять движением мобильной машины в тяговом, транспортном и тормозном режимах движения. При этом система активной безопасности является адаптивной к механическому приводу тормозов и представляет собой электромеханическую систему, объединенную с тормозной системой и силовой передачей.

В обобщенном алгоритме под регулированием тормозных и тяговых сил понимается регулирование, обеспечивающее максимальное использование коэффициентов сцеплений колес двухколесной мобильной машины с опорной поверхностью.

Главной задачей обобщенного алгоритма является обеспечение курсовой устойчивости в любом режиме движения двухколесной мобильной машины, поэтому в качестве приоритетных сигналов формирования управления в алгоритме САБ предложены отрицательные знаки производных боковых реакций колес или же отрыв любого из колес двухколесной мобильной машины. Все другие сигналы, характеризующиеся отрицательными знаками производных тормозных, тяговых сил, превышение нормальных реакций колес и т. д. являются второстепенными.

В обобщенном алгоритме операции регулирования в интервале времени от выключения до включения исполнительного механизма выполняются в зависимости от электромеханических свойств исполнительного механизма и характеристик опорной поверхности. Данный алгоритм предусматривает выполнение операции регулирования подачи топлива с одновременным воздействием на исполнительные механизмы, причем приоритетным сигналом формирования сигналов управления является отрицательный знак производной боковой реакции или отрыв любого из колес.

В обобщенном алгоритме критерием формирования сигналов управления параметрами подвески АТС являются нулевые значения нормальных реакций колес или его превышение заданному значению как по модулю, так и по частоте. По существу, изменение нормальной реакции колеса на опорную поверхность представляет собой ускорение перемещения, а его вторая производная – эквивалент третьей производной от перемещения. Кроме того, алгоритм предусматривает частотный кон-

троль изменения нормальных реакций колес с опорной поверхностью.

Обобщенный алгоритм предусматривает полную реализацию коэффициента сцепления колес с опорной поверхностью путем выполнения операции регулирования усилий прижатия тормозных колодок к тормозному диску для их приведения к соответствующим значениям, фактически реализуемым колесами моментам, при этом для фор-

мирования сигналов управления важны не модули сил, а знаки их производных.

Принципиальной особенностью алгоритма системы активной безопасности является то, что в основу формирования сигналов управления положен принцип анализа величин и знаков производных, фактически реализуемых силовых факторов, возникающих в контакте колес машины с опорной поверхностью.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тормозные системы. Понятия и определения [Электронный ресурс] : справочник / BOSCH B2B PORTAL. – М., 2010. – Режим доступа : <http://www.bosch.ru>.
2. **Ломако, С. И.** Автоматизация процесса торможения автомобиля : учеб. пособие / С. И. Ломако, Е. М. Гецович. – Киев : УМК ВО, 1988. – 88 с. : ил.
3. **Антонов, Д. А.** Теория устойчивости движения многоосных автомобилей / Д. А. Антонов. – М. : Машиностроение, 1978. – 216 с.
4. **Диваков, А.** Активная подвеска и «интеллектуальные» тормоза / А. Диваков, О. Растегаев // Автореф. – 2001. – № 1. – С. 8–11.
5. **Bleckman, H.** Traction control system with Teves ABS Mark II / H. Bleckman // SAE Technical Paper Series, 860506. – 1995. – № 78. – P. 9.
6. **Buchholz, K.** Borg Warner 4WD on Acura SUV / K. Buchholz // Automotive engineering. – 2000. – № 11. – P. 109.
7. **Burckhardt, M.** Bremsdynamische Untersuchungen von Fahrzeugen mit fester und abgeknickter Bremskraftverteilung / M. Burckhardt, E. G. von Glasner // Automobiltechnische Zeitschrift. – 1974. – Bd. 76, № 7. – S. 230–235.
8. **Пат. 2009 / 135658 WO, МПК F 16 D 55 / 22, F 16 D 55 / 226, F 16 D 55 / 228.** Hydraulic disc brake and method for controlling the same / E. Baumgartner, J. Pericevic ; Knorr-Bremse Systeme fuer Nutzfahrzeuge GmbH ; заявл. 06.05.09 ; опубл. 12.11.09. – 17 с.
9. **Gaus, H.** ASD, ASR und 4 Matic: Drei Systeme im «Konzept Active Sicherheit» von Daimler Benz / H. Gaus, H.-J. Schopf // ATZ. – 1986. – Vol. 88, № 5/6. – S. 273–284.
10. **Пат. 2008 / 080962 WO, МПК F 16 D 55 / 2265, F 16 D 65 / 54, F 16 D 65 / 14.** Disc brake, particularly for a commercial vehicle / E. Baumgartner, J. Pericevic ; Knorr-Bremse Systeme fuer Nutzfahrzeuge GmbH ; заявл. 28.12.07 ; опубл. 10.07.08. – 26 с.
11. **Бухарин, Н. А.** Тормозные системы автомобилей / Н. А. Бухарин. – М. : Машгиз, 1950. – 130 с.
12. **Вонг, Дж.** Теория наземных транспортных средств / Дж. Вонг. – М. : Машиностроение, 1982. – 282 с.
13. **Гредескул, А. Б.** Выбор соотношения тормозных сил на осях седельного тягача и полуприцепа / А. Б. Гредескул // Автомобильная промышленность. – 1963. – № 8. – С. 8–10.
14. **Литвинов, А. С.** Управляемость и устойчивость автомобиля / А. С. Литвинов. – М. : Машиностроение, 1971. – 415 с. : ил.
15. **Ревин, А. А.** Автомобильные автоматизированные тормозные системы. Техническое решение, теория, свойства / А. А. Ревин. – Волгоград : Ин-т качества, 2002. – 320 с.
16. **Фрумкин, А. К.** Современные антиблокировочные и противобуксовочные системы грузовых автомобилей, автобусов и прицепов : обзорная информация / А. К. Фрумкин, А. И. Попов, И. И. Апышев. – М. : ЦНИИТЭИ-автопром, 1990. – 56 с.
17. **Чудаков, Д. А.** Основы теории и расчета автомобилей и тракторов / Д. А. Чудаков. – М. : Колос, 1972. – 384 с. : ил.
18. **Мельников, А. С.** Системы активной безопасности двухколесных транспортных средств / А. С. Мельников, В. А. Ким, И. С. Сазонов // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2010. – № 4. – С. 37–45.
19. **Пат. 4778 ВУ, МПК В 60 Т 8 / 00.** Антиблокировочная система мотоцикла / А. С. Мельников [и др.] ; заявитель и патентообладатель Белорус.-Рос. ун-т. – № 20080101 ; заявл. 14.02.08 ; опубл. 30.10.08. – 4 с. : ил.

20. **Сазонов, И. С.** Динамика колесных машин / И. С. Сазонов, П. А. Амельченко, В. А. Ким. – Могилев : Белорус.- Рос. ун-т, 2006. – 461с.

21. **Ким, В. А.** Методология создания адаптивных САБ АТС на основе силового анализа / В. А. Ким. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2003. – 346 с.

22. Тормозные системы колесных машин / И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев : Белорус.- Рос. ун-т, 2011. – 351 с.

*Статья сдана в редакцию 1 октября 2012 года*

**Александр Сергеевич Мельников**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0222-22-11-93.

**Игорь Сергеевич Сазонов**, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0222-26-61-00.

**Валерий Андреевич Ким**, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0222-26-33-71. E-mail: f\_av@bru.mogilev.by.

**Ольга Валерьевна Билык**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. E-mail: f\_av@bru.mogilev.by.

**Валерий Иванович Василевский**, генеральный директор, ОАО «Могилевоблавтотранс». Тел.: 8-0222-46-72-59. E-mail: abltrans@bru.mogilev.by.

**Aleksandr Sergeevich Melnikov**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Tel.: 8-0222 22-11-93.

**Igor Sergeevich Sazonov**, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. Tel.: 8-0222-26-61-00.

**Valery Andreyevich Kim**, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. Tel.: 8-0222-26-33-71. E-mail: f\_av@bru.mogilev.by.

**Olga Valeryevna Bilyk**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. E-mail: f\_av@bru.mogilev.by.

**Valery Ivanovich Vasilevsky**, General Director, ОАО «Mogilevoblavtotrans». Tel.: 8-0222-46-72-59. E-mail: abltrans@bru.mogilev.by.

---

УДК 621.75

*А. П. Минаков, И. Д. Камчицкая, Е. В. Ильюшина, Н. М. Юшкевич*

**СОВРЕМЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ИМПУЛЬСНО-УДАРНОЙ ПНЕВМОВИБРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

---

UDC 621.75

*A. P. Minakov, I. D. Kamchitskaya, E. V. Ilyushina, N. M. Yushkevich*

**MODERN DESIGNS OF TOOLS FOR STRENGTHENING PULSE-IMPACT-PNEUMO-VIBRO-DYNAMIC TREATMENT OF FLAT SURFACES**

---

**Аннотация**

В работе систематизирован и обобщен положительный опыт, достигнутый в результате создания и апробации новых инструментов для упрочняющей импульсно-ударной пневмовибродинамической обработки плоских поверхностей, у которых в качестве среды под давлением использован сжатый воздух.

**Ключевые слова:**

упрочнение поверхности, импульсно-ударная пневмовибродинамическая обработка плоских поверхностей, эксплуатационные свойства, производительность, шероховатость, звуковое давление, подача.

**Abstract**

The paper systematizes and generalizes a positive experience gained while developing and testing new tools employed for strengthening pulse-impact-pneumo-vibro-dynamic treatment of flat surfaces, which use compressed air as a medium under pressure.

**Key words:**

surface strengthening, pulse-impact-pneumo-vibro-dynamic treatment of flat surfaces, operating ability, productivity, roughness, sound pressure, feed.

---

Улучшение эксплуатационных свойств обработанной поверхности неразрывно связано с созданием новых эффективных технологий и надежных инструментов, что позволяет повысить ресурс работы различных изделий, необходимых для поддержания их работоспособности. Это может относиться к снижению расходов средств при капитальном ремонте направляющих станин металлорежущих станков, а также к финишной упрочняющей обработке плоских поверхностей изделий основного производства.

Необходимость упрочняющей обработки различных конфигураций пло-

ских поверхностей пар трения, а также повышения их износостойкости за счет создания на поверхности луночного микрорельефа, увеличивающего маслоемкость, привела к созданию значительного количества новых технических решений конструктивных схем инструментов для импульсно-ударной пневмовибродинамической обработки, в основе которой лежит механизм импульсного воздействия рабочих элементов (шаров) на обрабатываемую поверхность. Так, например, инструмент (рис. 1) состоит из оправки 1 с корпусом 2, в котором расположены приводящие 3 и деформирующие элементы 4 (шары). Оба коль-

цеобразных ряда шаров зафиксированы в камере посредством диска 5 и стакана 6. В стакане 6 выполнены сопла (не пока-

заны), предназначенные для направления струй сжатого воздуха на приводящие шары 3.

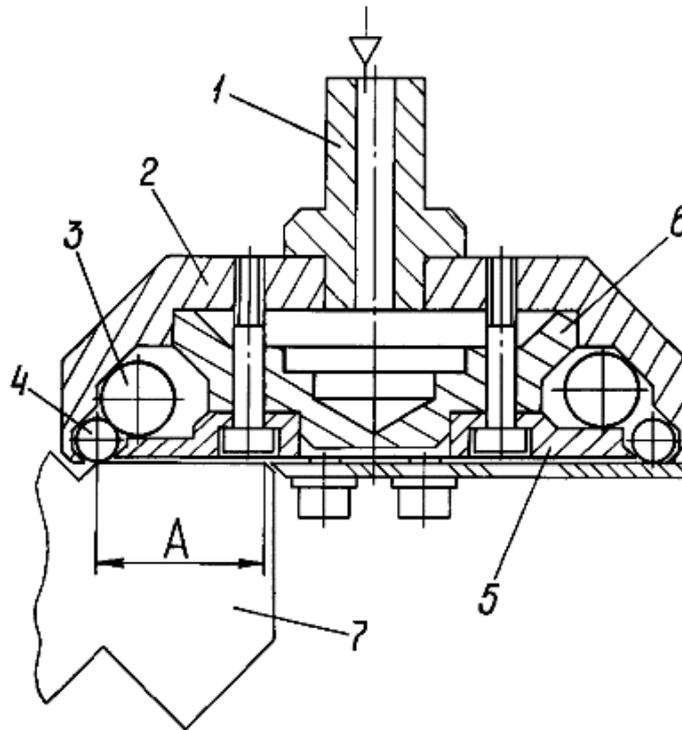


Рис. 1. Инструмент для пневмовибродинамической обработки плоских поверхностей [1]

Шары имеют многоосное вращение относительно собственного центра масс и перемещение в турбулентном кольцевом потоке сжатого воздуха. Разнонаправленное силовое воздействие шаров на исходный микрорельеф способствует созданию благоприятных пластических сдвигов слоев металла и его деформационному упрочнению.

При обработке плоских поверхностей 7, ширина которых меньше диаметра расположения центров деформирующих шаров 4 (размер А), значительную часть кинетической энергии приводящие шары 3 расходуют на соударения с деформирующими шарами вне зоны обработки (рис. 2), что увеличивает к тому же их износ. В связи с этим относительно низкая скорость приводящих шаров не позволяет им развить значительную центробежную силу и, соот-

ветственно, увеличить силу и частоту их ударов по деформирующим шарам.

Для исключения соударения приводящих шаров с деформирующими в холостой зоне в конструкцию инструмента были внесены изменения [2]. Было решено участок дорожки качения приводящих шаров, расположенный вне зоны обработки (холостая зона), выполнить в плоскости, исключаяющей контакт приводящих и деформирующих шаров. Для этого диск 5 выполнен со специальным профилем: на нем предусмотрен участок с углом подъема  $\alpha$  (рис. 3), в результате чего приводящие шары 3 при переходе с рабочей зоны инструмента в холостую приподнимаются над деформирующими шарами 4, в итоге их контакт исключается, и КПД инструмента повышается.

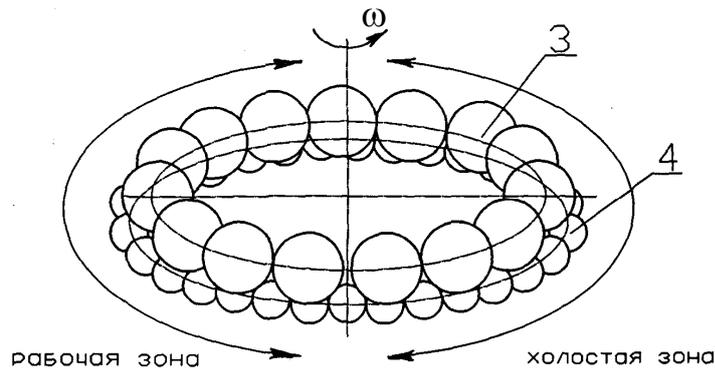


Рис. 2. Схема движения приводящих (3) и деформирующих (4) шаров в кольцевой камере инструмента [1]

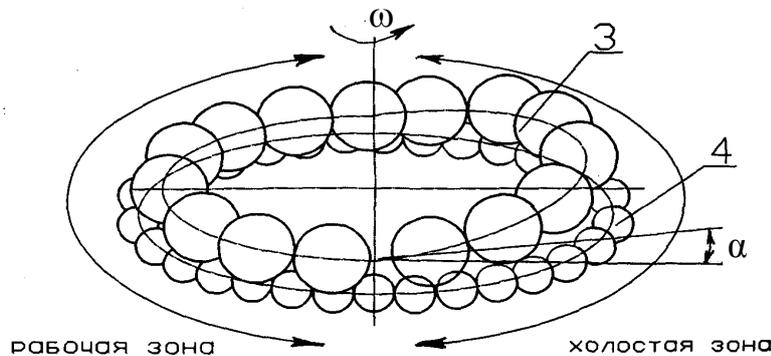


Рис. 3. Схема движения приводящих (3) и деформирующих (4) шаров в кольцевой камере инструмента [2]

Однако у такой конструкции инструмента появляется недостаток: она не позволяет развить до максимума центробежную силу приводящим шаром 3 и, соответственно, силу и частоту их ударов по деформирующим шарам. Это обусловлено тем, что траектория движения приводящих шаров перестала быть окружностью.

Устранение этого недостатка стало возможным с разработкой конструкции инструмента [3]. Поставленная задача была решена тем, что вне зоны обработки контакт приводящих и деформирующих шаров исключен. Для этого траектория движения приводящих шаров выполнена в виде окружности, а

траектория движения деформирующих шаров отлична от окружности (радиус расположения деформирующих шаров  $R$  в рабочей зоне меньше радиуса расположения деформирующих шаров  $R_1$  в холостой зоне) (рис. 4).

Кроме конструкции накатника, был усовершенствован и сопловый аппарат. Вместо сопел Вентури (цилиндрических) с коэффициентом расхода  $\varphi = 0,815$ , коэффициентом потерь напора струи сжатого воздуха  $\eta = 0,335$  (потери составляют 33,5 %) применены конические сопла с  $\varphi = 0,92$  и  $\eta = 0,02$ . Также были подведены сопла к деформирующим шарам, что позволило повысить их скорость вращения. В результа-

те разработан инструмент (см. рис. 4), для которого КПД, учитывающий аэродинамические параметры, составил 5,7 %, что на 21 % выше, чем у предыдущего инструмента (4,5 %). Исключе-

ние контакта приводящих с деформирующими шарами в холостой зоне позволило повысить общий КПД инструмента до 26 % (КПД предыдущего инструмента составил 19 %).

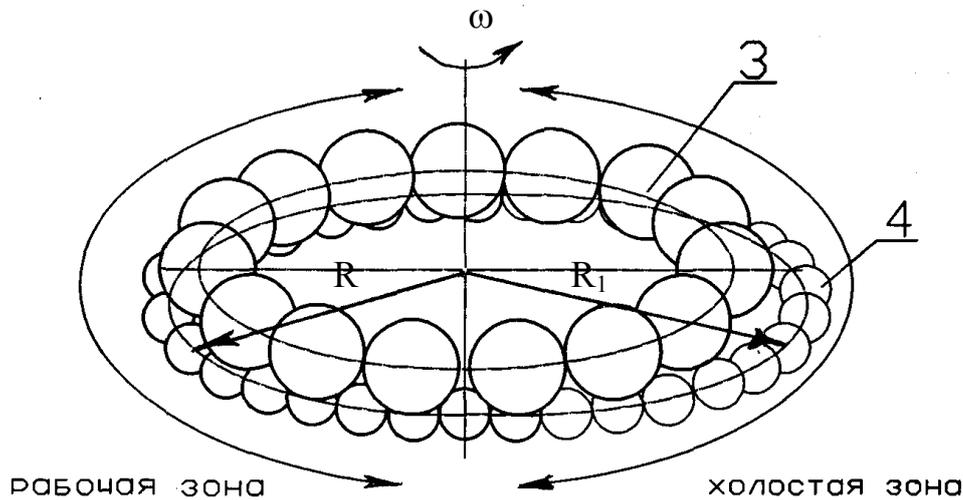


Рис. 4. Схема движения приводящих (3) и деформирующих (4) шаров в кольцевой камере инструмента [3]

Производительность обработки оценивали для конструкций инструментов (см. рис. 2 и 3) по соотношению подачи  $S$ , мм/мин, и плотности расположения лунок (табл. 1 и 2), а также учитывали значения параметров шероховатости  $R_a$ , мкм (рис. 5 и 6).

Показатели, представленные в табл. 1 и на рис. 5 (кривая 1), получены при обработке заготовок из серого чугуна

марки СЧ21 ГОСТ 1412-85. Шероховатость исходной поверхности заготовки после шлифования  $R_a = 0,4 \dots 0,6$  мкм.

Показатели, представленные в табл. 2 и на рис. 5 (кривая 2), получены при обработке заготовок из серого чугуна марки СЧ20 ГОСТ 1412-85. Шероховатость исходной поверхности заготовки после шлифования  $R_a = 1,1 \dots 1,25$  мкм.

Табл. 1. Плотность распределения лунок по обрабатываемой поверхности в зависимости от подачи при давлении сжатого воздуха 0,4 МПа для инструмента [1]

Подача $S$ , мм/мин	Плотность распределения лунок, %
40...112	100
112...315	80
315...450	30
450...500	15

Табл. 2. Плотность распределения лунок по обрабатываемой поверхности в зависимости от подачи при давлении сжатого воздуха 0,2 МПа для инструмента [2]

Подача S, мм/мин	Плотность распределения лунок, %
50...125	100
125...160	80
160...250	60
250...400	50
400...500	30

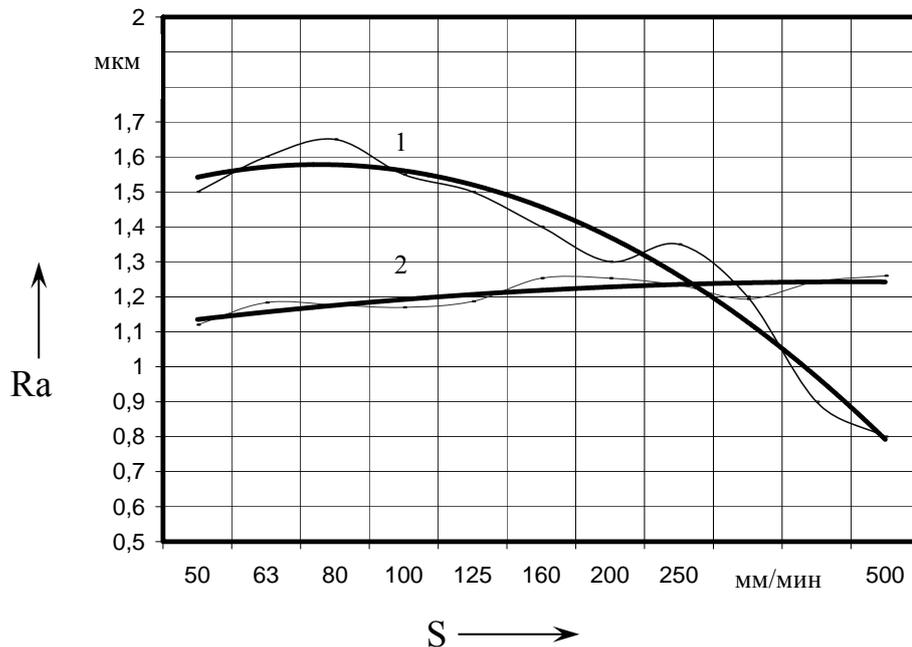


Рис. 5. Зависимость шероховатости обработанной горизонтальной поверхности от величины подачи: 1 – для инструмента [1], давление сжатого воздуха 0,4 МПа; 2 – для инструмента [2], давление сжатого воздуха 0,2 МПа

С помощью экспериментальных исследований конструкции инструмента (см. рис. 3) установлено, что внесенные изменения позволили обеспечить сочетание наименьшего расхода воздуха (расход сжатого воздуха уменьшился в 2,5 раза) с наибольшей скоростью вращения шаров (производительность повысилась в 1,2 раза) при сниженном давлении сжатого воздуха в 2 раза.

При работе пневматическими инструментами возникает аэродинамический шум в результате истечения сжатого воздуха через сопла, а также при

обтекании им поверхностей тел приводящих шаров, движущихся под действием воздуха в камере расширения. Сравнение шумовых характеристик инструмента (см. рис. 2) и инструмента, в конструкцию которого внесены изменения (см. рис. 3), приведено на рис. 6.

Уровень звукового давления для инструмента (см. рис. 3) на среднегеометрической частоте 1000 Гц уменьшился и не превышает санитарной нормы. Объясняется это прежде всего тем, что изменения, внесенные в конструкцию инструмента, позволяют получать

требуемое качество обрабатываемой поверхности при давлении сжатого воздуха 0,15 МПа, что в 2 раза ниже по

сравнению с неусовершенствованным инструментом.

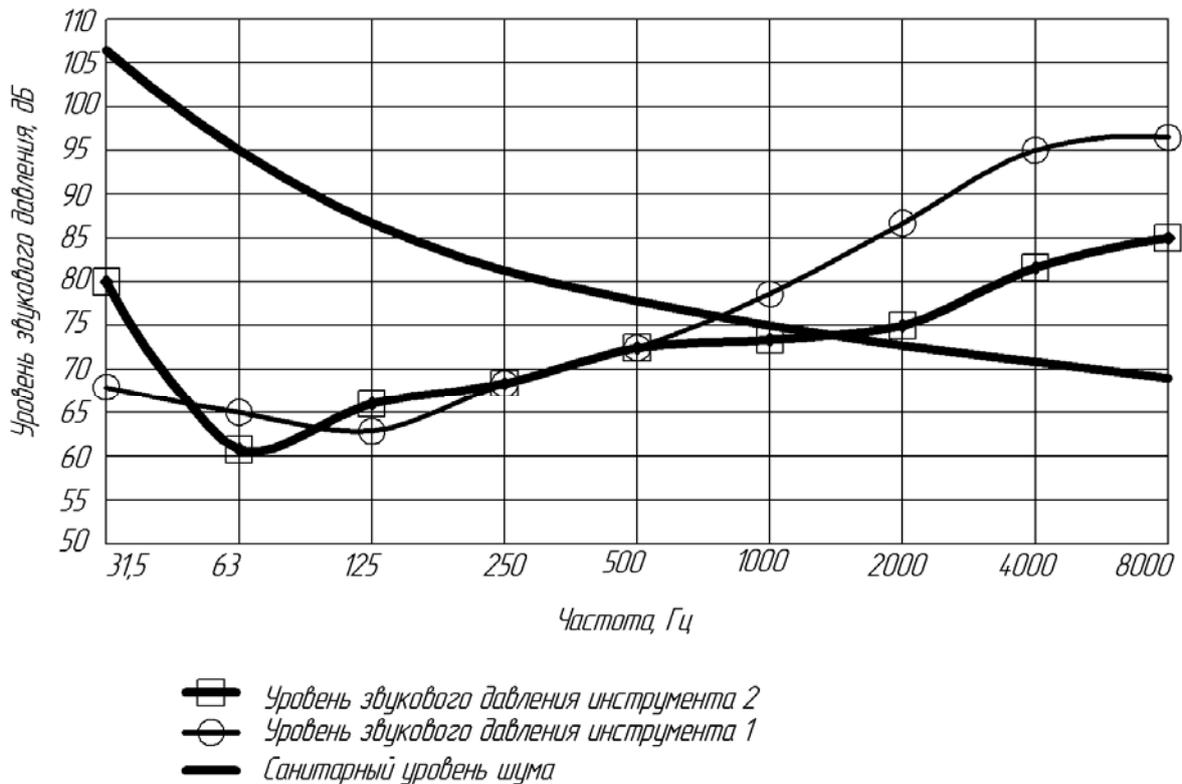


Рис. 6. Шумовые характеристики инструментов для импульсно-ударной пневмовибродинамической обработки плоских поверхностей

Дальнейшее развитие конструкции инструмента для пневмовибродинамической обработки плоских поверхностей представлено на рис. 7.

Инструмент состоит из оправки 1 с корпусом 2, в котором расположены приводящие 3 и деформирующие 4 шары. Оба кольцевых ряда шаров зафиксированы в камере посредством корпуса 2, диска 5 и стакана 6 с помощью крепежных винтов 7. В стакане 6 расположены сопла 8, направленные в сторону вращения деформирующих шаров 4. Сопряжение внутренних поверхностей корпуса 2 и стакана 6 кольцевой камеры выполнено призматической формы с углом  $\alpha$ . Инструмент оснащен экраном 9 для перемещения вне зоны обработки деформирующих шаров 4.

Представленная схема инструмента имеет сходство со своими предшественниками, однако динамика процесса обработки существенно отличается. В ранних схемах инструментов приводящие шары располагались в кольцевой камере свободно и в процессе работы соударялись с деформирующими шарами, отскакивали от них и наносили удары по той поверхности стакана, в которой выполнены сопла. В результате этого металл наволакивался на проходные отверстия сопел, уменьшая проходное сечение для сжатого воздуха, а соответственно, и мощность воздушного потока, что негативно влияло на стабильность технологического процесса. В данной схеме перемещение приводящих шаров в кольцевой камере ограничено

шириной  $b$ , близкой к их диаметру, а при отскоке от деформирующих шаров приводящие перемещаются по призматической направляющей с углом  $\alpha$ , ко-

торая исключает контакт приводящих шаров с поверхностью стакана, в которой выполнены сопла.

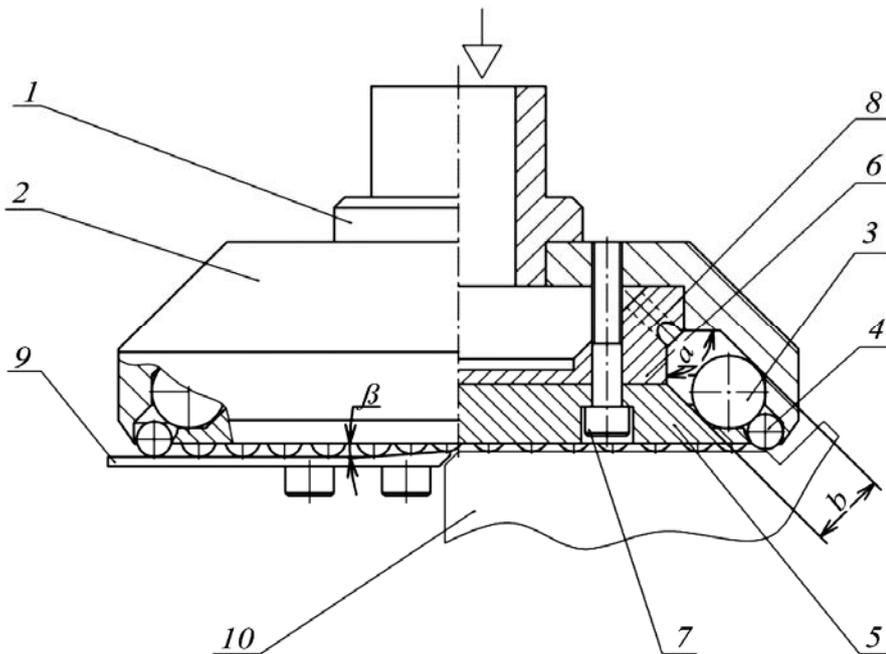


Рис. 7. Конструктивная схема инструмента для пневмовибродинамической обработки плоских поверхностей [4]

В некоторых ранних схемах инструментов исключался контакт приводящих и деформирующих шаров вне зоны обработки, однако в конструкции данных инструментов присутствовали нетехнологичные шары в кольцевой камере со сложным профилем. В представленной на рис. 4 схеме инструмента также отсутствуют нетехнологичные шары, а часть горизонтальной плоскости экрана выполнена на расстоянии от корпуса, обеспечивающем перемещение по ней деформирующих шаров, но исключаящим их контакт с приводящими шарами. Деформирующие шары при входе в зону обработки под углом  $\beta$  приподнимаются по наклонной плоскости, выполненной на экране.

Также исполнение инструмента позволяет упростить конструкцию, по-

высить надежность, стойкость шаров, производительность, стабильность и качество обработки.

Несмотря на существенные усовершенствования рассмотренных конструкций инструмента, проблемными остались вопросы повышения производительности обработки и снижения уровня звукового давления.

Все предыдущие конструкции инструментов разрабатывались на основе теории «косого удара». В [6] были проведены исследования по поведению силы удара  $N$  в зависимости от угла  $\alpha$  между направляющей поверхностью и нормалью к обрабатываемой поверхности. На рис. 8 показаны две рассматриваемые схемы воздействия сил на шары инструмента и обрабатываемую поверхность. На первой схеме представлен

«косой удар» –  $\beta \neq 0$ ; на второй «прямой удар» –  $\beta = 0$ .

Исследования показали, что сила удара достигает максимума при выполнении условия  $\alpha = \gamma$ , где  $\gamma$  – угол между осью сопел и нормалью к обрабатываемой

поверхности. Таким образом, наибольшую силу удара деформирующий шар получает в контакте с приводящим шаром под углом  $90^\circ$  к обрабатываемой поверхности.

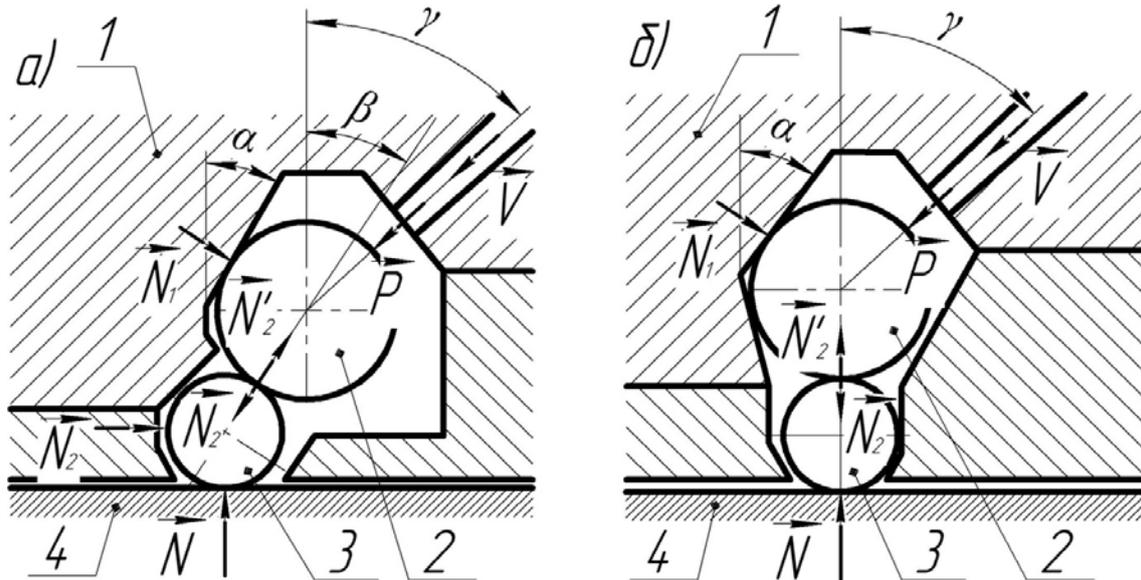


Рис. 8. Схемы воздействия сил на шары инструмента и обрабатываемую поверхность: а –  $\beta \neq 0$ , б –  $\beta = 0$ ; 1 – направляющая поверхность; 2 – шар-ударник; 3 – боек (шар); 4 – обрабатываемая поверхность

Для поиска оптимального угла  $\alpha$  был использован метод сканирования для исследования поведения силы удара  $N$ . Приняли  $N = N_2 = P \cdot (\cos \alpha + \sin \gamma \operatorname{tg} \alpha)$  или  $N = P / \cos \alpha$ . На рис. 9 показана зависимость силы воздействия  $N$  от угла  $\alpha$  между направляющей поверхностью и нормалью к обрабатываемой поверхности.

Таким образом, оптимальным является угол, значения которого находятся в промежутке  $0^\circ < \alpha < 30^\circ$ .

Конструктивная схема инструмента, решающая упомянутые выше проблемы, представлена на рис. 10.

Инструмент оснащен пневматическим роторным двигателем и имеет принципиально новую динамику процесса обработки.

Инструмент состоит из полого вала 1, на котором с помощью винтов 2 установлены корпус 3 и соплоаппарат 4.

В корпусе 3 выполнены резьбовые отверстия для установки штуцера 5 и пневмоглушителей 6. На вал 1 посредством шарикоподшипников установлен диск 7 с выполненными в нем отверстиями для размещения приводящих шаров 8 и лопатками 9. В соплоаппарате 4 выполнены сопла 10, предназначенные для направления струй сжатого воздуха на лопатки диска 9. Для удержания приводящих шаров в корпусе диска 7 при помощи винтов 11 установлено кольцо 12. Кольцевой ряд деформирующих шаров 13 зафиксирован в камере посредством крышки 14 и стакана 15. В крышке 14 выполнены отверстия 18 для подвода сжатого воздуха к тангенциальным соплам 19, которые направлены на деформирующие шары 13. Для подвода сжатого воздуха к приводящим шарам в полом валу 1 выполнены радиальные отверстия 16,

а в диске 7 – система воздушных каналов 17. Инструментом обрабатывают

заготовку 20.

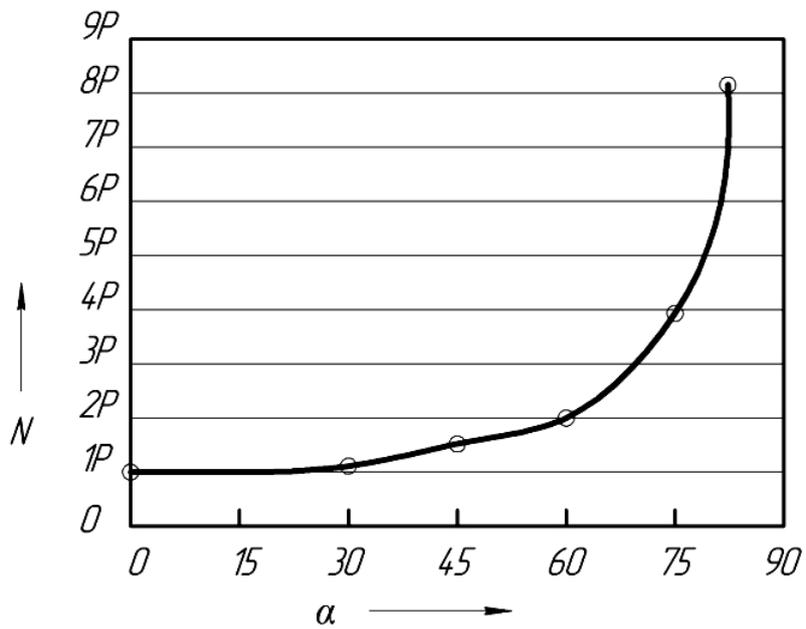


Рис. 9. График зависимости воздействия силы  $N$  от значения угла  $\alpha$

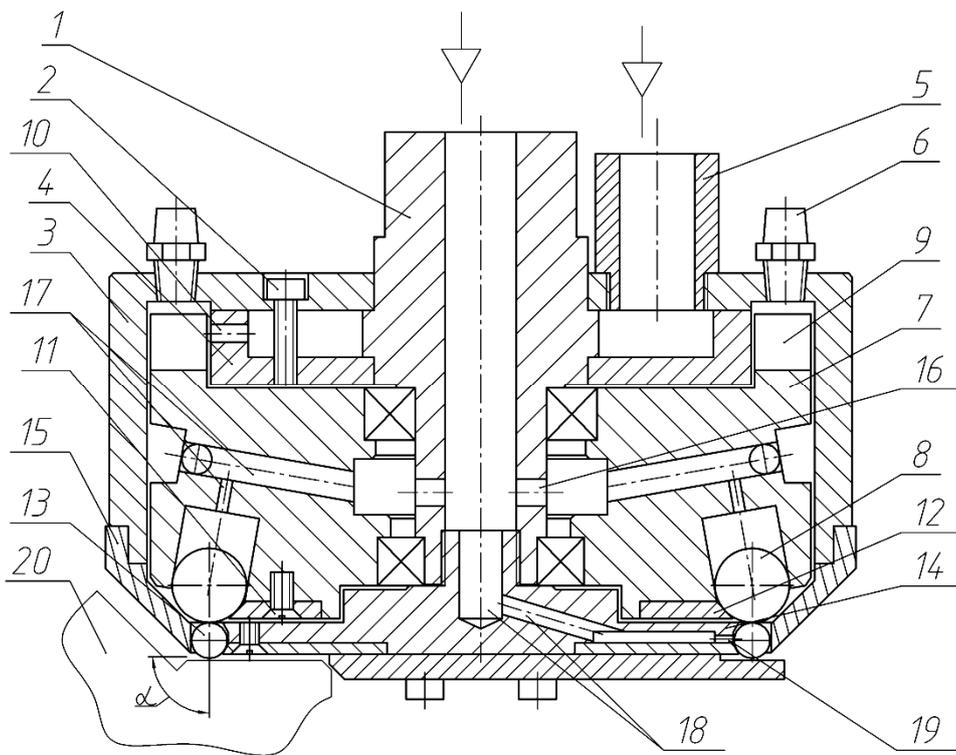


Рис. 10. Конструктивная схема инструмента [5]

В отличие от прежних моделей перемещение приводящих шаров осуществляется совместно с диском, в котором для них выполнены локальные гнезда. Вращение диска осуществляется струями сжатого воздуха, направляемого соплами на лопатки диска. В диске выполнена система отверстий для подвода сжатого воздуха к приводящим шарам. Для замедления вращения деформирующих шаров сжатый воздух подается в дополнительные тангенциальные сопла, оси которых размещены в плоскости расположения центров деформирующих шаров и направлены в сторону, противоположную осям основных сопл.

Для более эффективного использования энергии удара и исключения ударов деформирующих шаров о боковую стенку инструмента приводящие и деформирующие шары контактируют в рабочей зоне под углом  $\alpha > 90^\circ$  к обрабатываемой поверхности.

Инструмент работает следующим образом.

Инструмент подводят к обрабатываемой заготовке 20 (например, направляющей станины), установленной на столе станка, и сообщают перемещение вдоль обрабатываемой плоской поверхности. Включают подачу сжатого воздуха. Под действием сжатого воздуха, подводимого от системы питания (не показана) через штуцер 5, сопла 10 на лопатки 9, диск 7 вместе с приводящими элементами 8 начинает совершать вращение вокруг оси полого вала 1, при этом приводящие элементы под действием центробежной силы прижимаются к деформирующим.

Вращение диска 7 совместно с приводящими элементами 8 обеспечи-

вает не только их высокую скорость, но и большую силу удара по деформирующим элементам 13 с учетом массы диска. Это позволит повысить производительность обработки и увеличить глубину наклепа металла.

Отработавший поток сжатого воздуха направляется к глушителям 6. Для увеличения усилия прижатия и охлаждения зоны обработки к приводящим элементам предусмотрена подача сжатого воздуха, подводимого через осевой канал вала 1, радиальные отверстия 16 и систему воздушных каналов 17. Для замедления вращения деформирующих элементов через осевой канал вала 1 и отверстия 18 подается сжатый воздух на сопла 19.

Пластическое деформирование обрабатываемой поверхности происходит за счет того, что в зоне обработки приводящие элементы 8, перемещаясь по деформирующим элементам 13, наносят им удары, а те, в свою очередь, – по микронеровностям исходной поверхности заготовки 20.

Представленная схема инструмента в отличие от аналогов позволяет повысить производительность обработки, увеличить глубину наклепа св. 0,1 мм, а также имеет уровень звукового давления, не превышающий санитарный.

### Выводы

1. Расширены технологические возможности инструмента, применяемого для импульсно-ударной пневмовибродинамической обработки плоских поверхностей.

2. Теоретически решена проблема шумоглушения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Минаков, А. П. Технологические основы пневмовибродинамической обработки нежестких деталей / А. П. Минаков, А. А. Бунос ; под ред. П. И. Ящерицына. – Минск : Наука і тэхніка, 1995. – 304 с.
2. Пат. ВУ 158 У, МПК<sup>6</sup> В 24 В 39 / 06. Инструмент для пневмовибродинамической обработки плоских поверхностей / А. П. Минаков, О. В. Яшук ; заявители и патентообладатели А. П. Минаков, О. В. Яшук. – № и 20000003 ; заявл. 12.01.00 ; опубл. 30.09.00. – 2 с.

3. Пат. ВУ 482 У, МПК<sup>6</sup> В 24 В 39 / 06. Инструмент для пневмовибродинамической обработки / А. П. Минаков, О. В. Ящук, И. Д. Камчицкая ; заявители и патентообладатели А. П. Минаков, О. В. Ящук, И. Д. Камчицкая. – № u 20010213 ; заявл. 16.08.01 ; опубл. 30.03.02. – 2 с.

4. Пат. ВУ 1373 У, МПК<sup>6</sup> В 24В 39 / 06. Инструмент для пневмовибродинамической обработки плоских поверхностей / А. П. Минаков, О. В. Ящук, И. Д. Камчицкая; заявители и патентообладатели А. П. Минаков, О. В. Ящук, И. Д. Камчицкая – № u 20030412 ; заявл. 23.09.03; опубл. 30.06.04. – 3 с.

5. Пат. ВУ 12473 У, МПК<sup>6</sup> В 24 В 39 / 06. Способ обработки поверхностным пластическим деформированием плоской поверхности и инструмент для его осуществления / А. П. Минаков, Д. Л. Зайцев ; заявители и патентообладатели А. П. Минаков, Д. Л. Зайцев. – № а 20060866 ; заявл. 29.08.06 ; опубл. 30.04.08. – 4 с.

6. Теоретические исследования по оптимизации конструктивных параметров пневмонакатника импульсно-ударного действия для обработки плоских поверхностей / Г. А. Колосов [и др.] // Вестн. машиностроения. – 2006. – № 1. – С. 101–104.

*Статья сдана в редакцию 18 июля 2012 года*

**Анатолий Петрович Минаков**, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0222-24-18-15.

**Ирина Дмитриевна Камчицкая**, канд. техн. наук, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет.

**Елена Валерьевна Ильюшина**, канд. техн. наук, зам. декана, Белорусско-Российский университет.

**Надежда Михайловна Юшкевич**, преподаватель, Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0222-26-48-52.

**Anatoly Petrovich Minakov**, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. Tel.: 8-0222-24-18-15.

**Irina Dmitriyevna Kamchitskaya**, PhD (Engineering), senior lecturer, Belarusian-Russian University.

**Yelena Valeryevna Ilyushina**, PhD (Engineering), Deputy Dean, Belarusian-Russian University.

**Nadezhda Mikhailovna Yushkevich**, lecturer, Belarusian-Russian University. Tel.: 8-0222-26-48-52.

УДК 629.113.073

*Д. В. Мишута, В. Б. Альгин, В. Г. Михайлов*

## ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КУЗОВА-КОНТЕЙНЕРА ПЕРЕМЕННОГО ОБЪЕМА

UDC 629.113.073

*D. V. Mishuta, V. B. Algin, V. G. Mikhailov*

## ASSESSMENT OF THE DEFLECTED MODE OF A CONTAINER BODY OF VARYING VOLUME

### **Аннотация**

Рассматривается применение пакетов 3-мерного проектирования высокого уровня и инженерного анализа для расчета напряженно-деформированного состояния кузова-контейнера специального назначения. Приведены результаты прочностных исследований кузова-контейнера с помощью пакета ANSYS на соответствие требований ГОСТ Р 51876-2008.

### **Ключевые слова:**

кузов-контейнер, пакет 3D-проектирования ProE, пакет инженерного анализа ANSYS, напряженно-деформированное состояние.

### **Abstract**

The application of high level 3D design software packages and engineering analysis to calculate the deflected mode of a special-purpose container body is considered. The paper presents the results of studying the strength of a container body with the application of ANSYS software concerning its compliance with GOST P 51876-2008 requirements.

### **Key words:**

container body, ProE 3D software package, engineering analysis with ANSYS software, deflected mode.

### **Введение**

Создание кузовов-контейнеров специального назначения негрузового типа (рис. 1) требует тщательной проработки их конструкции и доводки по результатам испытаний. Особенно это относится к кузовам-контейнерам переменного объема, которые изначально менее прочные, чем постоянного, т. к. их складываемые боковые стенки из сэндвич-панелей не несут нагрузку. Эти контейнеры ориентированы на автомобили 4×2, 6×6 (грузоподъемностью 8...14 т), и их прочностные показатели меньше, чем у грузовых с массой 30,5 т.

Кузова-контейнеры могут использоваться как в составе шасси, так и ав-

тономно, например, в качестве мобильного пункта управления войсками, МВД, МЧС, госоргана при чрезвычайных ситуациях, а также мобильного госпиталя. Они должны соответствовать требованиям ГОСТ Р 51876-2008 [1]. Для таких специализированных контейнеров возможно уменьшение допустимых нагрузок при морских перевозках до заявленных производителем, что должно быть отражено в табличке CSC. Как правило, они выпускаются единичными и мелкими сериями на предприятиях, на которых нет дорогостоящего оборудования для испытаний на прочность по ГОСТ Р 51876-2008, поэтому исследования подобного вида контей-

неров не проводились. Дорогостоящее оборудование имеется только на некоторых предприятиях СНГ, выпускающих грузовые контейнеры крупными партиями. Но поскольку конструкция полностью металлических грузовых контейнеров (нетто масса 7...8 т, полная 30,5 т) давно отработана и стандартизирована и сложно создать что-либо новое, производители или не проявляют интереса к этим работам, или стараются

не раскрывать свое ноу-хау в области создания контейнера специального назначения с небольшой полной массой 5...9 т с уровнем штабелирования 1...8 [2]. Как правило, для снижения веса контейнеров специального назначения используется каркасная конструкция из труб в сочетании с сэндвич-панелями, которые обеспечивают хорошую теплоизоляцию.



Рис. 1. Общий вид кузова-контейнера переменного объема

Этот класс кузовов-контейнеров в СНГ теоретически и экспериментально мало изучен. Известно лишь, что зарубежные фирмы проводили исследования по моделированию нагрузок и оценке прочности [3, 4], но какими средствами и каковы достижения, информации нет. В связи с необходимостью обеспечения высокого уровня конкурентоспособности была предпринята попытка исследовать напряженно-деформированное состояние контейнера согласно ГОСТ Р 51876-2008 с помощью пакета ANSYS 12.1.

#### ***Модель и результаты моделирования***

Для проведения исследований была создана 3D-модель контейнера (рис. 2) в пакете высокого уровня и сохранена в формате Parasolid. Несущая конструк-

ция данного контейнера представляет собой сварной металлический каркас из тонкостенных труб прямоугольного сечения из стали Ст3 Кп с раскрываемыми сэндвич-панелями. Принимая во внимание, что сэндвич-панели в конструкции переменного объема не несут нагрузок, последние в модели не учитывались. Использовалась твердотельная модель, т. к. моделирование сварки может привести к еще большим погрешностям [5].

Исследования проводились при следующих видах нагружения по ГОСТ Р 51876-2008:

- штабелирование, когда к верхним фитингам прилагаются вертикальные нагрузки, равные массе (30,5 т) установленных сверху на них контейнеров с коэффициентом динамичности 1,8;
- продольный перекоп при нагрузке 75 кН на верхние фитинги;

– поперечный перекус при нагрузке 150 кН на верхние фитинги;

– подъем контейнера за верхние фитинги.

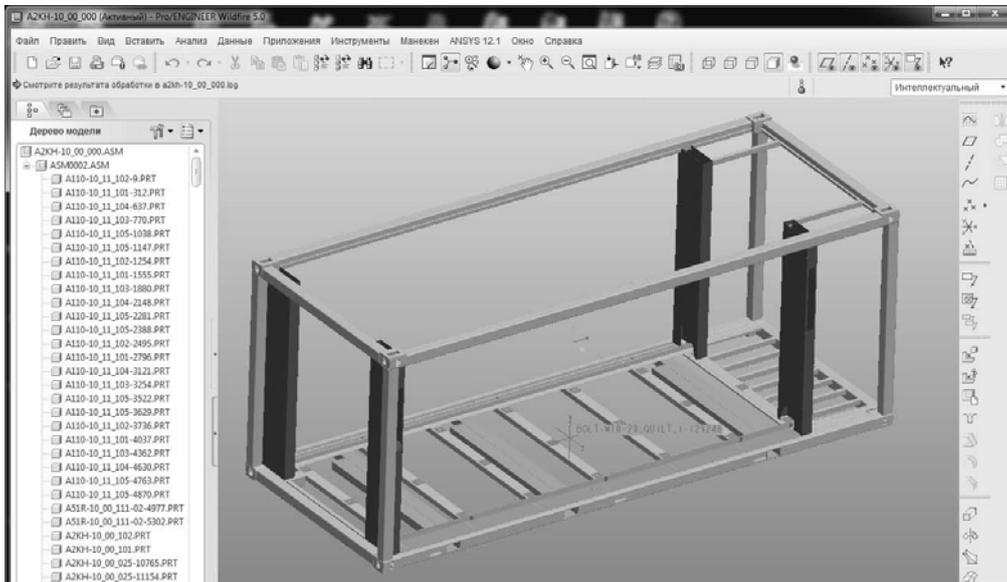


Рис. 2. Общий вид созданной 3D-модели

Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) для нагрузки 538,2 кН (2-уровневое штабелирование), приведенные на рис. 3, показывают, что наиболее нагру-

жены стойки возле машинного отсека и двери. Напряжения в них достигают 77...97 МПа. В сварных фитингах в местах концентрации имеют место локальные контактные напряжения 155 МПа.

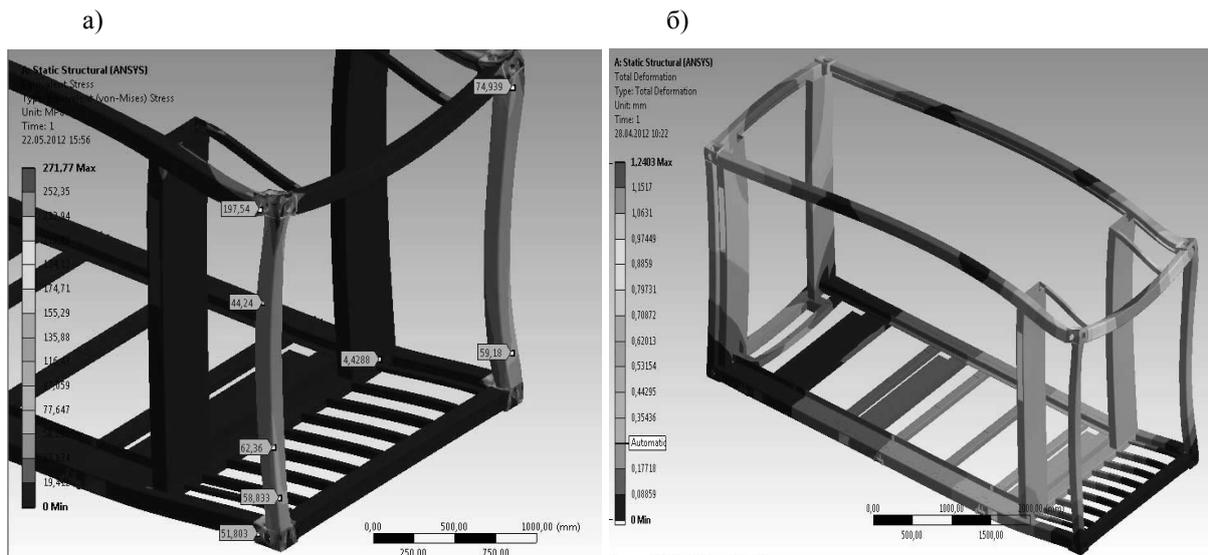


Рис. 3. НДС контейнера при нагрузке 538,2 кН при 2-уровневом штабелировании: а – напряжения; б – деформации

Деформации верхних фитингов – 1,2 мм. По стойкам имеется 2...2,5-кратный запас прочности, по фитингам – 1,3-кратный. В целом, каркас кузова контейнера обеспечивает 2-уровневое штабелирование (538 кН), имеет более высокие показатели, чем его аналоги Weatherhaven (430 кН), А.Д.Д. Производство (200...300 кН).

Результаты моделирования при продольном перекосе 75 кН, приведенные на рис. 4, показывают, что стойки сильно

нагружены. Напряжения в них достигают 156 МПа. На стойках отсека механизма подъема напряжения достигают порядка 208 МПа. Деформация верхних стоек составляет порядка 9,4 мм. Результаты исследования свидетельствуют, что используемая сталь Ст3 Кп ( $\sigma_T > 180...220$  МПа) не обеспечивает требуемой прочности. Необходим переход на более высокопрочные стали типа 09Г2С, 10ХГСНД и др. с пределом текучести  $\sigma_T > 300...400$  МПа.

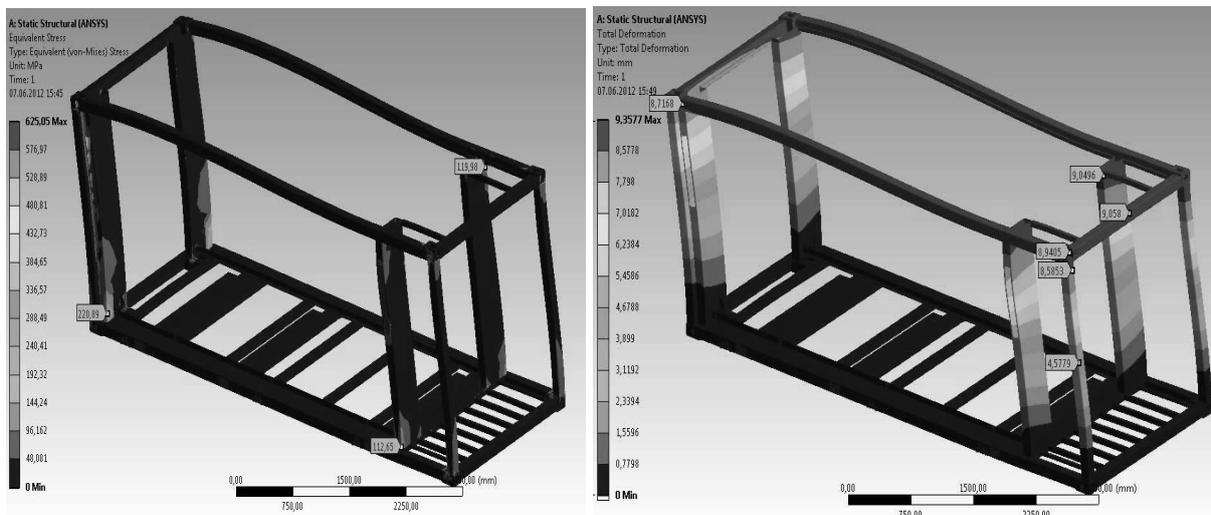


Рис. 4. НДС контейнера при продольном перекосе при нагрузке 75 кН

Результаты моделирования при поперечном перекосе 150 кН приведены на рис. 5. Максимальные напряжения (259 МПа) имеют место в местах сварки отсека с поперечиной пола и на вертикальных стойках машинного отсека. Величина деформации по вертикальным фитингам достигает 24 мм. Здесь также требуются переход на более качественные стали и установка укосин или уменьшение допустимой нагрузки до 75...10 кН и отражение ее в табличке CSC. Для сравнения – Weatherhaven выдерживает лишь 46 кН.

Дополнительно были проведены исследования при нагрузке 1615 кН, соответствующей 4-уровневому штабелированию грузовых контейнеров.

Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) для этой нагрузки, приведенные на рис. 6, показывают, что наиболее нагружены стойки возле машинного отсека и двери. Напряжения в них достигают 132...191 МПа. Деформации верхних фитингов – 3,7 мм. Таким образом, чтобы обеспечить 4-уровневое штабелирование необходимо использовать еще более высокопрочные стали, литые фитинги и установить дополнительные укосины. Экстраполяция результатов свидетельствует, что для реализации 8-уровневого штабелирования (3840 кН) требуются использование вертикальных стоек из труб 160×160×6 мм и переработка конструкции.

На рис. 7 представлено напряженно-деформированное состояние контейнера при подъёме за четыре верхних фитинга из расчета массы контейнера

9,1 т × 1,8 (для учета коэффициента динамичности при погрузочно-разгрузочных работах).

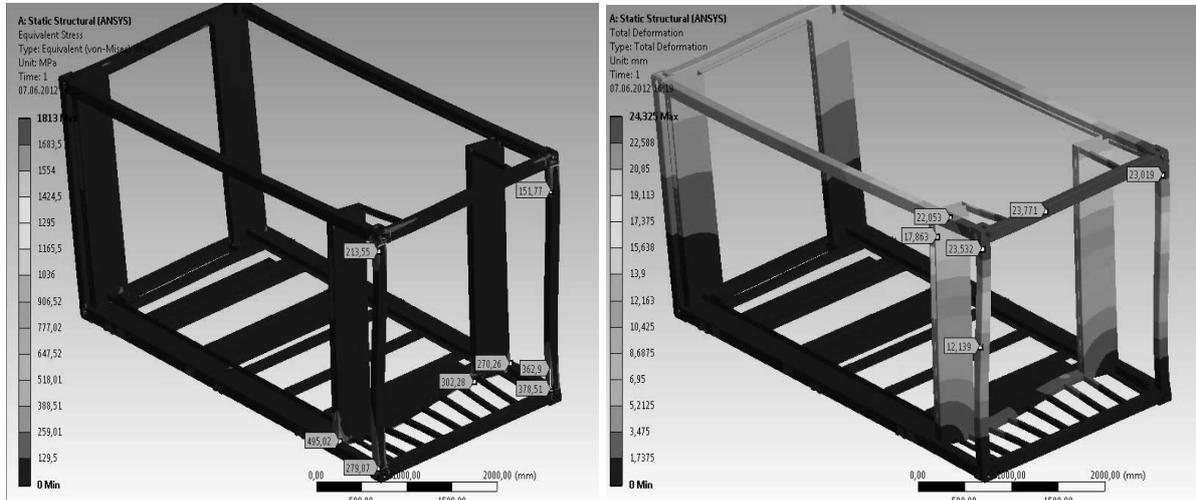


Рис. 5. НДС контейнера при поперечном перекосе при нагрузке 150 кН

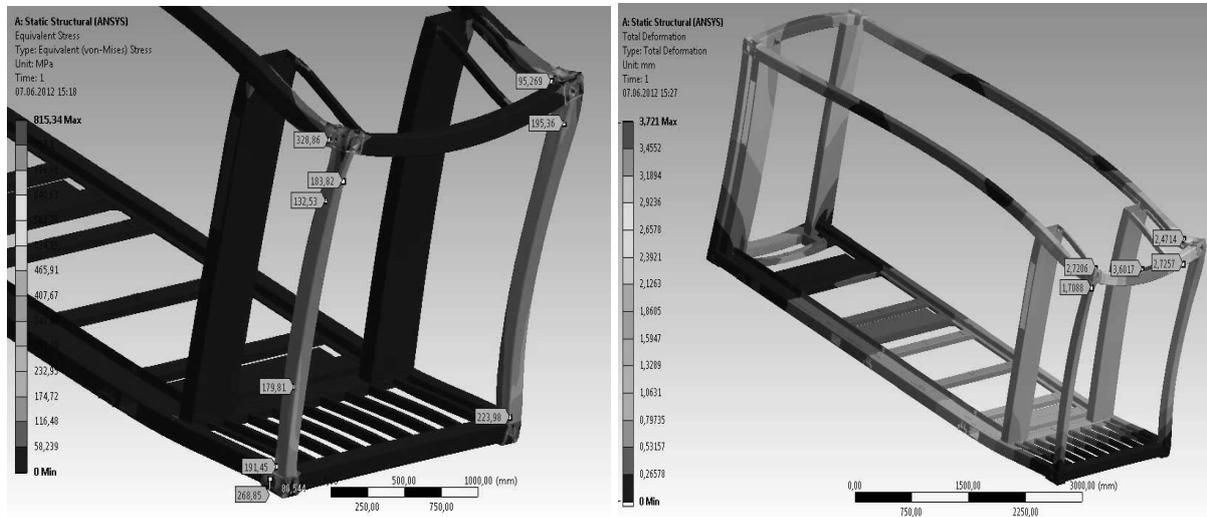


Рис. 6. НДС контейнера при нагрузке 1615 кН при 4-уровневом штабелировании

Как видно из рис. 7, максимальные напряжения при данном режиме нагружения возникают в зоне продольных поперечин пола контейнера. Максимальное значение напряжения составило 50...60 МПа. Результаты исследо-

ваний свидетельствуют, что кузов-контейнер обладает достаточным запасом прочности ( $K_T = 3...4$ ) при проведении погрузочно-разгрузочных работ.

Результаты моделирования на штабелировании 1650 кН при установке

укосин на вертикальные стойки и дополнительной поперечины, представленные на рис. 8, показывают, что установка укосин только перераспределяет

напряжения и практически не сказывается на их снижении (136...180 МПа). Максимальная деформация достигает 2,3 мм на вертикальной поперечине.

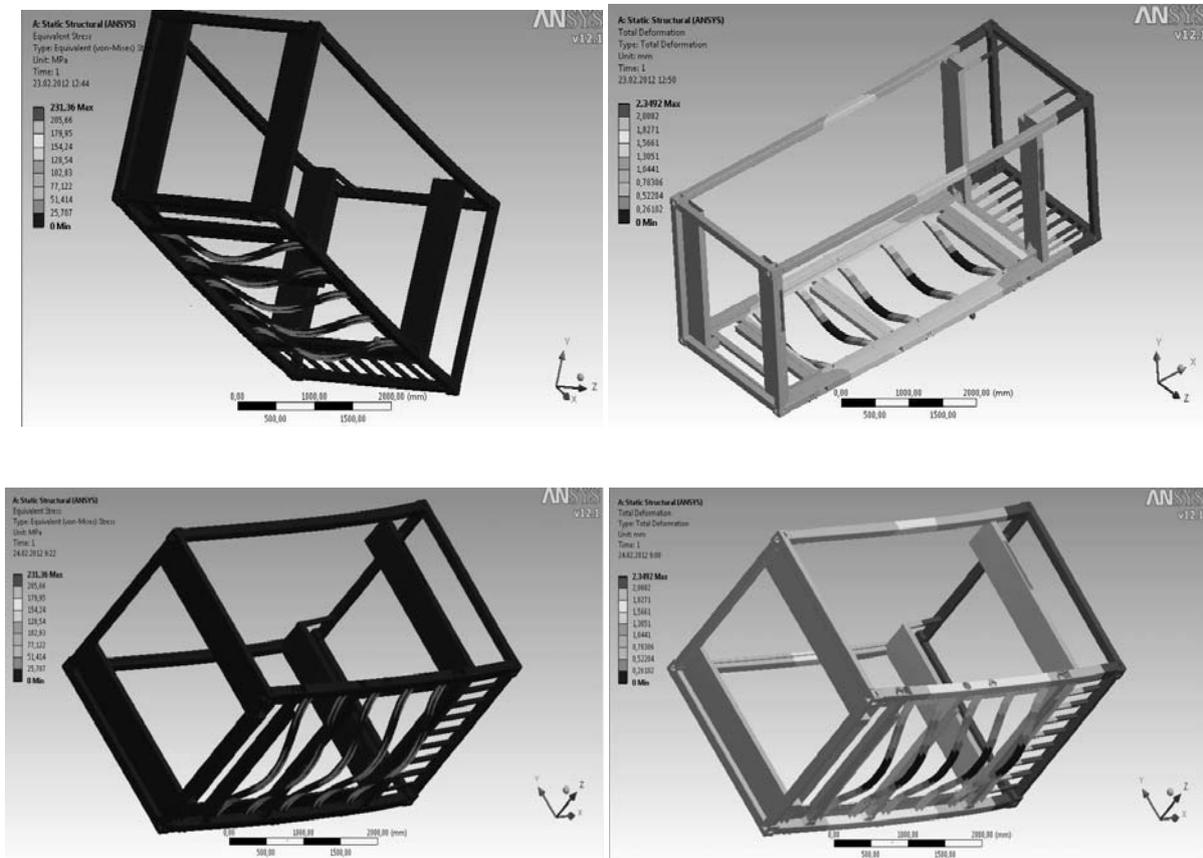


Рис. 7. НДС контейнера при подъеме за верхние фитинги при нагрузке, соответствующей массе контейнера 16,4 т с учетом коэффициента динамичности 1,8

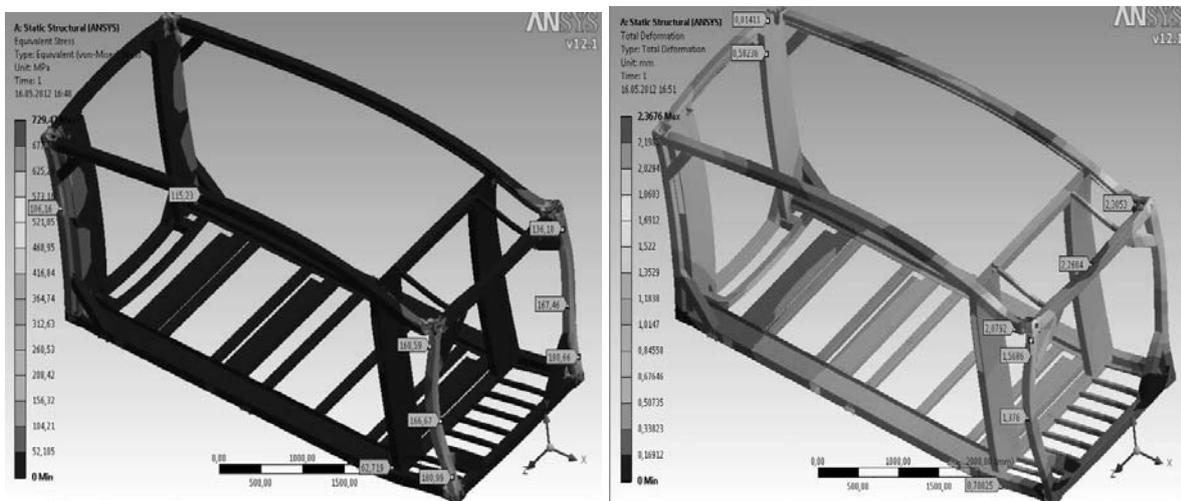


Рис. 8. Результаты моделирования на штабелировании 1650 кН при установке укосин

Результаты моделирования при поперечном перекосе 75 кН при установке укосин на вертикальные стойки и дополнительной поперечины, приведенные на рис. 9, показывают, что установка укосин значительно снижает на-

пряжения до 112...167 МПа и является эффективной мерой борьбы с ними. Максимальная деформация достигает 9,7 мм на вертикальной поперечине, что значительно меньше, чем без нее (24 мм).

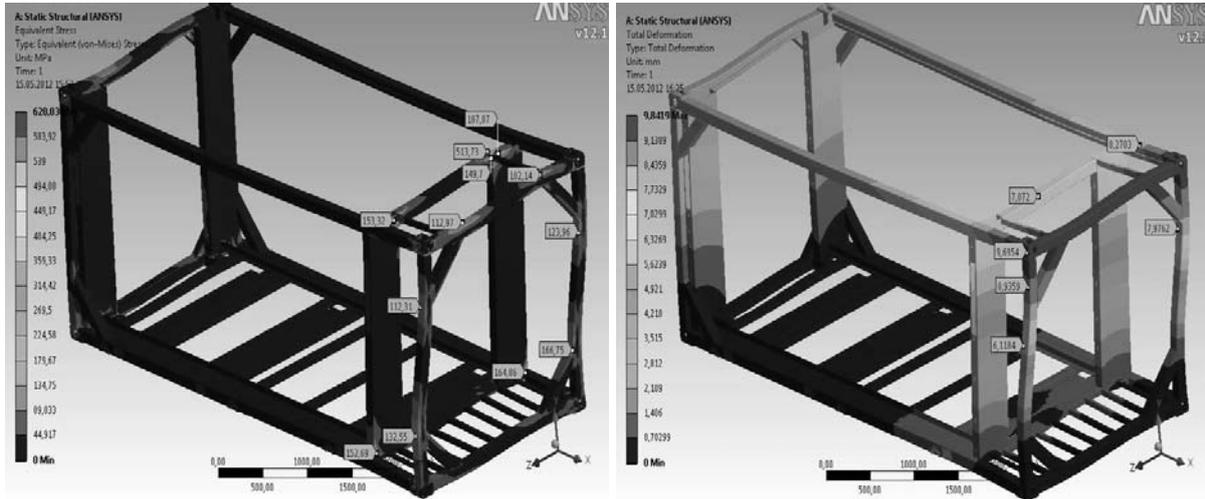


Рис. 9. Результаты моделирования при поперечном перекосе 75 кН при установке укосин на вертикальные стойки и дополнительной поперечины

Для проверки корректности расчетов были проведены экспериментальные испытания контейнера на поперечный перекос при небольших нагрузках. Результаты испытаний показали, что величина деформации верхнего фитинга при нагрузке 8000 Н составляет 2,4...2,6 мм и близка к расчетному значению 2,63 мм, полученному в пакете ANSYS 12.1, т. е. имеет место 10...12 % расхождение. Это свидетельствует о корректности созданной расчетной модели и полученных расчетных данных.

### Заключение

1. Рассмотрено применение пакетов 3-мерного проектирования высокого уровня (ProE) и инженерного анализа ANSYS для расчета напряженно-деформированного состояния кузова-контейнера специального назначения,

обеспечивающее хорошую сходимость с экспериментом (10...12 %). Выполнены всесторонние исследования кузова-контейнера на прочность в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51876-2008.

2. Проведенные с помощью пакета ANSYS исследования показали, что существующая конструкция каркаса кузова-контейнера ООО «Мидивисана» из стали Ст 3 Кп ( $\sigma_T > 180...200$  МПа) обеспечивает 2-уровневое штабелирование (535 кН) и обладает более высокими показателями, чем контейнеры Weatherhaven (430 кН), А.Д.Д. Производство (300 кН).

3. Установка укосин позволяет снизить напряжения в 2 раза при поперечном перекосе, но практически не влияет на НДС при штабелировании.

4. При использовании более высокопрочных сталей (например, 09Г2СА  $\sigma_T > 350...400$  МПа) для фитингов, стоек

и установке угосин возможно достижение 4-уровневого штабелирования (1650 кН) на существующей конструкции и увеличение допустимых усилий при продольном и поперечных перекосах.

5. В целом, использование пакета ANSYS позволяет еще на стадии проектирования провести всесторонние исследования прочностных свойств контейнера, а также значительно сокращает время разработки и доводки конструкции.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 51876-2008 (ИСО 1496-1-96). Контейнеры грузовые серии 1. Технические требования и методы испытаний. – Введ. 01.01.2009, ИУС РФ № 11-2008. – М. : Стандартинформ, 2008. – 67 с.
2. ISO 1С military container-sanitary shelter [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа : <http://uniteamindia.com/design-services/design-services.html>. – Дата доступа : 31.05.2012.
3. Электронная презентация фирмы Bharat Electronics NAVI MUMBAI Capability, Infrastructure and Experience in Manufacture of Military Shelters [Электронный ресурс]. – 2011. – Дата доступа : 10.02.2011 (Материал с выставки MUMBAI, 2011).
4. 3D Design [Электронный ресурс]. – 2004. – Режим доступа : <http://bp21.org.by/ru/art/a041031.html>. – Дата доступа : 02.02.2006.
5. Сварка для анализа в про-механика [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа : <http://fsapr2000.ru/index.php?s=8e6f9d945ba22b6df48d2f80a684f37a&showtopic=50645>. – Дата доступа : 09.03.2012.

*Статья сдана в редакцию 4 октября 2012 года*

**Дмитрий Викторович Мишута**, аспирант, Объединенный институт машиностроения (ОИМ) НАН Беларуси. Тел.: +375-0296-76-44-76. E-mail: [mdv764476@mail.ru](mailto:mdv764476@mail.ru).

**Владимир Борисович Альгин**, д-р техн. наук, проф., зам. директора, ОИМ НАН Беларуси. Тел.: +375-296-02-62-21. E-mail: [algin5@rambler.ru](mailto:algin5@rambler.ru).

**Владимир Георгиевич Михайлов**, канд. техн. наук, ведущий инженер, ООО «Мидивисана». Тел.: +375-291-90-00-81. E-mail: [sapr7@mail.ru](mailto:sapr7@mail.ru).

**Dmitry Viktorovich Mishuta**, PhD student of the Joint Institute of Mechanical Engineering (OIM) of the National Academy of Sciences of Belarus. Tel.: +375-0296-76-44-76. E-mail: [mdv764476@mail.ru](mailto:mdv764476@mail.ru).

**Vladimir Borisovich Algin**, DSc (Engineering), Prof., Deputy Director of the OIM of the NAS of Belarus. Tel.: + 375 – 296-02-62-21. E-mail: [algin5@rambler.ru](mailto:algin5@rambler.ru).

**Vladimir Georgiyevich Mikhailov**, PhD (Engineering), lead engineer of ООО «Midivisana». Tel.: + 375-291-90-00-81. E-mail: [sapr7@mail.ru](mailto:sapr7@mail.ru).

---

УДК 621.926

*Л. А. Сиваченко, Ю. К. Добровольский*

---

**ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ И СОВРЕМЕННЫЙ УРОВЕНЬ ТЕХНИКИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ**

---

UDC 621.926

*L. A. Sivachenko, Y. K. Dobrovolsky*

---

**HISTORY OF DEVELOPMENT OF GRINDING ENGINEERING AND ITS UP-TO-DATE LEVEL**

---

**Аннотация**

Рассмотрены предпосылки создания измельчительной техники и показаны тенденции её развития. Приведены достоверные данные создания основных видов дезинтеграторного оборудования и показано, что его основные конструкции за прошедшие 100 лет практически не изменились. Делается вывод о том, что в ближайшее время эту область техники ожидают существенные изменения и будет образован новый рынок машин и оборудования мирового значения.

**Ключевые слова:**

измельчение, дезинтеграторная техника, разрушение материалов, диспергирование, двигатель, сжатие, удар, износ, рабочий орган, технология, развитие, дробилки, мельницы.

**Abstract**

The background of creation of disintegration machinery is considered and trends of its development are shown. The paper gives valid data of developing main types of disintegration equipment, and it is shown that its basic designs have actually not changed over the past 100 years. The conclusion is made about revolutionary changes to be expected in this engineering field in the nearest future and about the formation of a new global market of machines and equipment.

**Key words:**

grinding, disintegration machinery, destruction of materials, dispersion, engine, compression, impact, wear, operating element, technology, development, crushing machines, mills.

---

***Введение***

Современные отрасли промышленности характеризуются огромными издержками на реализацию технологических процессов, основанных на измельчении материалов. На эти цели расходуются по разным оценкам от 5 до 10 % всей потребляемой электроэнергии, не менее значимы затраты на эксплуатацию оборудования, КПД которого, например, для мельниц не превышает 1 % [1].

Для оценки современного уровня и перспектив модернизации техники измельчения необходим ретроспектив-

ный анализ её развития.

***Предпосылки механизации процессов измельчения***

Большую роль в становлении и изначальном развитии техники сыграли часы и мельница, о значении которых К. Маркс писал: « ... две материальные основы, на которых внутри мануфактуры строилась подготовительная работа к машинной индустрии, это – часы и мельница ...» [2]. При этом чисто прикладной основой создания машинного производства являются мельницы.

К. Маркс также писал: «Вся исто-

рия развития машин может быть прослежена на истории развития мукомольных мельниц» [2]. С самого зарождения мельниц для муки рука человека с предметом труда во время его обработки не соприкасалась. В качестве двигательной силы для привода в движение мельниц стало возможным использовать животных, ветер и воду, а принцип освобождения руки человека от прикосновения с предметом труда был перенесен на другие трудовые процессы.

Естественно, что еще с глубокой древности человек использовал в своей практической деятельности большинство известных в настоящее время механических способов разрушения материала – сжатие, истирание, срез, излом, сдвиг, удар, скручивание и др., но для использования этих методов в массовых технологиях им не хватало источников энергии, т. е. двигателя. Справедливости ради следует уточнить, что еще до появления паровой машины уже существовали жернова, бегуны и толчеи.

Поистине революционный скачок совершила техника измельчения в связи с созданием парового двигателя, что способствовало промышленному внедрению первых дробилок в середине XIX в. Параллельно шло наращивание технического потенциала в металлургии, металлообработке, механике, математике, химии, материаловедении. Наибольших успехов добились в этот период в Англии, Германии, Франции, США и в несколько меньшей степени в России. Но, пожалуй, величайшими достижениями этого времени были формирование нового мышления людей и переход на новый технологический уклад.

Начиная с XVIII в., научные достижения и крупные изобретения начинают носить интернациональный характер как в части их использования, что вполне естественно, так и в части создания. Происходит активный перенос полученных результатов из одной области техники в другую, причем их разработчики, как

правило, не связаны друг с другом. Приведем некоторые примеры.

В 1784 г. англичанин Генри Корт получил патент на прокат железа между вальцами, что значительно упростило всю технологию [2] и послужило основой развития прокатного производства. Чуть позже, в 1808 г., вальцы прокатного назначения стали основой создания валковой мельницы [3]. Приводом для этих агрегатов являлись паровые машины.

В 1785 г. шотландец Мейкль разработал конструкцию молотилки для зерна с барабаном с билами [2]. В определенном смысле можно считать, что это был прототип первых молотковых дробилок, появившихся в 1882 г.

На основании обзора научно-технической информации [2] можно утверждать, что в период с конца XVIII в. до 70-х гг. XIX в. были сделаны важнейшие изобретения и открытия, которые, не получив широкого применения в момент своего появления, стали основой, на которой зиждился технический прогресс последующей эпохи. В исторической цепи научно-технического развития звено техники измельчения материалов в своей основе сохранилось до настоящего времени, и потеря ее позиций в обозримом будущем явно не предвидится. Такая ситуация дает все основания выделить дезинтеграторную технику в особую область. Для современной оценки этой сферы производства целесообразно проводить ретроспективный анализ.

На процесс изначального развития дезинтеграторной техники повлияло много факторов, но, пожалуй, первостепенным была электротехническая промышленность. Именно во второй половине XIX в. благодаря электрической энергии стало возможным более рациональное использование природных источников энергии. Электрическая энергия и электрические машины в полном смысле слова совершили революцию в

энергетике и технике и тем самым создали условия для нового колоссального технического прогресса.

Эти и другие сферы деятельности во многом привели к утрате интереса к технике измельчения, которая «застопорилась» в своем развитии. Безусловно, измельчающие машины оснащались новыми электродвигателями, в них использовались износостойкие марганцовистые стали для рабочих органов, их конструкции совершенствовались и постоянно модернизировались, но принцип действия, а значит, и потенциальные возможности оставались на прежнем уровне.

Долгое время сдерживающим фактором было то, что измельчающие машины изготавливались как отдельные, хоть порой и очень большие, агрегаты, но не создавались как единые технологические комплексы, например, цементные заводы. Главной же причиной их отставания в развитии было то, что их производство не приносило тех прибылей, которые давали электротехника, автомобильная промышленность, энергетика, производство металла, химия. Те производители, которые обосновались на рынке дезинтеграторного оборудования, стали монополистами и не имели серьезной конкуренции.

Конец XIX в. и весь XX в. – важнейший период развития современного естествознания и его практических применений. Достижение в этой области оказало определенное влияние на создание ряда измельчительных машин (струйных, электромагнитных, виброинерционных, электроимпульсных, кавитационных и др.), но их использование осталось весьма органичным и во многом из-за недостаточного уровня исследований в механике разрушения, материаловедении, реологии. Весьма парадоксально, но факт неоспорим: научно-техническая общественность очень сла-

бо информирована об истинном состоянии сферы дезинтеграторных технологий и реальных возможностях ее перевооружения.

Современная промышленность характеризуется наличием большого количества технологических комплексов, осуществляющих многооперационную переработку материалов. Многократно возросли затраты на дезинтеграторные переделы, объемы переработки достигли колоссальных значений, но орудия труда в составе этих «новейших» производств остались неизменными со времен их первооткрывателей.

Для того чтобы подтвердить правомочность представленных доводов и обоснований, приведем исторические сведения о создании основных видов измельчительного оборудования (рис. 1) и сопоставим их с существующими образцами техники аналогичного назначения [3–7].

Приведенные на рис. 1 сведения о создании основных видов измельчительного оборудования показывают, что 14 из 24 конструкций предложены ранее 1900 г., но они не только используются в производстве до сих пор, но и осуществляют переработку основных объемов материалов. Разработанные в разные периоды XX в. другие виды измельчителей (см. рис. 1, схемы 15...24), хоть и создавались с учетом недостатков своих предшественников, но имеют весьма ограниченное применение за редким исключением, например, мельница самоизмельчающая, использующая основные положения шарового измельчения.

Представленная информация позволяет констатировать: современная техника измельчения в основном базируется на принципах действия и конструкциях машин XIX в., которые исчерпали свои возможности и должны быть заменены на новые и более совершенные.

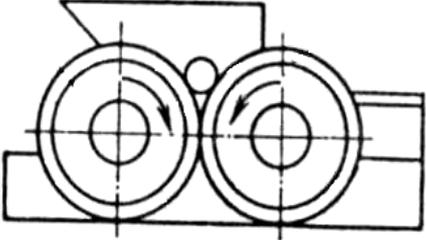
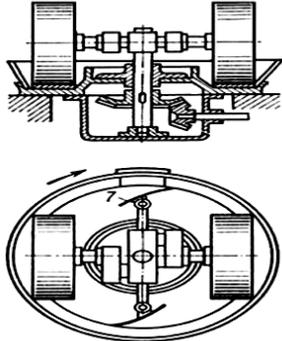
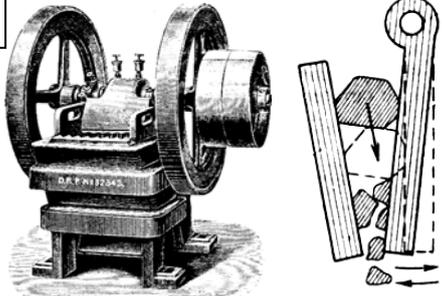
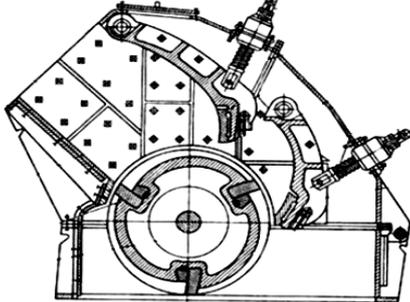
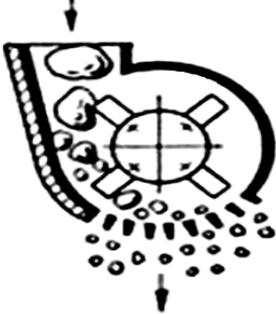
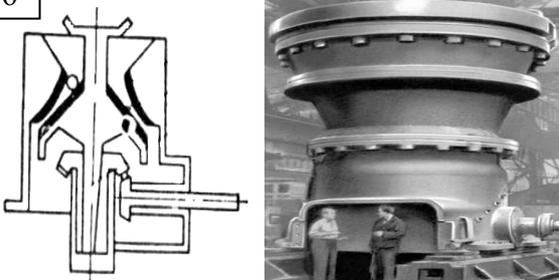
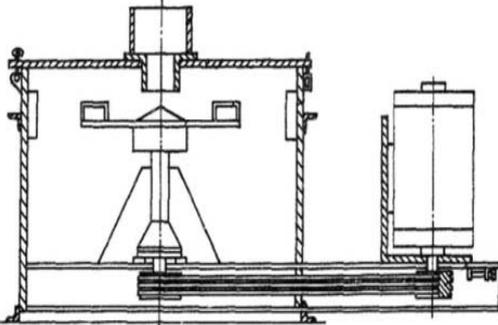
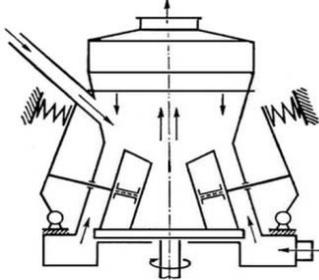
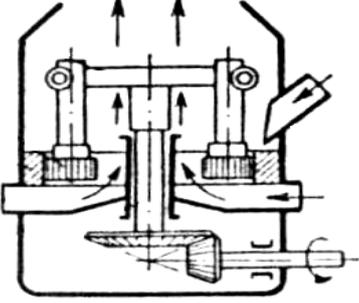
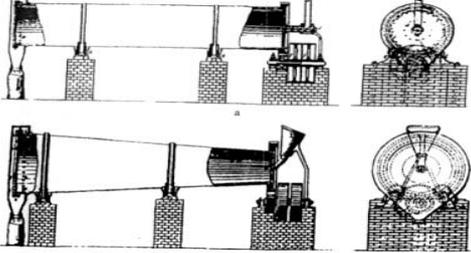
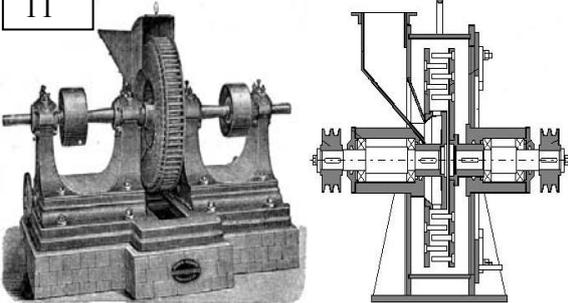
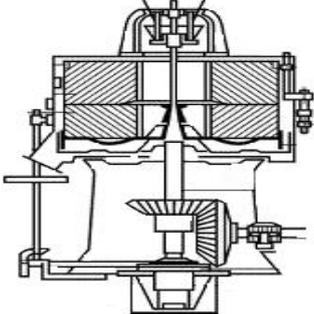
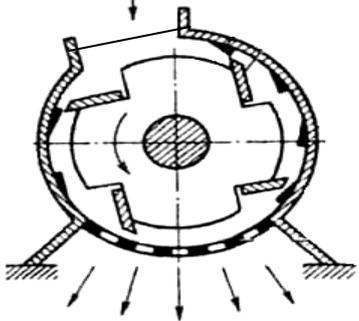
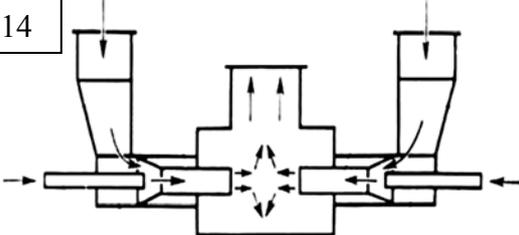
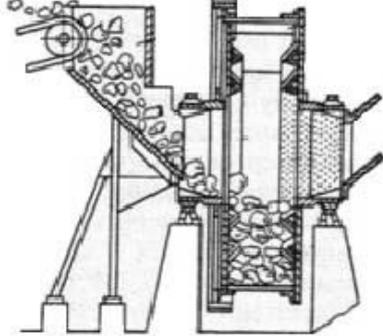
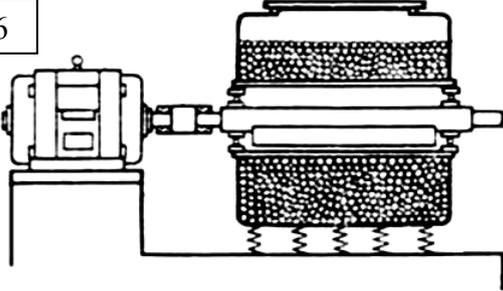
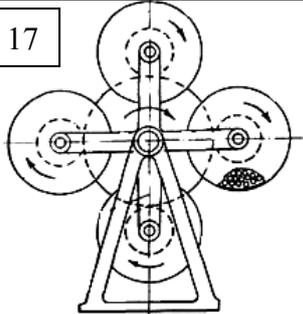
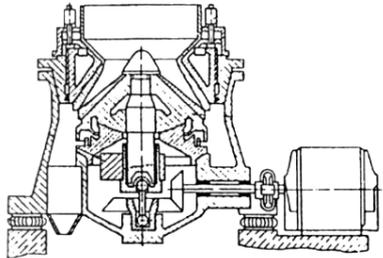
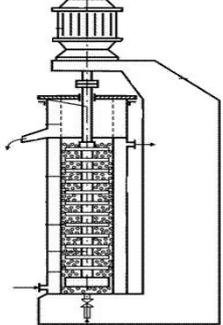
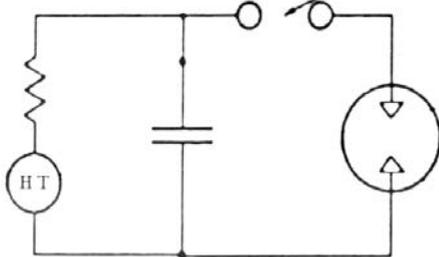
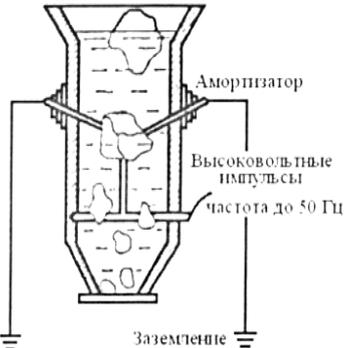
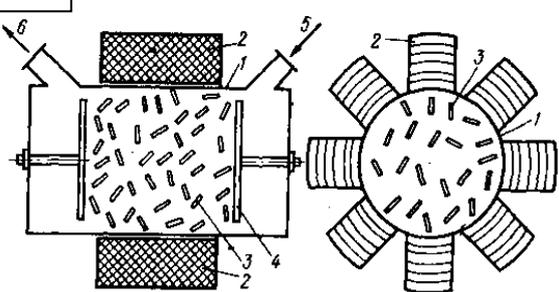
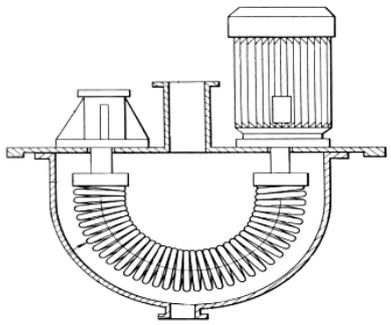
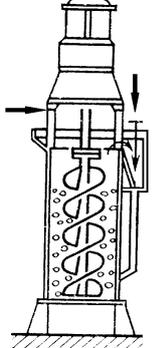
<p>1</p>  <p><i>Валковая дробилка</i></p> <p>Изобретена в Великобритании (пат. № 063179, 1806 г.). Применена для дробления медных руд на руднике «Краундейд»</p>	<p>2</p>  <p><i>Бегуны</i></p> <p>Известны со средних веков</p>
<p>3</p>  <p><i>Щековая дробилка</i></p> <p>Изобретена Э. Блеком в 1858 г. (пат. США № 233192, 12 окт. 1880 г.)</p>	<p>4</p>  <p><i>Роторная дробилка</i></p> <p>Разработана в США В. Л. Давсоном (пат. № 247749, 4 окт. 1881 г.)</p>
<p>5</p>  <p><i>Молотковая дробилка</i></p> <p>Разработана Уильямсом (пат. США № 268029, 28 нояб. 1882 г.)</p>	<p>6</p>  <p><i>Конусная дробилка</i></p> <p>Изобретена Гейтсом (пат. США № 122932, 1872 г.). Практическая реализация с 1877 г.</p>
<p>7</p>  <p><i>Центробежно-ударная дробилка</i></p>	<p>8</p>  <p><i>Роликовая мельница</i></p> <p>Изобретена Шранцем в 1870 г. (пат. Германии № 100724)</p>

Рис. 1. Исторические сведения об основных конструкциях машин для измельчения материалов

<p>9</p>  <p><i>Роликово-маятниковая мельница</i> Изобретена в Германии в 1889 г. (пат. № 121581)</p>	<p>10</p>  <p><i>Шаровая мельница</i> Один из первых вариантов предложен К. Девидсоном (пат. Германии № 62871, 1891 г.)</p>
<p>11</p>  <p><i>Дезинтегратор</i> Предложен Карром в 1859 г. (пат. Англии № 234075, 24 нояб. 1873 г.)</p>	<p>12</p>  <p><i>Жернова</i> Известны со средних веков</p>
<p>13</p>  <p><i>Ножевая мельница</i> Известна со средних веков</p>	<p>14</p>  <p><i>Струйная мельница</i> Идея использования струи сжатого газа запатентована в 1880 г. фирмой «Фарбениндустри» в Германии (пат. № 135672, 1898 г.)</p>
<p>15</p>  <p><i>Мельница самоизмельчения</i> Известна с начала XX в.</p>	<p>16</p>  <p><i>Вибрационная мельница</i> Разработана Вайнштейном в 1909 г. во Франции (пат. № 233164)</p>

Продолжение рис. 1

<p>17</p>  <p>Планетарная мельница</p> <p>Применяется с 30-х гг. XX в.</p>	<p>18</p>  <p>Конусно-инерционная дробилка</p> <p>Изобретена в СССР в ВНИПИ Механообработки полезных ископаемых. Активно совершенствуется с 1948 г.</p>
<p>19</p>  <p>Бисерная мельница</p> <p>Запатентована в США в 1952 г. (пат. № 1873027)</p>	<p>20</p>  <p>Электрогидравлическая мельница</p> <p>Изобрел Л. А. Юткин в 1950 г.</p>
<p>21</p>  <p>Амортизатор</p> <p>Высоковольтные импульсы частота до 50 Гц</p> <p>Заземление</p> <p>Электроимпульсная мельница</p> <p>Известна с 60-х гг. XX в.</p>	<p>22</p>  <p>Электромагнитная мельница</p> <p>Предложена в СССР в 60-х гг. XX в.</p>
<p>23</p>  <p>Пружинная мельница</p> <p>Изобретена Л. А. Сиваченко (а. с. № 903131 СССР, 1980 г.)</p>	<p>24</p>  <p>Башенная мельница</p> <p>Разработана фирмой «Аллис Минерал Систем» (США, 1979 г.)</p>

Окончание рис. 1

### **Современный уровень развития**

Сопоставив конструкции измельчительных машин, приведенные на рис. 1, с современными [1, 5–7], нужно отметить, что основная часть машин (прежде всего схемы 1...15) построена на одних конструктивных признаках и существенных отличий не имеет.

В ходе сменяемости поколений техники на протяжении последних ста лет прослеживается влияние одного очень важного фактора, диктующего условия прогресса, – фактора надежности оборудования. Именно соображениями надежности объясняется, что барабан как основная конструкция машины для разрушения постепенно вытеснял все остальные конструктивные варианты дробилок и мельниц. Действительно, уже в четвертом поколении техники все операции дробления и измельчения, за исключением лишь крупного дробления, осуществляются с помощью барабанных мельниц. Пятое поколение продолжает эту тенденцию. Достигнуть уменьшения крупности измельчения, увеличения производительности и одновременно снижения габаритов машин пытаются за счет повышения энергонапряженности рабочего пространства барабана. Действие гравитационного поля пытаются усилить действием центробежных вибрационных полей, а также дополнительными механическими воздействиями [1, 8].

Важнейшим фактором, определяющим надежность оборудования, является износ измельчительной гарнитуры. Именно по этой причине были созданы измельчители, обладающие большой износостойкостью, как, например, плиты щековых дробилок, или измельчающая среда сформирована засыпкой большого количества мелющих тел, например, для шаровых мельниц [1, 5].

За более чем 100 лет промышленной эксплуатации измельчительных машин их конструкции сколь-нибудь значительных изменений не претерпели. Соответственно, не произошло значи-

тельной интенсификации их рабочих процессов. При этом не было повышения эффективности. Отсутствие фундаментальных обобщений механизмов разрушения твердых тел не позволяет в необходимой степени обеспечить измельчения, заложенного в природе материала [1, 9, 10].

Сложившаяся ситуация характеризуется тем, что базовые конструкции агрегатов для измельчения материалов с момента их создания принципиально не изменились. Основные нововведения в этой области за последние 150 лет связаны с многократным увеличением объемов перерабатываемых материалов, повышением степени измельчения и расширением номенклатуры подвергаемых обработке продуктов. Ситуация особенно осложняется тем, что в технологический оборот вовлекаются все новые материалы, с большим набором физико-механических свойств, а аппаратная база остается без существенных изменений. Это приводит к огромным энергетическим и материальным издержкам и не позволяет использовать в полной мере потенциальные возможности перерабатываемых материалов [9–11].

На этом фоне новые виды измельчительных аппаратов используются в основном в малотоннажных производствах и весьма ограниченно, что выглядит скорее архаично и еще более подчеркивает монополизм традиционных технологических агрегатов.

Кардинальные сдвиги в развитии техники измельчения невозможны без перехода к новому физическому принципу организации процессов дезинтеграции. Получение новых знаний в этой области приведет к качественному скачку в эффективности производства. Как правило, это обусловлено крупными научными открытиями и инженерными разработками в технике и технологиях измельчения материалов [12].

### Заклучение

Существенные сдвиги в развитии дезинтеграторных технологий произойдут только в том случае, если будет полная уверенность не только в их необходимости, но и, главное, – осуществимости. И если в первой части проблемы ни у кого нет сомнений, то вторая ее часть, напротив, почти у всех вызывает скепсис, основанием которому служит

ряд утвердившихся гипотез, отрицающих саму возможность.

Авторы ставили своей целью с исторической объективностью показать этапы развития измельчительной техники, сопоставить ее исходный и современный уровни и в очередной раз озвучить проблему и необходимость модернизации дезинтеграторных технологий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Селективное разрушение материалов / В. И. Ревнивцев [и др.]. – М. : Недра, 1988. – 386 с.
2. История техники / А. А. Зворыкин [и др.]. – М. : Изд-во соц.-экон. лит-ры, 1962. – 772 с.
3. Промышленность и техника : энцикл. промышленных знаний. Т. 4 : Обработка камней и земель. Технология химических производств / Под ред. А. А. Байкова. – СПб. : Просвещение, 1896. – 1230 с.
4. Горная энциклопедия / Под ред. Е. А. Козловского. – М. : Совет. энцикл., 1984. – 1991 с.
5. **Клушанцев, Б. В.** Дробилки. Конструкция, расчёт, особенности эксплуатации / Б. В. Клушанцев, А. И. Косарев, Ю. А. Муйземник. – М. : Машиностроение, 1990. – 320 с.
6. **Сиваченко, Л. А.** Дезинтеграторные технологии, их техническая обеспеченность и перспективы развития / Л. А. Сиваченко, Д. В. Титов, Т. Л. Сиваченко // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов : межвузов. сб. ст. – Белгород : БГТУ, 2009. – С. 228–233.
7. Сравнение различных типов измельчителей : материалы I Междунар. науч.-техн. конф. / Под ред. П. Ф. Овчинникова. – Одесса : ОВИМУ, 1993. – Ч. 1. – 130 с.
8. **Вайцехович, П. Е.** Интенсификация и моделирование процессов диспергирования в поле инерционных сил / П. Е. Вайцехович. – Минск : БГТУ, 2008. – 220 с.
9. **Хайнике, Г.** Трибохимия / Г. Хайнике. – М. : Мир, 1987. – 584 с.
10. **Сиваченко, Л. А.** Технологическая концепция современной промышленной революции / Л. А. Сиваченко // Вестн. БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2007. – № 1. – С. 94–102.
11. Технологические аппараты адаптивного действия / Л. А. Сиваченко [и др.]. – Минск : БГУ, 2008. – 375 с.
12. О создании межотраслевых научно-технических комплексов (МНТК) : Постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР, 12 дек. 1985 г., № 1230 // Консультант Плюс : Беларусь [Электронный ресурс] / ЮрСпектр, Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – М., 1985.

*Статья сдана в редакцию 28 июня 2012 года*

**Леонид Александрович Сиваченко**, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-447-92-86-83. E-mail: 228011@mail.ru.

**Юрий Константинович Добровольский**, студент, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-291-57-71-70.

**Leonid Aleksandrovich Sivachenko**, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. Tel.: +375-447-92-86-83. E-mail: 228011@mail.ru.

**Yury Konstantinovich Dobrovolsky**, student, Belarusian-Russian University. Tel.: +375-291-57-71-70.

---

УДК 629.113-585

*И. С. Сазонов, Н. Н. Гурский, Н. П. Амельченко*

---

**МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНОГО ПОДРЕССОРИВАНИЯ СИДЕНЬЯ ВОДИТЕЛЯ КОЛЕСНОГО ТРАКТОРА**

---

UDC 629.113-585

*I. S. Sazonov, N. N. Hursky, N. P. Amelchenko*

---

**SIMULATION OF ACTIVE CUSHIONING OF A WHEELED TRACTOR DRIVER SEAT**

---

**Аннотация**

Рассматриваются вопросы моделирования и анализа динамической виброн нагруженности водителя колесного трактора. Представлена математическая модель колебаний колесного трактора, включающая шасси, колеса, элементы вторичного поддрессоривания (кабину, сиденье водителя). Изложены результаты анализа вертикальных колебаний сиденья водителя при пассивном и активном вариантах его поддрессоривания, а также влияния различных схем поддрессоривания шасси на динамическую нагруженность водителя при движении трактора по заданным типам опорных поверхностей.

**Ключевые слова:**

моделирование, динамическая виброн нагруженность, математическая модель, вторичное поддрессоривание, пассивное поддрессоривание, активное поддрессоривание, динамическая нагруженность, опорная поверхность.

**Abstract**

The modeling and analysis of dynamic vibration loading, a wheeled tractor driver is exposed to, are considered in this paper. The mathematical model of wheeled tractor vibrations, including the chassis, wheels, and elements of secondary cushioning (a cab and a driver seat) is presented. The paper gives the results of the analysis of driver seat vertical vibrations in passive and active variants of its cushioning and, aslo, the impact of different schemes of chassis cushioning upon the dynamic loading of a driver when driving a tractor on specified types of bearing surfaces.

**Key words:**

modeling, dynamic vibration loading, mathematical model, secondary cushioning, passive cushioning, active cushioning, dynamic loading, bearing surface.

---

**Введение**

Движение трактора в реальных условиях эксплуатации сопровождается колебаниями шасси, узлов (кабины, сиденья водителя) и агрегатов, установленных на нем. Эти колебания являются следствием воздействия на трактор возмущающих сил. Исследованиями многих авторов установлено, что наиболее неблагоприятными колебаниями шасси при выполнении различных видов сельскохозяйственных и транспортных работ являются коле-

бания в вертикальной продольной плоскости, возникающие при движении трактора на повышенных скоростях по периодически повторяющимся неровностям (движение поперек борозд). Стремясь снизить уровни колебаний, учитывают особенности конструкций систем поддрессоривания (СП) как самого шасси, так и узлов. Для оценки эффективности различных СП используются, как правило, два критерия: условия движения трактора (плавность колебаний шасси, преодоление трактором микронеровностей и сохранение

управляемости); условия труда тракториста (уровень колебаний в кабине и на сиденье водителя).

Чтобы провести подобные исследования, необходимо рассматривать трактор как единую колебательную систему, в которой должны быть согласованы между собой СП шасси, кабины, сиденья, двигателя на раме трактора.

Вопросам, связанным с теоретическими и экспериментальными исследованиями колебаний транспортных колесных машин, посвящено множество работ ученых и исследователей разных поколений [1–6].

На современном этапе основными средствами изучения и количественного исследования важнейших свойств машин, обусловленных колебательными процессами, являются математические модели, алгоритмы и программные средства.

В работе рассматриваются вопросы виртуального моделирования колебаний колесного трактора и анализа его вибронгруженности в характерных точках шасси, кабины и на месте сиде-

нья водителя, при этом используются различные структурные схемы как пассивного, так и активного поддрессоривания. Компьютерные эксперименты проведены в среде ADMOS [7, 8].

**Расчетная схема и математическая модель объекта исследования**

Для решения задач обоснованной плавности хода является дискретная модель в виде сосредоточенных масс, объединенных упругими и диссипативными безынерционными связями с необходимым числом степеней свободы, учитывающих линейные вертикальные и угловые продольные и поперечные колебания поддрессоренной массы и вертикальные линейные неподдрессоренных масс, а также аналогичные фазовые координаты объектов вторичного поддрессоривания, в частности, кабины и сиденья водителя.

Расчетная схема пространственных колебаний колесного трактора с учетом принятых степеней свободы представлена на рис. 1.

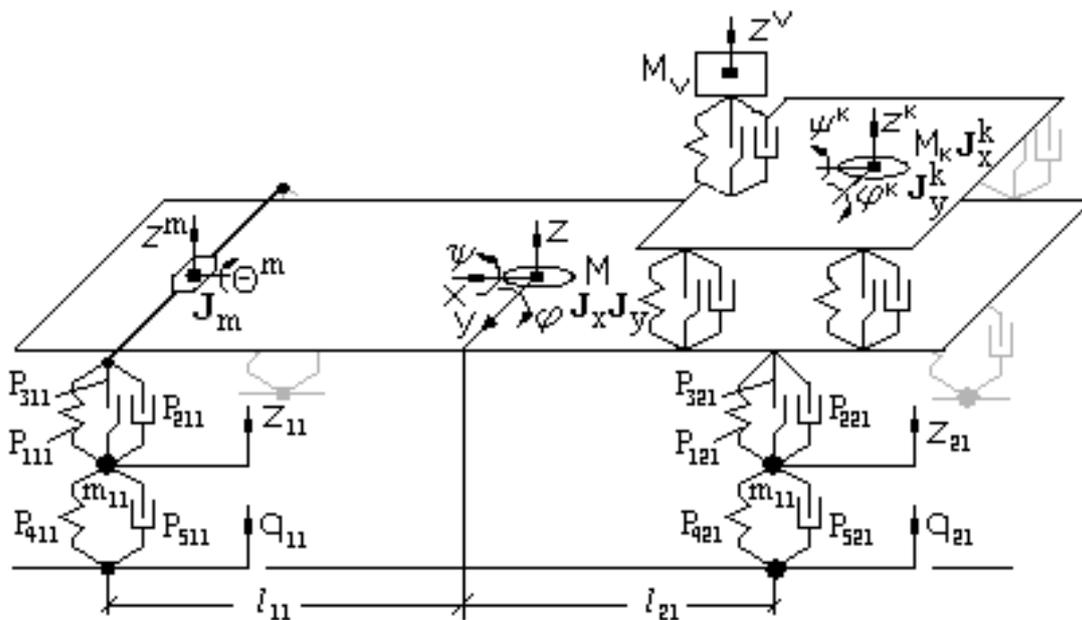


Рис. 1. Расчетная схема пространственных колебаний колесного трактора

Математическая модель, соответствующая данной расчетной схеме, описывается системой дифференциальных уравнений (ДУ) второго порядка в виде

$$\left. \begin{aligned} M\ddot{z} + \sum_{l=1}^2 \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 P_{jil} &= 0; \\ J_y \ddot{\phi} + \sum_{l=1}^2 \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 l_{il} P_{jil} &= 0; \\ J_x \ddot{\psi} + \sum_{l=1}^2 \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 b_{il} P_{jil} &= 0; \\ J_m \ddot{\theta}^m + \sum_{l=1}^2 \sum_{j=1}^3 b_{lj} P_{jil} &= 0; \\ m_{il} \ddot{z}_{il} - (P_{1il} + P_{2il} + P_{3il}) + P_{4il} + P_{5il} &= 0; \\ M_k \ddot{z}^k + \sum_{l=1}^2 \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 P_{jil}^k &= 0; \\ J_y^k \ddot{\phi}^k + \sum_{l=1}^2 \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 l_{ij}^k P_{jil}^k &= 0; \\ J_x^k \ddot{\psi}^k + \sum_{l=1}^2 \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 b_{ij}^k P_{jil}^k &= 0; \\ M_V \ddot{z}^v + \sum_{j=1}^3 P_j^v &= 0 \end{aligned} \right\} (1)$$

$(l = 1, 2; i = 1, 2; j = 1, 2, 3)$

с начальными условиями при  $t \geq t_0$ :

$$\begin{aligned} z|_{t=t_0} &= z_0; \quad \dot{z}|_{t=t_0} = \dot{z}_0; \\ \phi|_{t=t_0} &= \phi_0; \quad \dot{\phi}|_{t=t_0} = \dot{\phi}_0; \\ \psi|_{t=t_0} &= \psi_0; \quad \dot{\psi}|_{t=t_0} = \dot{\psi}_0; \\ z^k|_{t=t_0} &= z_0^k; \quad \dot{z}^k|_{t=t_0} = \dot{z}_0^k; \\ \phi^k|_{t=t_0} &= \phi_0^k; \quad \dot{\phi}^k|_{t=t_0} = \dot{\phi}_0^k; \\ \psi^k|_{t=t_0} &= \psi_0^k; \quad \dot{\psi}^k|_{t=t_0} = \dot{\psi}_0^k; \\ \theta^m|_{t=t_0} &= \theta_0^m; \quad \dot{\theta}^m|_{t=t_0} = \dot{\theta}_0^m; \\ z^v|_{t=t_0} &= z_0^v; \quad \dot{z}^v|_{t=t_0} = \dot{z}_0^v; \\ z_{il}|_{t=t_0} &= z_{0il}; \quad \dot{z}_{il}|_{t=t_0} = \dot{z}_{0il} \\ &(i = 1, 2; l = 1, 2), \end{aligned}$$

где  $M$  – подрессоренная масса шасси;  $J_y$  – момент инерции подрессоренной массы шасси относительно оси тангажа;  $J_x$  – момент инерции подрессоренной массы шасси относительно оси крена;  $l$  – индекс борта;  $i$  – индекс номера опоры;  $j$  – индекс типа упругодиссипативного элемента ( $j=1$  – упругий элемент,  $j=2$  – амортизатор,  $j=3$  – условный элемент сухого трения);  $P_{jil}$  – нелинейная характеристика восстанавливающей силы элемента  $il$ -й подвески;  $l_{il}$  – расстояние по горизонтали от центра масс до  $il$ -й оси (моста);  $b_{il}$  – расстояние в поперечной плоскости от центра  $il$ -го колеса до вертикальной плоскости, проходящей через ось крена;  $J_m$  – момент инерции передней балки;  $P_{4il}, P_{5il}$  – диссипативная и упругая силы в  $il$ -й шине в нормальном направлении соответственно;  $M_k$  – подрессоренная масса кабины;  $J_y^k$  – момент инерции подрессоренной массы кабины относительно оси тангажа;  $J_x^k$  – момент инерции подрессоренной массы кабины относительно оси крена;  $l_{ij}^k$  – расстояние по горизонтали от центра масс кабины до  $il$ -й опоры кабины;  $b_{ij}^k$  – расстояние в поперечной плоскости от центра масс кабины до  $il$ -й опоры кабины;  $M_V$  – масса сиденья водителя.

Относительные перемещения и скорости, являющиеся аргументами для вычисления упругодиссипативных сил в элементах  $il$ -й подвески  $P_{jil}$  ( $j = 1, 2, 3$ ), имеют вид:

$$\begin{aligned} \Delta_{il} &= z + l_{ij}\phi + b_{il}\psi - z_{il}; \\ \dot{\Delta}_{il} &= \dot{z} + l_{ij}\dot{\phi} + b_{il}\dot{\psi} - \dot{z}_{il}, \end{aligned}$$

а соответствующие аргументы для сил  $P_{jil}$  ( $j = 4, 5$ )  $il$ -го колеса определяют как

$$\delta_{il} = z_{il} - q_{il}; \quad \dot{\delta}_{il} = \dot{z}_{il} - \dot{q}_{il}.$$

Деформации элементов поддрессоривания кабины и сиденья водителя имеют вид:

$$\Delta_{il}^k = z^k + l_{ij}^k \varphi^k + b_{ij}^k \psi^k - z_{pil};$$

$$\dot{\Delta}_{il}^k = \dot{z}^k + l_{ij}^k \dot{\varphi}^k + b_{ij}^k \dot{\psi}^k - \dot{z}_{pil};$$

$$\Delta^v = z^v - z_p^k; \quad \dot{\Delta}^v = \dot{z}^v - \dot{z}_p^k,$$

где  $z_{pil}, \dot{z}_{pil}$  – перемещение и скорость шасси в точке крепления  $il$ -й опоры кабины;  $z_p^k, \dot{z}_p^k$  – перемещение и скорость на полу кабины в точке крепления сиденья водителя.

В случае жесткого поддрессоривания шасси необходимо неподдрессоренную массу соответствующей оси при-

соединить к поддрессоренной массе шасси, а соответствующие силы в элементах подвески заменить силами, возникающими в колесах.

При моделировании динамической системы с активной подвеской сиденья водителя следует заменить вычисление аргументов  $\Delta^v$  на

$$\Delta^v = z^v - z_p^k + z^*;$$

$$\dot{\Delta}^v = \dot{z}^v - \dot{z}_p^k + \dot{z}^*,$$

где  $z^*, \dot{z}^*$  – перемещение и скорость активного исполнительного устройства.

Схема системы управления колебаниями сиденья водителя представлена на рис. 2.

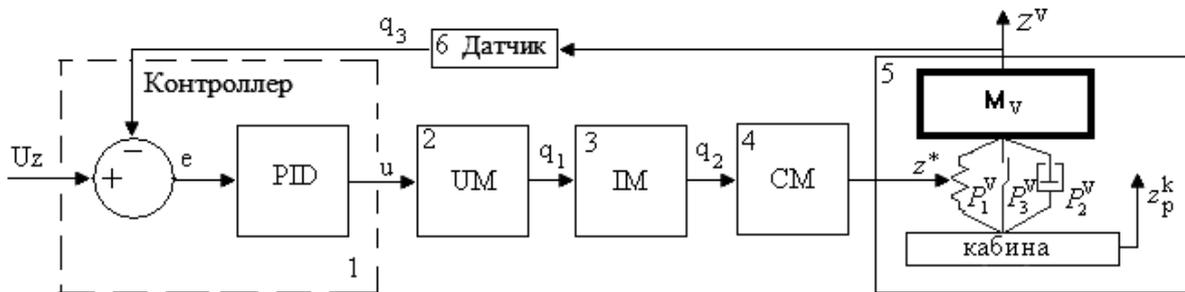


Рис. 2. Схема управления колебаниями сиденья водителя

Система включает контроллер 1, который может быть представлен в виде PID либо ИНС (искусственной нейронной сети), датчик 6, преобразователь-усилитель мощности 2, исполнительный механизм 3, соединительный механизм 4 и объект управления 5. Сигнал с датчика 6 подается в контроллер, где сравнивается с желаемым уровнем  $U_z$  перемещений поддрессоренной массы и вырабатывается управляющий сигнал  $u$ , который поступает на вход электрогидравлического усилителя 2 (рис. 3).

Для моделирования пространственных колебаний колесного трактора с активной СП сиденья водителя следует в систему уравнений (1) добавить уравнения, описывающие основные элементы электрогидравлической опоры (см. рис. 2 и 3), в частности, блоки 2, 3, 6, которые представляют собой аperiodические звенья с заданными постоянными времени и коэффициентами усиления. Дифференциальные уравнения этих элементов имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} T^x \dot{q}_1 + q_1 - k^x u &= 0; \\ T^z \dot{q}_2 + q_2 - k^z q_1 &= 0; \\ T^s \dot{q}_3 + q_3 - k^s z^v &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $T^x, k^x, T^z, k^z, T^s, k^s$  – постоянные времени и коэффициенты усиления блоков 2, 3, 6 соответственно.

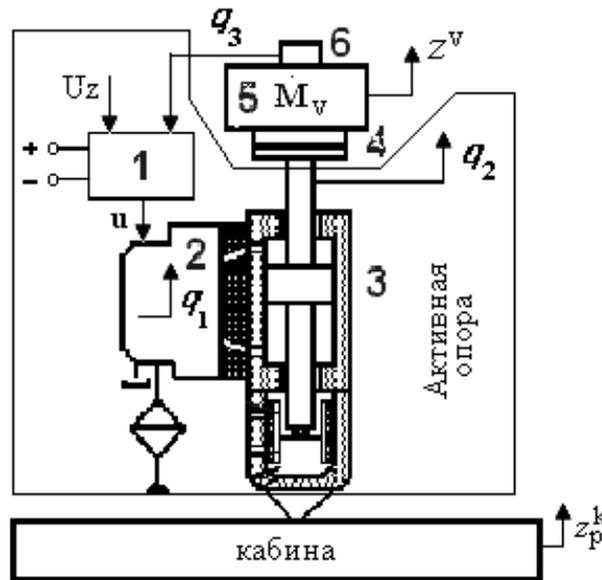


Рис. 3. Схема электрогидравлической опоры сиденья водителя

### Компьютерная модель

Для практического решения задач системного анализа и управления колебаниями сиденья водителя используем методику проектирования систем поддрессоривания мобильных машин, основанную на использовании комплекса программ [7, 8] и отличающуюся тем, что она построена на принципах визуального формирования расчетной схемы объекта исследования, включающей задание его основных массово-геометрических параметров, выбора типа (структуры, способа управления колебаниями – пассивного или активного) и упругодиссипативных характеристик подвески, задание внешней среды функционирования, непосредственный выбор наблюдаемых перемен-

ных, решение задач временного и частотного анализ, оптимизации и др. В соответствии с упомянутой методикой примем основные параметры колесного трактора, как показано на рис. 4.

Методика направлена на реализацию виртуальной среды проектирования, привычной и принятой среди инженеров, в которой инженер-исследователь, конструктор в большинстве случаев не является специалистом в моделировании, а выступает в качестве эксперта в своей предметной области. В основе методики виртуального проектирования лежит дискретная математическая модель (1) мобильной машины (колесного трактора).

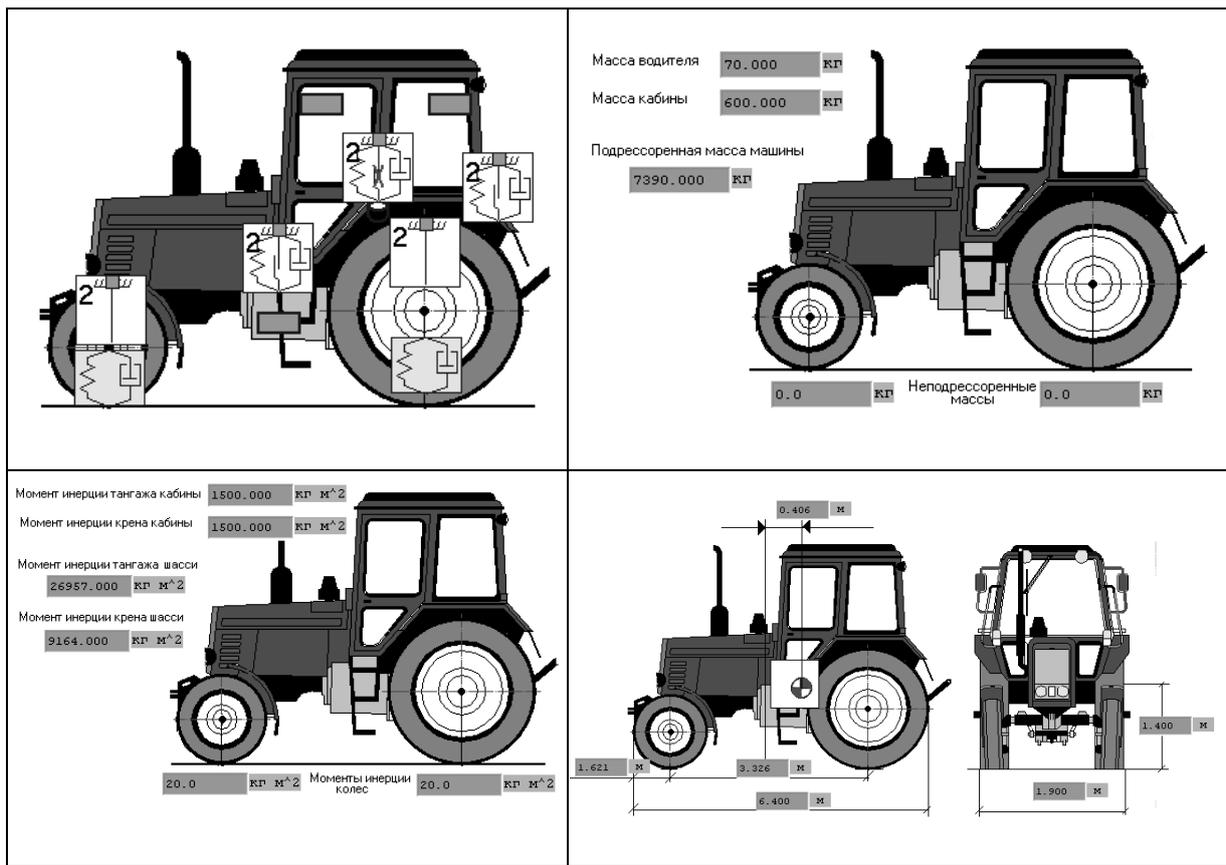


Рис. 4. Основные параметры колесного трактора

**Результаты моделирования**

При проведении сравнительного анализа колебаний водителя на рабочем месте (сиденье), имеющем пассивную и активную системы поддрессирования, практический интерес представляют следующие возможные рабочие режимы движения трактора:

- переезд единичной неровности на заданной скорости;
- движение в транспортном положении.

Для первого режима примем курсовую скорость  $V = 10$  км /ч, длину неровности – 0,5 м, высоту – 0,1 м. При моделировании второго режима предположим, что трактор движется со скоростью  $V = 36$  км /ч по асфальтовой и грунтовой дорогам, микропрофиль которых может быть сгенерирован при помощи алгоритма, основанного на фильтрации белого шума линейным

фильтром с заданной корреляционной функцией. Примем для асфальтовой и грунтовой дорог соответственно функции:

$$R_q(\tau) = 0,013 \cdot (0,65e^{-0,25|\tau|} + 0,35e^{-0,05|\tau|} \cos 0,195\tau);$$

$$R_q(\tau) = 0,0687 \cdot (0,65e^{-0,11|\tau|} + 0,35e^{-0,15|\tau|} \cos 0,36\tau).$$

Оценку качества системы поддрессирования шасси, кабины и сиденья водителя, как отмечалось ранее, проводим по уровням вертикальных перемещений и ускорений и их спектральным распределениям в точках, представленных на рис. 5. На данном рисунке показаны как возможные наблюдаемые фазовые координаты объекта, так и дополнительные переменные, такие как деформации

элементов поддресоривания и колес, возмущения и др.

Кроме этого, оценим работу всей

динамической системы в третьоктавных частотных полосах.

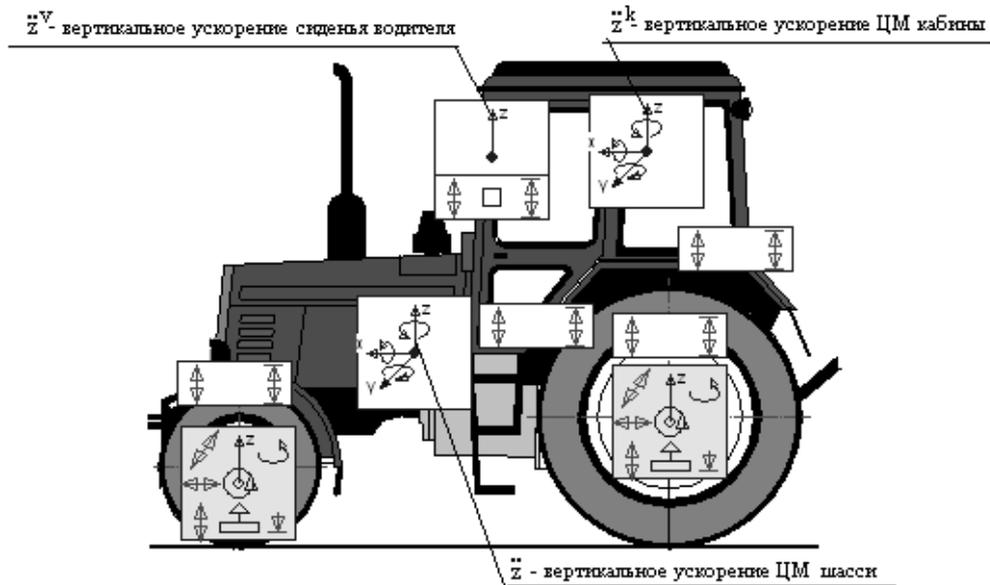


Рис. 5. Схема выбора наблюдаемых переменных

На рис. 6 приведено распределение вертикальных перемещений сиденья водителя при переезде трактором единичной неровности для первого режима движения трактора при различных схемах поддресоривания шасси и сиденья. Из рис. 6, а видно, что наибольшие отклонения перемещений сиденья водителя от положения статического равновесия наблюдаются в случае неподдресорированного шасси (кривая 1). При поддресоривании только задней оси (кривая 2) и полном поддресоривании (кривая 4) достигается примерно в 2 раза снижение амплитуды колебаний сиденья водителя с пассивной СП, а частота вынужденных колебаний приближается к частоте колебаний шасси. Также отметим, что поддресоривание только передней оси незначительно влияет на рассматриваемые колебания (кривая 3) и они близки к схеме неподдресорированного шасси трактора.

При активном управлении колебаниями сиденья водителя (см. рис. 6, б) наблюдается значительное уменьшение амплитуд перемещений (примерно на порядок) для всех конструктивных схем СП шасси.

На рис. 7 приведены результаты анализа вертикальных ускорений на месте сиденья водителя в третьоктавных частотных полосах для случаев пассивного и активного поддресоривания сиденья при движении трактора в транспортном положении по асфальту и грунтовой дороге. При этом рассматривалась схема поддресоривания шасси, когда только передняя ось поддресорирована. Как видно, применение активной СП сиденья водителя позволяет снизить уровни ускорений примерно в 2,5 раза по сравнению с пассивной СП. Это наблюдается как на асфальтовой, так и на грунтовой дороге.

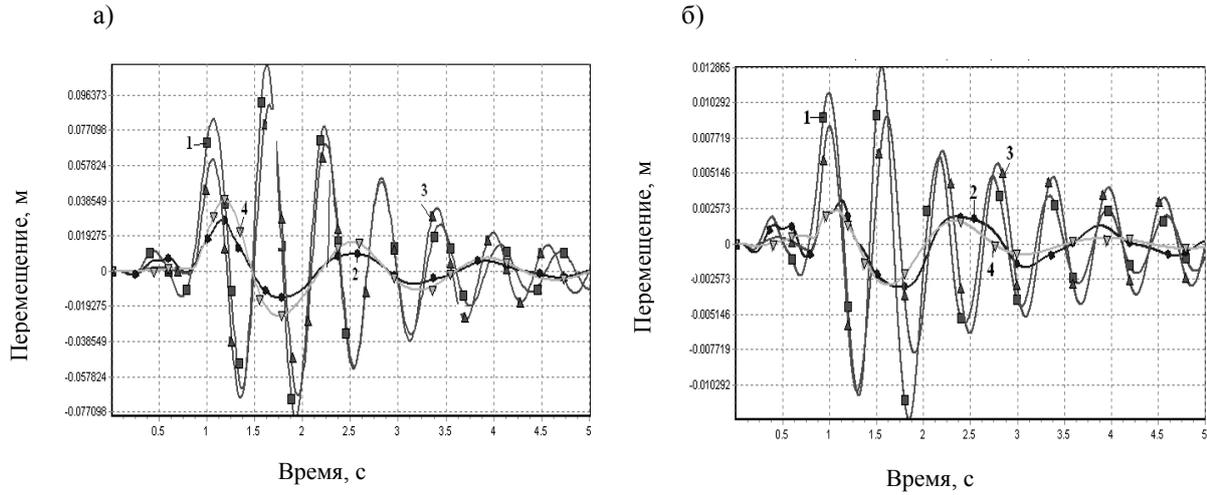


Рис. 6. Распределение вертикальных перемещений сиденья водителя при переезде единичной неровности: а – пассивная СП; б – активная СП; 1 – обе оси неподдрессорены; 2 – только задняя ось поддрессорена; 3 – только передняя ось поддрессорена; 4 – обе оси поддрессорены

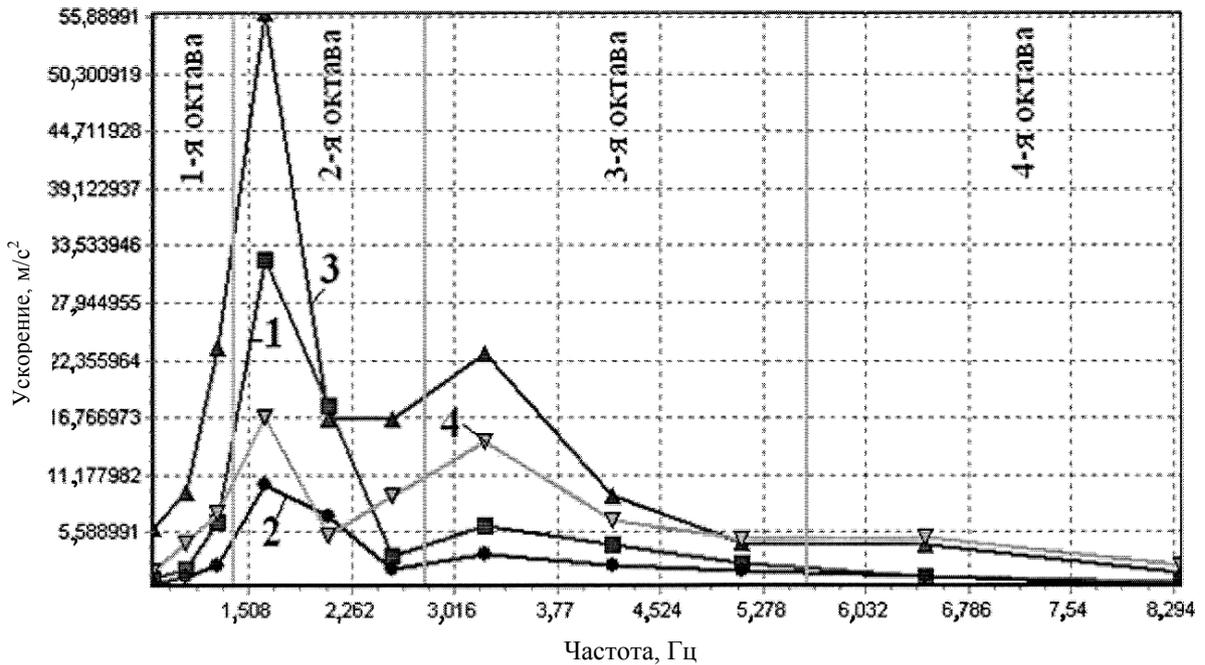


Рис. 7. Распределение вертикальных ускорений на сиденье водителя по третьоктавным полосам: 1 – асфальт, пассивная СП; 2 – асфальт, активная СП; 3 – грунтовая дорога, пассивная СП; 4 – грунтовая дорога, активная СП

### **Заключение**

Анализ колебательных процессов, связанный с динамической нагруженностью водителя трактора, позволил получить оценки вибронегативности при пассивном и активном подрессоривании сиденья водителя. В результате исследований выявлены пути достижения наиболее безопасных условий работы человека-оператора.

Разработанная расчетная схема, математическая модель объекта исследования, методика виртуального проектирования сложных динамических систем в рамках среды ADMOS позволяют в значительной мере сократить сроки проектирования новых и дать оценку колебательным процессам существующих моделей колесных тракторов.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. **Силаев, А. А.** Спектральная теория подрессоривания транспортных машин / А. А. Силаев. – М. : Машгиз, 1963. – 168 с.
2. **Смирнов, Г. А.** Теория движения колесных машин / Г. А. Смирнов. – М. : Машиностроение, 1990. – 352 с.
3. Динамика системы «дорога–шина–автомобиль–водитель» / В. Л. Хачатуров [и др.]. – М. : Машиностроение, 1976. – 535 с.
4. **Фурунжиев, Р. И.** Автоматизированное проектирование колебательных систем / Р. И. Фурунжиев. – Минск : Выш. шк., 1977. – 458 с.
5. **Яценко, Н. Н.** Плавность хода грузовых автомобилей / Н. Н. Яценко, О. К. Прутчиков. – М. : Машиностроение, 1969. – 220 с.
6. **Амельченко, Н. П.** Подвеска сиденья водителя колесного трактора / Н. П. Амельченко, В. А. Ким. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2006. – 179 с.
7. **Гурский, Н. Н.** Моделирование и оптимизация колебаний многоопорных машин : монография / Н. Н. Гурский, Р. И. Фурунжиев. – Минск : БНТУ, 2008. – 296 с.
8. **Гурский, Н. Н.** Виртуальное проектирование ходовой части мобильных машин : монография / Н. Н. Гурский, А. М. Захарик, А. М. Захарик. – Минск : БНТУ, 2010. – 174 с.

*Статья сдана в редакцию 13 сентября 2012 года*

**Игорь Сергеевич Сазонов**, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0222-26-61-00. E-mail: f\_av@bru.mogilev.by.

**Николай Николаевич Гурский**, канд. техн. наук, доц., Белорусский национальный технический университет. Тел.: 8-017-293-95-64.

**Наталья Петровна Амельченко**, канд. техн. наук, доц., Белорусский государственный аграрный технический университет.

**Igor Sergeyevich Sazonov**, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. Tel.: 8-0222-26-61-00. E-mail: f\_av@bru.mogilev.by.

**Nikolai Nikolayevich Hursky**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian National Technical University. Tel.: 8-017-293-95-64.

**Natalia Petrovna Amelchenko**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian State Agrarian Technical University.

**ОХРАНА ТРУДА.  
ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ.  
ГЕОЭКОЛОГИЯ**

УДК 614.39

*В. А. Ильичев, В. И. Колчунов, В. А. Гордон*

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ЗАКРЫТОЙ  
БИОСФЕРОСОВМЕСТИМОЙ ТЕРРИТОРИИ**

UDC 614.39

*V. A. Ilichev, V. I. Kolchunov, V. A. Gordon*

**MATHEMATICAL MODEL OF DYNAMICS OF CLOSED BIOSPHERE  
COMPARTIBLE TERRITORY**

**Аннотация**

В рамках концепции биосферосовместимого и развивающего человека города предложена математическая модель открытой динамической системы для оценки численности населения урбанизированной территории как одной из составляющих человеческого потенциала. В минимальном варианте модель в виде системы трех дифференциальных уравнений с начальными условиями содержит три взаимозависимые функции времени, соответствующие численности населения и двум компонентам окружающей среды, оказывающим негативное влияние на человека: загрязненности атмосферного воздуха и воды. Разработанная методика позволяет перейти к количественной оценке и прогнозированию состояния и динамики составляющих гуманитарного баланса биотехносферы на рассматриваемой территории.

**Ключевые слова:**

биосфера, биосферосовместимые урбанизированные территории, составляющие гуманитарного баланса, человеческий потенциал, загрязнение окружающей среды, численность населения, математическая модель, динамическая система.

**Abstract**

Within the framework of the concept of the biosphere compatible and man developing city, the mathematical model of the open dynamic system for evaluating the population of the urbanized territory as the element of human potential is proposed. In the minimum version the model in the form of the system of three differential equations with initial conditions contains three interdependent functions of time, which correspond to the population size and to two components of environment, which have a negative effect on the man: the pollution of atmospheric air and water. The developed procedure creates the design possibility of quantitative assessment and prediction of state and dynamics of a change in the humanitarian balance of the biotechnosphere in the territory in question.

**Key words:**

biotechnosphere, biospherecompatible urbanized territories, components of the humanitarian balance, human potential, population, environmental pollution, mathematical model, the dynamic system.

В рамках фундаментальных исследований по проблеме «Человек и развитие биосферосовместимых урбанизированных территорий» в Российской академии архитектуры и строительных наук и в Орловском государственном техническом университете (ныне «Госуниверситет–УНПК») выполнены работы [1, 2], в которых с использованием многофакторного нелинейного анализа и систем одновременных уравнений получены регрессионные зависимости между переменной «численность населения» региона и экологическими, техно- и антропогенными факторами: «выбросы в атмосферу загрязняющих веществ, отходящих от стационарных источников», «объем загрязненных сточных вод», «лесовосстановление» и «прирост населения». Объектом исследования была принята территория Орловской области, в которой были собраны и обработаны необходимые статистические данные.

Корреляционный анализ показал, что среди перечисленных выше факторов наиболее сильно с результирующим признаком «численность населения» коррелируют объясняющие признаки «выбросы в атмосферу загрязняющих веществ, отходящих от стационарных источников» и «объем загрязненных сточных вод». Кроме того, решения системы одновременных уравнений показывают, что одни и те же переменные в различных уравнениях могут играть роль результирующих и объясняющих факторов.

Недостатком примененных подходов является, по существу, констатация фактов, т. е. построение статических балансовых соотношений. При этом регрессионные способы прогнозирования, т. е. продолжение набора данных на будущее, базируются на предположении, что правила, определяющие поведение системы в прошлом, сохраняются и в дальнейшем.

Предлагаемая в работе система

дифференциальных уравнений получена как обобщение известного экспоненциального закона развития видов [3]:

$$\frac{dN}{dt} = \varepsilon N,$$

где  $N$  – численность популяции;  $\varepsilon$  – коэффициент прироста;  $t$  – время.

Если рассматривать изменение во времени численности населения  $N_1$  совместно с изменениями таких факторов внешней среды, как объемы выбросов газов  $N_2$  и загрязненных вод  $N_3$ , то можно в простейшем случае представить коэффициенты прироста каждого фактора в виде простых функций от каждого имеющегося фактора. В результате получаем систему дифференциальных уравнений:

$$\frac{dN_r}{dt} = N_r \left( \varepsilon_r + \sum_{s=1}^3 p_{rs} N_s \right);$$

$$p_{rr} = 0; \quad r = 1, 2, 3, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_r$ ,  $p_{rs}$  – некоторые константы.

В развернутом виде система уравнений (1) выглядит следующим образом:

$$\frac{dN_1}{dt} = N_1(\varepsilon_1 + p_{12}N_2 + p_{13}N_3);$$

$$\frac{dN_2}{dt} = N_2(\varepsilon_2 + p_{23}N_3 + p_{21}N_1);$$

$$\frac{dN_3}{dt} = N_3(\varepsilon_3 + p_{31}N_1 + p_{32}N_2). \quad (2)$$

Таким образом, в предлагаемой модели коэффициенты прироста каждого из взаимодействующих факторов:

$$\varepsilon_r + \sum_{s=1}^3 p_{rs} N_s; \quad p_{rr} = 0, \quad r = 1, 2, 3,$$

приняты в виде линейной функции объемов факторов, что означает переменность коэффициентов во времени.

Проблему, как идентифицировать

параметры модели  $(\varepsilon_r, p_{rs})$  и по какой информации, можно решать по-разному. Одним из подходов являются экспертные оценки. В работе коэффициенты математической модели подбирались путем обработки имеющейся статистической информации об изменениях фигурирующих в модели факторов в течение 16-летнего промежутка с 1992 по 2007 гг.

Знаки и числовые значения коэффициентов системы предлагается искать, используя аппроксимирующие функции [1]:

$$N_1^* = 41,5318t^3 - 1492,5805t^2 + 9199,7114t + 891635$$

(коэффициент детерминации  $R^2 = 0,999$ );

$$N_2^* = 0,1517t^2 - 4,0138t + 39,109$$

$$(R^2 = 0,9123);$$

$$N_3^* = 0,0258t^3 - 0,9945t^2 + 9,4645t + 62,62$$

$$(R^2 = 0,71), \quad (3)$$

полученные по результатам построения линий тренда временных рядов для  $N_1$ ,  $N_2$  и  $N_3$ , взятых из соответствующих статистических данных за 16-летний период (1992...2007 гг.).

Дифференцируя функции (3) и приравнявая их производные к правым частям системы (1), получим

$$N_r(\varepsilon_r + \sum_{s=1}^3 p_{rs}N_s) = \frac{dN_r^*}{dt};$$

$$r = 1, 2, 3.$$

Минимизируя далее невязку

$$R_r = (\varepsilon_r + \sum_{s=1}^3 p_{rs}N_s)N_r - \frac{dN_r^*}{dt},$$

получаем значения девяти коэффициентов системы уравнений (1):

$$\varepsilon_1 = -0,01447202218;$$

$$\varepsilon_2 = -1,465087554;$$

$$\varepsilon_3 = -0,1856613088;$$

$$p_{12} = 0,00076530074;$$

$$p_{21} = -0,1520899 \cdot 10^{-5};$$

$$p_{31} = 0,8150704 \cdot 10^{-7};$$

$$p_{13} = -0,000068067;$$

$$p_{23} = -0,0023447475;$$

$$p_{32} = 0,00572864.$$

Подставляя найденные коэффициенты в уравнения системы (1), получим их решения средствами Maple при заданных начальных условиях для  $t=0$  (1992 г.):

$$N_{10} = 899207 \text{ чел.}; N_{20} = 38 \text{ тыс. т};$$

$$N_{30} = 72 \text{ млн м}^3.$$

Адекватность предложенной модели взаимодействия и эволюции рассмотренных выше факторов подтверждается практическим совпадением на протяжении 16-летнего промежутка времени линий тренда  $N_1^*$ ,  $N_2^*$ ,  $N_3^*$  [1] с графиками уравнений (1) (рис. 1).

Можно показать, что долгосрочная аппроксимация полиномами (функции (3) и пунктирные линии на рис. 1) некорректна, т. к. согласно ей объемы факторов неограниченно возрастают, что в действительности невозможно для населения ввиду ограниченности жизненных ресурсов: питания, жизненного пространства, энергетических ресурсов и т. д. Численность населения с течением длительного промежутка времени  $t$  должна стабилизироваться, а не расти.

Применение динамической модели (1) для долгосрочного прогнозирования (~80 лет) позволило установить возможность существования осциллирующих режимов функционирования составляющих рассматриваемой биосфе-

росовместимой системы. На рис. 2 изображены графики функций  $N_1(t)$  с убывающей амплитудой колебаний,  $N_3(t)$  –

с возрастающей амплитудой и  $N_2(t)$  – с практически постоянной амплитудой.

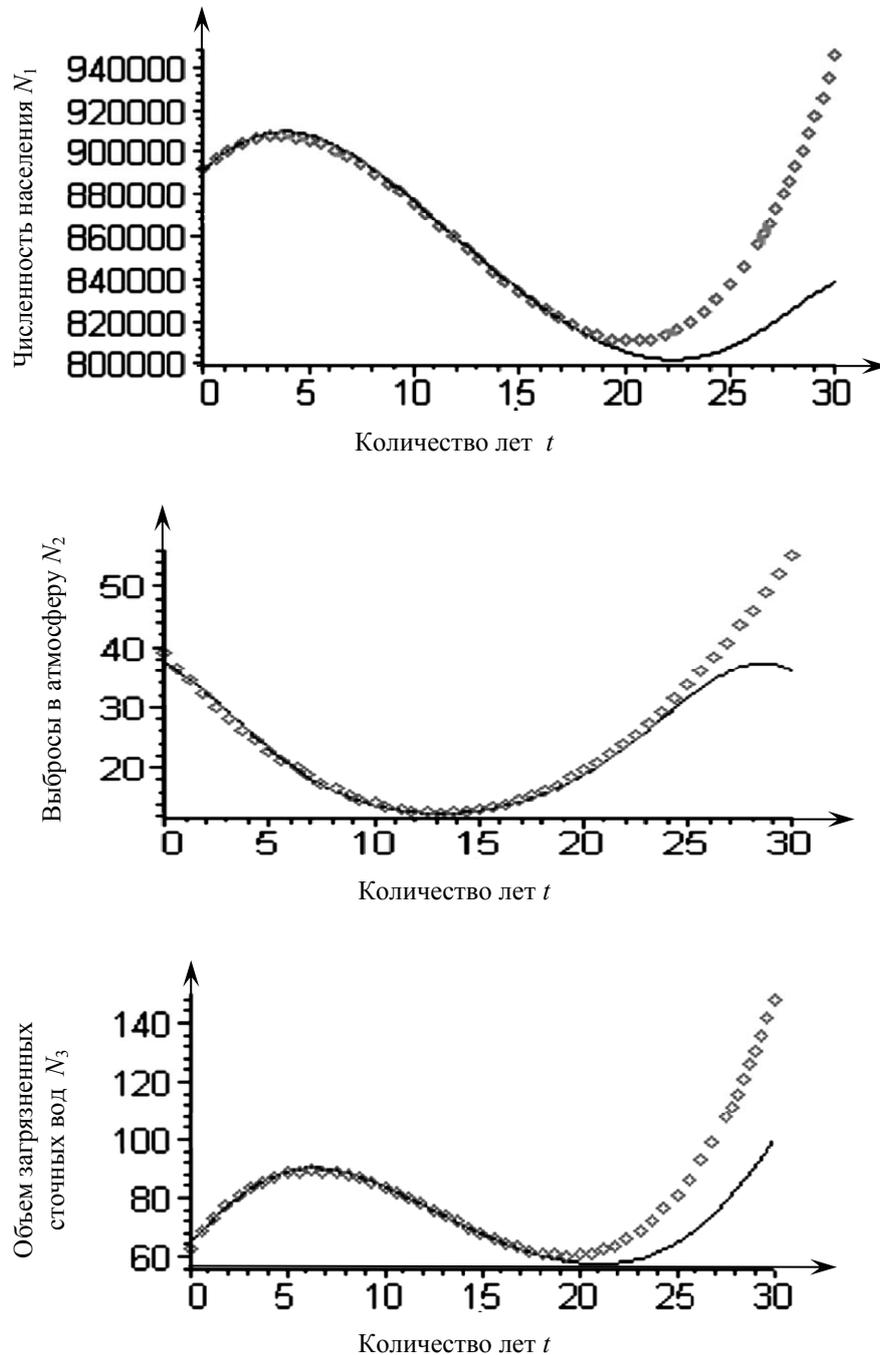


Рис. 1. Графики функций, описывающих изменения факторов  $N_1, N_2, N_3$ : сплошная линия – решение системы (1); пунктир – полиномиальная аппроксимация (3) [1]

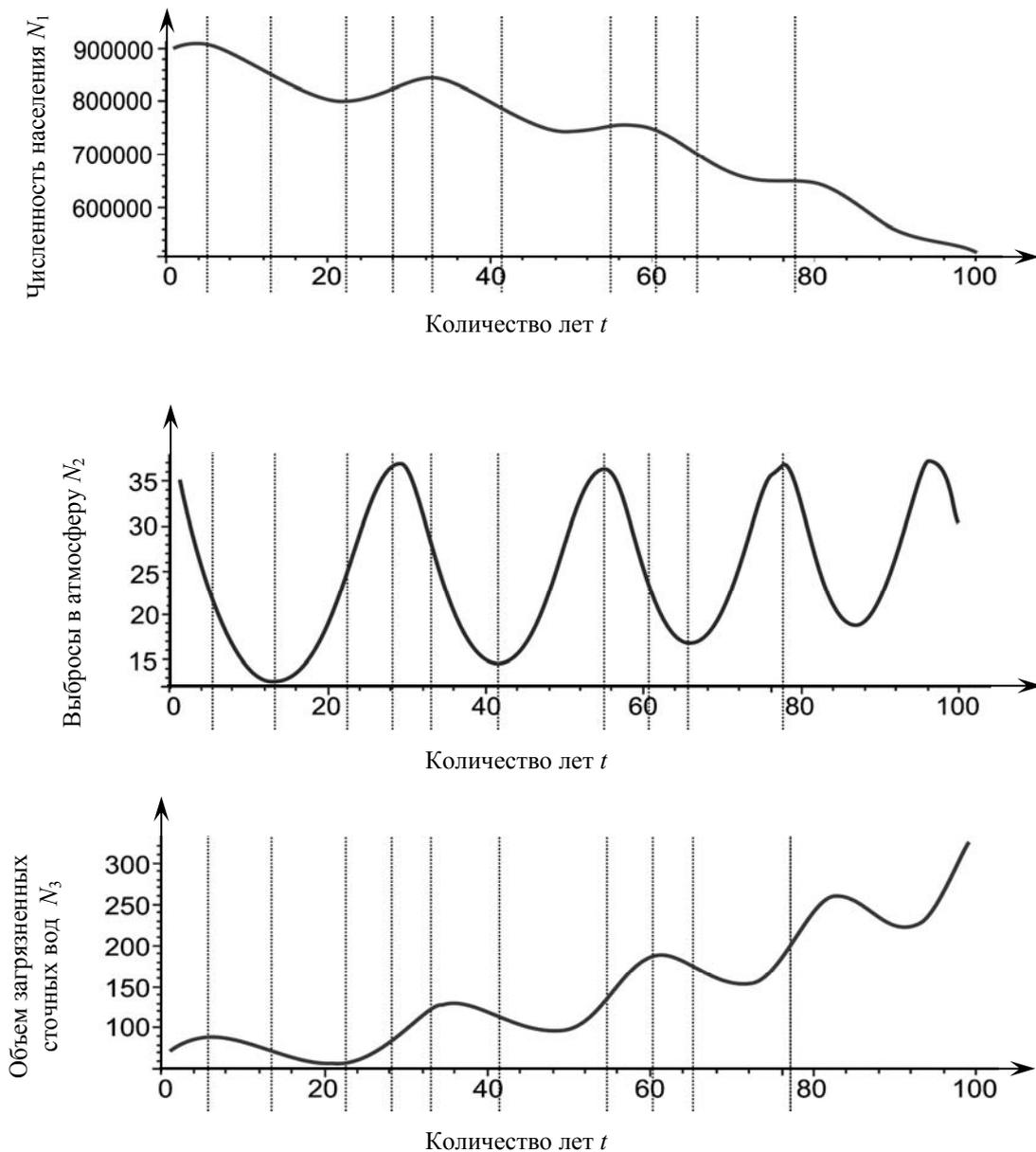


Рис. 2. Прогнозируемые изменения факторов

Как показал анализ графиков (см. рис. 2), изменения всех взаимодействующих факторов: населения, выбросов в атмосферу и загрязнения вод – имеют циклический характер. При этом можно выделить следующие компоненты изменения:

– более или менее монотонный тренд:  $N_1(t)$  – убывает,  $N_2(t)$  и  $N_3(t)$  – возрастают;

– колебания с переменными во времени периодом: первый цикл ~30 лет, второй цикл ~25 лет, третий цикл ~18 лет.

Сравнив три графика (см. рис. 2), можно отметить различие в характере взаимозависимости человека и вредных воздействий, порожденных его жизнедеятельностью.

Из сопоставления графиков  $N_1(t)$

и  $N_3(t)$  следует, что изменение численности населения практически синхронно изменяется с уровнем загрязнения вод, тогда как уровень выбросов в атмосферу  $N_2(t)$  изменяется так, что экстремумы (точки перегиба графика) этой функции совпадают по времени с точками перегиба (экстремумами) на графиках изменения функций  $N_1(t)$  и  $N_3(t)$ . Заметим, что точки перегиба на графиках определяют момент перемены знака ускорения соответствующего процесса. В начале цикла ускоренное снижение численности населения сопровождается уменьшением выбросов до минимального значения, соответствующего точке перегиба на графике изменения численности населения. Продолжающееся замедленное снижение численности и переход через минимум к медленному возрастанию населения приводят к возрастанию выбросов, максимум которых достигается к моменту перегиба – ускоренному возрастанию численности. Население ускоренно увеличивается и более интенсивно производит выбросы.

Оба фактора растут, пока выбросы не достигнут максимума – начинается медленный рост населения. Далее циклы повторяются с уменьшением их длительности.

Рост объемов загрязненных вод  $N_3(t)$  при общем снижении численности населения  $N_1(t)$  можно объяснить

аккумуляцией загрязнений вод и сложным, длительным процессом естественной регенерации. Стремление объемов выбросов в атмосферу  $N_2(t)$  к некоторой средней константе с уменьшением амплитуды осцилляций связано с возможностью рассеивания загрязнений на рассматриваемой территории.

Построенная модель и метод ее исследования позволяют включить в коэффициенты прироста различные естественные и искусственные управляющие воздействия из матрицы В. А. Ильичева, предположительно влияющие на динамику рассматриваемой системы.

Предлагаемый в работе метод идентификации параметров динамической системы не предполагает какого-либо механизма формирования состояния системы, он лишь строит долгосрочный прогноз, опираясь на начальные условия и на предположение, что те факторы (внешние воздействия, обстоятельства, допущения, ограничения и т. д.), которые 16 лет обуславливали поведение системы, останутся теми же на прогнозируемый период.

Из анализа графиков (см. рис. 1 и 2) следует важный вывод о том, что в долгосрочной перспективе при сохранении существующих уровней загрязнения биосферы темпы сокращения населения в регионах останутся высокими и перелома кризисных тенденций в демографической сфере нет оснований ожидать.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ильичев, В. А.** Методика прогнозирования показателей биосферосовместимости урбанизированных территорий / В. А. Ильичев, В. И. Колчунов, В. А. Гордон // Градостроительство. – 2010. – № 1. – С. 37–43.
2. **Ильичев, В. А.** Методика моделирования параметров биосферосовместимости урбанизированных территорий / В. А. Ильичев, В. И. Колчунов, В. А. Гордон // Строительство и реконструкция. – 2010. – № 5. – С. 67–75.
3. **Вольтерра, В.** Математическая теория борьбы за существование / В. Вольтерра. – М.: Наука, 1976. – 286 с.

Статья сдана в редакцию 10 октября 2012 года

**Вячеслав Александрович Ильичев**, д-р техн. наук, проф., вице-президент Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), Москва.

**Виталий Иванович Колчунов**, д-р техн. наук, проф., академик РААСН, директор Архитектурно-строительного института Госуниверситета–УНПК, Орел.

**Владимир Александрович Гордон**, д-р техн. наук, проф., советник РААСН, зав. кафедрой Госуниверситета–УНПК, Орел. Тел.: 8-4862-41-98-48, 8-92-08-01-50-39. E-mail: Gordon@ostu.ru.

**Vyacheslav Alexandrovich Pichev**, DSc (Engineering), Prof., Vice President of the Russian Academy of Architecture and Building science (RAABS), Moscow.

**Vitaliy Ivanovich Kolchunov**, DSc (Engineering), Prof., academician of the RAABS, Director of Institute of Architecture and Building of State University-UNPK, Oryol.

**Vladimir Alexandrovich Gordon**, DSc (Engineering), Prof., advisor of the RAABS, Head of the department of State University-UNPK, Oryol. Tel.: 8-4862-41-98-48, 8-92-08-01-50-39. E-mail:Gordon@ostu.ru.

## ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 681.7.068:66.62

*А. П. Марков*

### ОСОБЕННОСТИ СВЕТОВОДНОЙ МУТНОМЕТРИИ

UDC 681.7.068:66.62

*A. P. Markov*

### FEATURES OF LIGHT GUIDE TURBIDITY

#### **Аннотация**

Дан сравнительный анализ методов и средств контроля мутности жидких сред. Определены основные информативные параметры зондирующего излучения. На основе проведенных исследований сделаны выводы о целесообразности использования датчика рассеянного в обратном направлении излучения для увеличения диапазона измерения турбидиметра.

#### **Ключевые слова:**

турбидиметр, нефелометр, мутномер, волоконно-оптический датчик, световод, технические масла.

#### **Abstract**

The comparative analysis of methods and techniques of monitoring the turbidity of liquid mediums is given. Basic informative parameters of probe radiation are determined. Based on the research carried out, the conclusions are made concerning the appropriateness of using a meter of radiation scattered in the opposite direction to increase the measuring range of a turbidimeter.

#### **Key words:**

turbidimeter, nephelometer, haze meter, fiber-optical sensor, light guide, engineering oils.

Для производств машиностроительного комплекса, нефтехимической, бумажной и других отраслей важное значение имеет оперативный контроль состояния технических сред и масел, сопутствующих отдельным технологическим операциям [1, 2]. В большом разнообразии гидравлических, редукторных и циркуляционных масел широко представлены закалочные масляные и водосмешиваемые смазочно-охлаждающие жидкости литейного производства.

Экспресс-контроль непосредственно в производственном процессе позволяет получать необходимую инфор-

мацию о работоспособности оборудования и характере выполнения технологических операций и оперативно корректировать и управлять параметрами используемых технических сред и масел. По их текущим значениям можно проанализировать работоспособность отдельных блоков и узлов, технологического оборудования, производственный брак, отказы и потери.

Состояние и свойства технических сред и масел позволяют выявить причины и механизмы появления и развития различных отклонений, сказывающихся на нормированном ресурсе безотказной работы оборудования.

Современные технологии контроля дисперсных сред используют основной физической эффект наличия и концентрации неоднородностей – прозрачность в спектральной области некоторых излучений. Различия в оптических эффектах взаимодействия излучения с однородной средой и неоднородностями позволяют получать достоверные данные о средах.

Для непрерывных измерений концентрации мелкодисперсных сред, содержание твердых частиц в которых составляет 100 мг/л и менее, наиболее эффективны и перспективны оптические концентратометры [3]. Они воспринимают рассеянное дисперсной средой в боковом направлении – нефелометры или прошедшее через нее излучения – турбидиметры. В нефелометрах используется зависимость информативного излучения рассеяния от определенного угла к направлению потока воздействующего излучения. На этой основе строятся информационно-измерительные приборы для определения мутности, а также концентрации и распределения частиц. По своей природе нефелометры являются средствами относительных измерений, что требует наличия определенных эталонов (стандартов) мутности. Эти стандарты по форме, размерам и распределению частиц, а также по коэффициенту преломления должны строго согласовываться с характеристиками контролируемой жидкости.

На зависимости коэффициента рассеяния от размеров, формы, числа частиц и от разности коэффициентов преломления среды и частиц основывается оптический метод измерения мутности – турбидиметрический. Сущность его состоит в следующем: если через мутную среду пропускать световой поток, то часть света рассеивается взвешенными частицами и чем выше концентрация взвеси в контролируемой среде, тем большая часть света его рассеивается. При этом мерой concentra-

ции взвешенных частиц является ослабление интенсивности прошедшего через слой контролируемой среды светового потока [4].

Для контроля концентрации дисперсной среды (нерастворенных взвешенных частиц) в жидкостях данный метод применяется довольно широко. Турбидиметры используются для контроля мутности, являющейся комплексной характеристикой содержания твердой фазы средой. Диапазон измерения прибора позволяет работать со средами от низкой до высокой степени мутности (но не более 1100 FNU) [5].

Средства контроля мутности (рис. 1, а) [5] определяются условиями применения и фирмой-изготовителем. Условно они делятся на лабораторные, переносные и портативные. Соответственно, чем выше класс прибора, тем большую точность измерения он может обеспечить, однако мобильность в данном случае уменьшается с увеличением массогабаритных характеристик. Для размещения проб неоднородных сред используются специальные кюветы. Забор проб и их транспортировка осуществляются с помощью пробоотборников (рис. 1, б), что в некоторой мере улучшает ограниченную мобильность мутномеров, но не решает проблем экспресс-контроля полностью. В промышленных образцах современных турбидиметров применяются встраиваемые волоконно-оптические датчики (рис. 1, в). Для мобильных систем контроля данные датчики неприменимы.

Волоконные световоды используются для каналирования излучения, обеспечивают его передачу в нужную точку пространства, т. е. решают задачу передачи излучения на расстояние по необходимой траектории.

В настоящее время практически не производятся приборы измерения мутности с выносными оптическими датчиками для экспресс-контроля. Между тем потребность в недорогом и универсальном приборе для такого рода работ воз-

растает. Данное средство измерения должно обладать следующими характеристиками: небольшая масса и габариты, долгое время автономной работы, погрешность измерения не ниже 2 %, широкий диапазон измерения, наличие

выносных волоконно-оптических зондов, возможность контроля в видимом диапазоне, низкая (не более 500 долл.) цена. Исходя из этих требований и производится разработка устройства.



Рис. 1. Средства контроля мутности: а – турбидиметры; б – пробоотборники; в – волоконно-оптические датчики

На данный момент существуют стандарты измерения мутности, определяющие единицы, параметры источника излучения и способы детектирования (рис. 2) [6].

При этом основным является так называемый формазиновый стандарт, где одной единице соответствует 1 мг формазина, растворенный в 1 л воды. Реже применяется взвесь каолина. Стандартные взвеси данных веществ используются для калибровки как турбидиметров, так и нефелометров. Основные источники излучения – вольфрамовая лампа и ИК светодиод. Применение инфракрасного света позволяет контролировать окрашенные растворы и взвеси. Ряд методик контроля технических масел использует диапазон 500...540 Н·м. Стандартизированы также и углы приема излучения: 90, 135, 180 и 275<sup>0</sup> от оси излучателя [6]. Согласно существующим стандартам

определены и основные информативные потоки излучения (рис. 3).

Для разработки переносного турбидиметра с волоконно-оптическим датчиком необходимо: определить спектральный диапазон зондирующего излучения; выбрать источники, приемники и трансляторы излучения с учетом решаемых задач; определить, какие именно информативные параметры зондирующего излучения будут использоваться для проведения контроля с учетом выбранной элементной базы; провести экспериментальные исследования и моделирование волоконно-оптического датчика; разработать способ контроля мутности на основе проведенных исследований.

Основной источник излучения для приборов данного типа – светодиод. Обладая достаточной мощностью при малых габаритах, он без проблем согласуется с волоконно-оптическим жгутом, имея выходную апертуру, аналогичную входной апертуре жгута (30<sup>0</sup>).

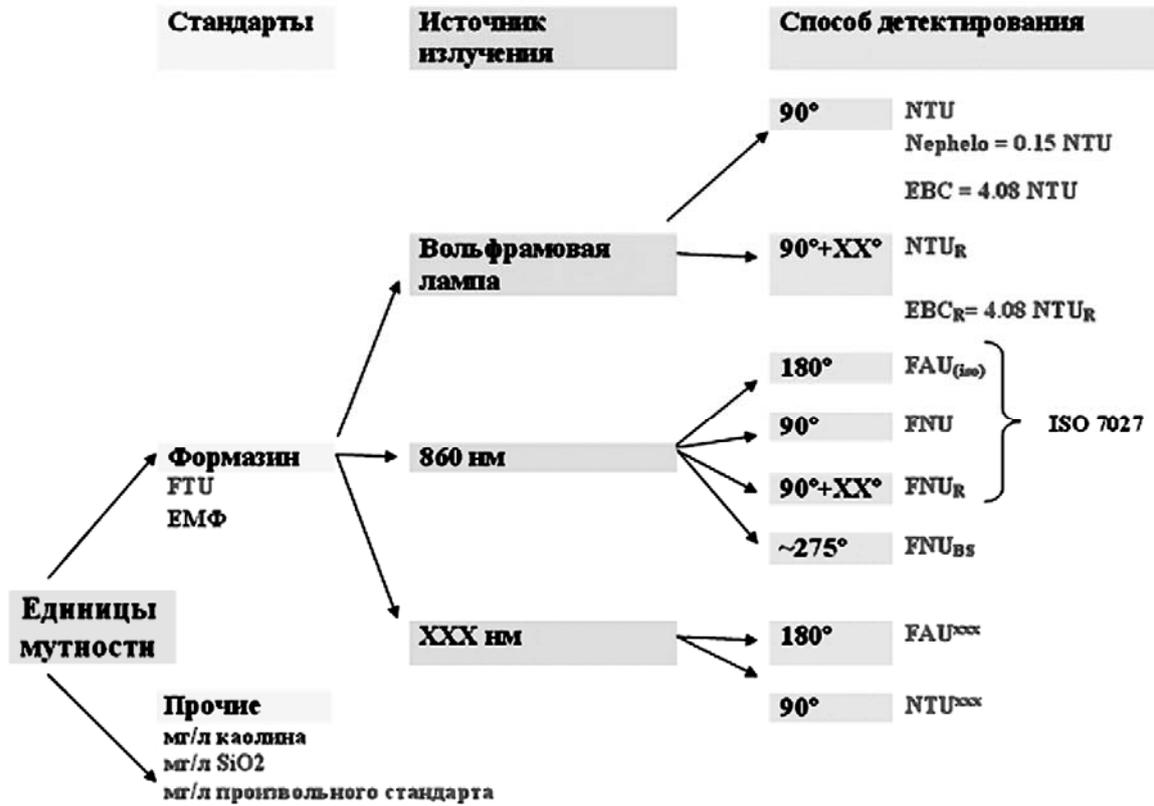


Рис. 2. Единицы и стандарты измерения мутности

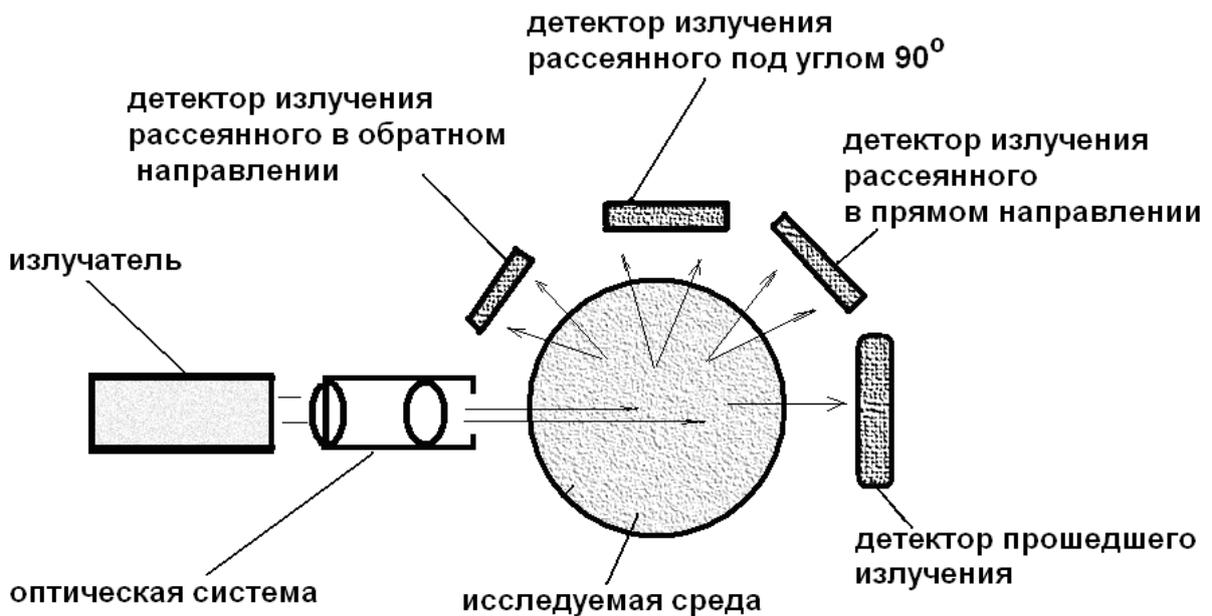


Рис. 3. Схема направленности основных информативных потоков излучения и расположения детекторов

Выпускаются светодиоды с длинами волн излучения от 430 до 980 нм. Ряд методик контроля технических масел использует диапазон 500...540 нм, поэтому логично выбрать для проектируемого прибора диапазон зондирующего излучения 500...880 нм и применять для этих целей именно светодиоды.

В качестве приемника используем кремниевый фотодиод, подходящий по своим спектральным характеристикам выбранному нами диапазону излучения. Вместе с тем накладываются определенные ограничения на применяемые электронные компоненты в ценовом диапазоне.

При анализе световодного тракта передачи оптической информации необходимо учитывать спектральные характеристики его составных элементов. При использовании спектрально «окрашенной» информации общая эффективность передачи оптической системы повышается. Выбор и систематизация методов и схем осуществляются по следующим группам характеристик:

- спектральные (излучательные и отражательные) способности объектов контроля;
- спектральные характеристики источников излучения;
- спектральные способности про-

пускания излучения основными разновидностями трансляторов оптической информации и элементами первичного преобразователя;

- спектральные характеристики фотоприемных элементов.

Напротив, если имеет место спектральное рассогласование приемопередающих элементов оптического тракта датчика, а также трансляторов излучения, общая эффективность работы системы существенно снижается.

Спектральные характеристики ряда волокон представлены на рис. 4 [7].

Более предпочтительным является использование световодных жгутов на основе флинтов исходя из меньшего затухания излучения в выбранном диапазоне.

Могут быть использованы также и кварцевые волокна, светопотери в которых минимальны, но неравномерность спектральной характеристики в области 500...700 нм может нивелировать это преимущество. Применение полимерных световодов нецелесообразно из-за неравномерной спектральной характеристики и высоких потерь излучения в волокне. Спектральные характеристики приемников излучения представлены на рис. 5.

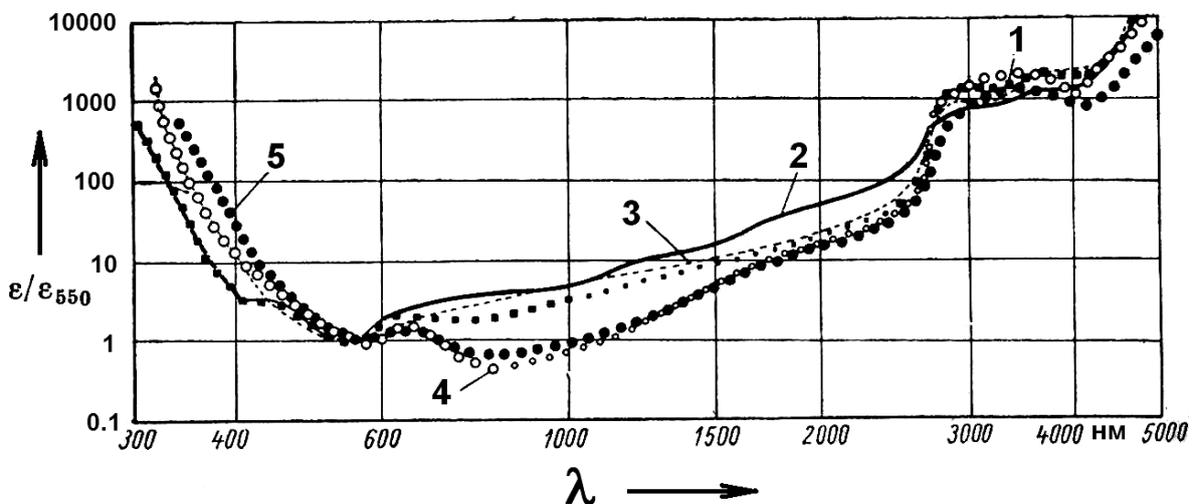


Рис. 4. Средние относительные спектральные кривые коэффициента светопоглощения  $\epsilon/\epsilon_{550}$  оптических стекол: 1 – кроны; 2 – баритовые кроны; 3 – тяжелые кроны; 4 – флинты; 5 – тяжелые флинтты

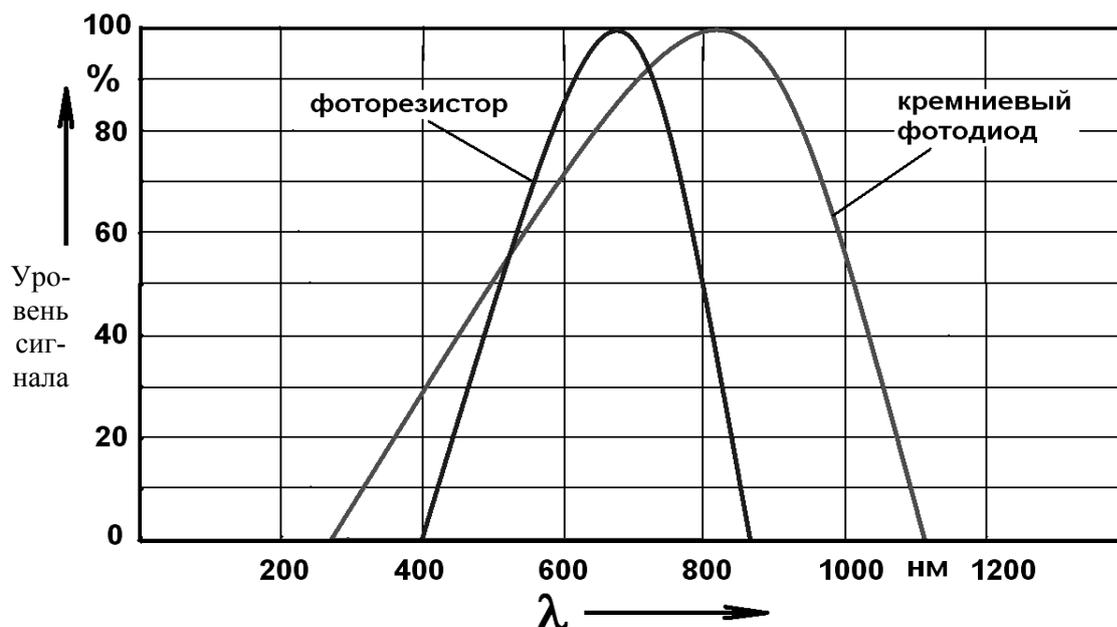


Рис. 5. Спектральные характеристики приемников излучения

В выбранном спектральном диапазоне кремниевый фотодиод более применим для преобразования информативного излучения, но снижение чувствительности на длине волны 500 нм, по сравнению с 800, требует соответствующих технических решений для nivelирования разницы. Светодиоды в диапазоне излучения 500...900 нм современных приборов сигнал с одного из датчиков является основным, а другие – вспомогательными (рис. 6). Наиболее широко применяется нефелометрический детектор, обладающий квазилинейной характеристикой при контроле слабо мутных сред и имеющий предел измерения при мутности 2000 FNU. Основной недостаток – низкий уровень сигнала, особенно при малых уровнях мутности (до 50 FNU). Угол наклона кривой графика зависит от оптических характеристик среды, в том числе рассеивающей и отражающей способностей частиц.

Турбидиметрический детектор применяется при контроле уровней мутности до 1100 единиц. Он обладает высокой чувствительностью и большим уровнем сигнала при малых уровнях

ладают полушириной спектральной характеристики 20...30 нм.

Для выбора информативных потоков излучения требуется провести исследования возможности регистрации потоков с помощью волоконно-оптических датчиков.

В оптико-электронных схемах мутности. Характер кривой имеет вид экспоненты, но при больших уровнях мутности чувствительность такого способа падает.

В большинстве схем детекторы прямого и обратного рассеяния применяются как вспомогательные. С их помощью компенсируются погрешности, связанные с нарушением закона Бугера при попадании на детектор рассеянного в прямом направлении излучения. В других случаях использование вспомогательного детектора позволяет увеличить диапазон измерения, когда сигналы прочих детекторов выходят за его пределы. Теоретически с помощью детектора обратнорассеянного излучения возможно измерять уровни мутности до 10000 единиц по формазину.

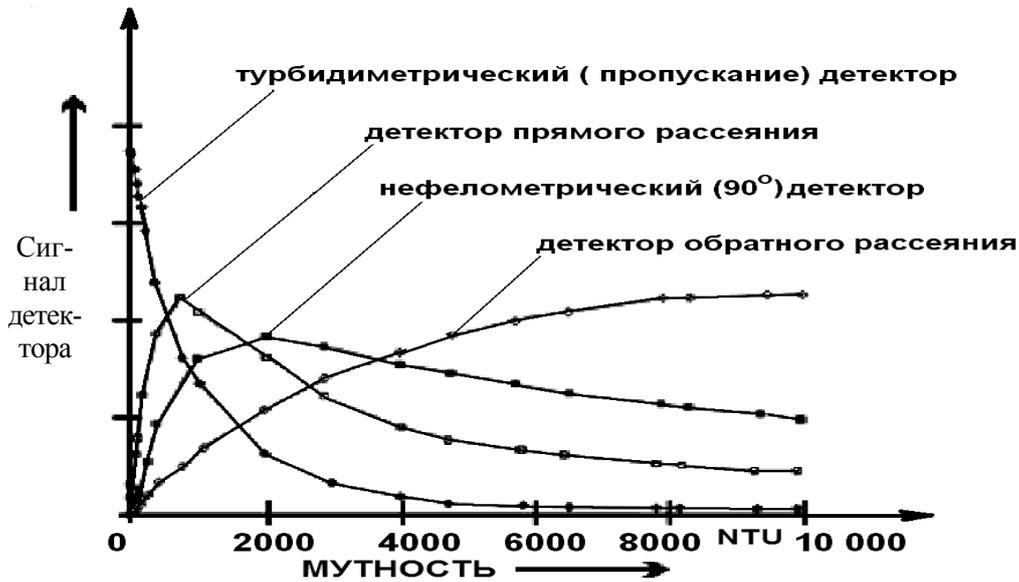


Рис. 6. Графики выходных сигналов детекторов

Применение детекторов прямого рассеяния связано с некоторыми особенностями. Во-первых, в ряде случаев характерен более слабый, чем у нефелометрического детектора, сигнал, во-вторых – особые требования к оптической схеме по параллельности потока зондирующего излучения. При выходной апертуре световодов в жидкостях от

20 до 23<sup>0</sup> полностью выполнить эти требования не представляется возможным без включения в оптический тракт дополнительных элементов.

Решение задачи контроля уровней сигналов производилось с помощью установки, схема которой представлена на рис. 7.

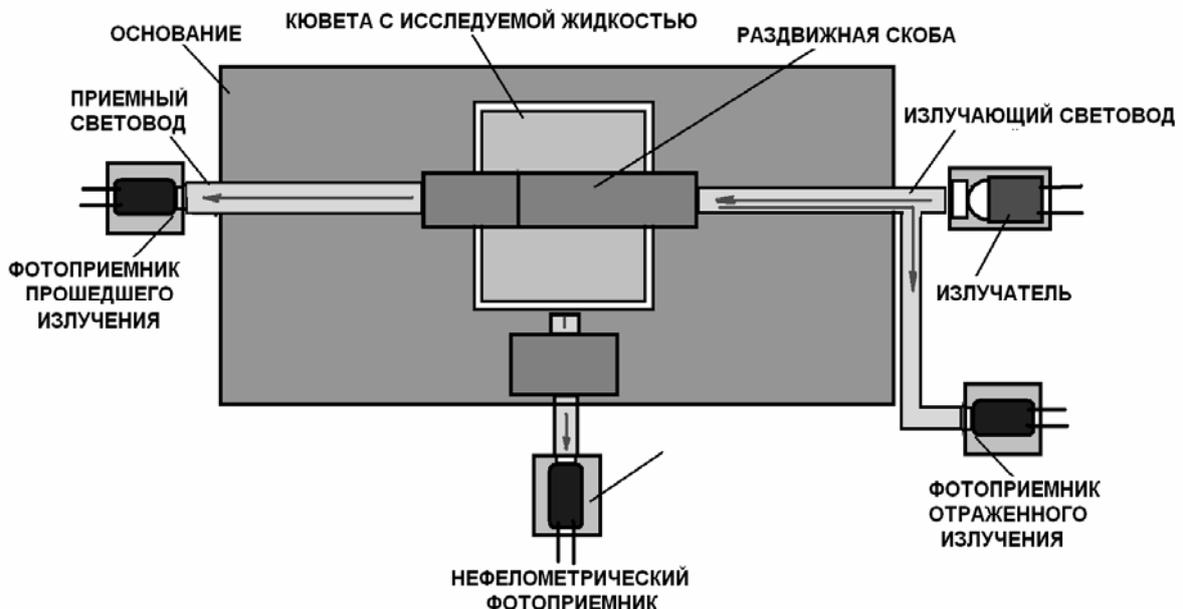


Рис. 7. Схема экспериментальной установки

В качестве исследуемых образцов использовались водные взвеси полимерных порошков, глин и растворы масел. Исследовались уровни сигналов при различных концентрациях взвесей с различными детекторами.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что использование нефелометрического детектора нецелесообразно из-за малой интенсивности излучения. Для сравнения: амплитуды сигнала турбидиметрического и нефелометрического датчиков на экспериментальных образцах при концентрации частиц 50 мг/л составляли 950 и 35 мВ; 890 и 24 мВ; 865 и 26 мВ и 790 и 34 мВ соответственно. Данное соотношение наблюдалось при двухкратном увеличении площади световода приемного канала нефелометрического детектора по сравнению с турбидиметрическим.

При высоких значениях мутности (более 800 FNU) целесообразно применение детектора обратного рассеяния как основного и расширения за счет этого диапазона измерения прибора. Но данное условие выполняется только в исследуемых образцах, мутные среды которых обладают достаточной для регистрации информативного излучения отражающей способностью. При снижении уровня сигнала рассеянного в обратном направлении излучения ниже определенного порога использование его как информативного параметра невозможно. С подобными проблемами сталкиваются и в нефелометрах, т. к. угол наклона кривой нефелометрического датчика (а соответственно, и чувствительности) напрямую зависит от коэффициента рассеяния частицами излучения под углом  $90^0$ . В результате более темные частицы (например, включения сажи) будут давать более слабый сигнал, чем частицы мела.

Таким образом, в качестве информативных параметров для волоконно-оптического датчика выбираем характе-

ристики прошедшего и рассеянного в прямом направлении излучений.

Рассмотрим турбидиметрический канал. Согласно данному методу, количественное соотношение между входным световым потоком и выходным определяется уравнением

$$\Phi_{\text{п}} = \Phi_0 \exp(-k L N),$$

или

$$\text{Lg}(\Phi/\Phi_0) = k L_0 N = D, \quad (1)$$

где  $\Phi_0$  и  $\Phi_{\text{п}}$  – входной и выходной световые потоки;  $L_0$  – толщина просвечиваемого слоя;  $N$  – количество частиц в единице объема;  $D$  – оптическая плотность слоя;  $k$  – коэффициент ослабления.

Для канала рассеянного в обратном направлении (отраженного) излучения

$$\Phi_{\text{р}} = \Phi_0 k_0 N, \quad (2)$$

где  $\Phi_{\text{р}}$  – световой поток рассеянного в обратном направлении излучения;  $k_0$  – коэффициент, учитывающий оптические характеристики частиц и среды.

В принципе, формула расчета светового потока рассеянного в обратном направлении излучения похожа на аналогичную, используемую в нефелометрии. Естественно, коэффициенты будут разные.

Применительно к волоконно-оптическим датчикам математическую основу волоконно-оптических преобразователей (ВОП) составляет модель функции преобразования, которая по аналогии с моделью оптрона может быть представлена зависимостью тока фотоприемника от множества параметров внешних факторов

$$I_{\text{ф}}(x_1 \dots x_n) = \Phi_0 t F(x_1 \dots x_n) S_{\text{и}}, \quad (3)$$

где  $\Phi_0$  – поток, испускаемый источником;  $t$  – коэффициент спектрального согласования элементов ВОП;  $F(x_1 \dots x_n)$  – функция передачи оптического тракта;  $S_{\text{и}}$  – интегральная чувствительность фотоприемника.

Очевидно, что максимальное теоретическое значение тока фотоприемника с бесконечно-линейной световой характеристикой

$$I_{\Phi} = \Phi_0 S_{\text{н}} t = \text{const.} \quad (4)$$

В этом случае функция преобразования может оцениваться по поведению функции передачи оптического тракта, которую можно назвать условной функцией преобразования ВОП.

В свою очередь,

$$F(x_1 \dots x_n) = T T(x_1 \dots x_n), \quad (5)$$

где  $T$  – коэффициент передачи световодного тракта;  $T(x_1 \dots x_n)$  – функция коэффициента передачи тракта «передающий торец световода – объект контроля – приемный торец световода».

Следовательно, функция преобразования ВОП определяется отношением потока излучения, попадающего в приемный световод, к потоку излучения, выходящему из передающего световода.

Для практических расчетов световодного первичного преобразователя датчика выведена формула

$$\Phi = \Phi_0 (t_1 t_2 t_3 t_4 t_5 t_6 R_p) : (td(A) L + R_i), \quad (6)$$

где  $R_p$  – радиус приемного световода;  $L$  – расстояние до отражателя (база датчика);  $A$  – апертурный угол;  $R_i$  – радиус излучающего световода;  $t_1$  – коэффициент ввода излучения в световод;  $t_2$  – коэффициент пропускания световодов;  $t_3$  – коэффициент ввода излучения в фотоприемник;  $t_4$  – коэффициент спектрального согласования фотоприемника и излучателя;  $t_5$  – коэффициент пропускания излучения средой;  $t_6$  – коэффициент, учитывающий изменение топографии распределения светового потока в пространстве в зависимости от типа излучателя.

При применении датчика отраженного излучения  $t_5$ , соответственно, – коэффициент обратного рассеяния средой.

Для практических расчетов целесообразно (при применении стандартных световодов и источников излучения) принять общий коэффициент передачи оптического тракта, который находится экспериментально для каждого типа световода, приемника и излучателя ( $T_0 = t_1 t_2 t_3$ ).

В предлагаемом методе при выборе схем мутнометрии в качестве определяющего критерия принимается чувствительность или диапазон. При этом оптическая база первичного преобразователя (рис. 8) выбирается исходя из условия  $\Phi_p = \Phi_n$ , когда в нижней границе диапазона измерений по турбидиметрической схеме сигналы с выходов датчиков уравниваются. Практически это условие обеспечивается при мутности исследуемой среды, составляющей 90 % мутности образца.

В конструкции преобразователя выбор максимально возможной оптической базы определяется необходимостью увеличения чувствительности датчика. При снижении сигнала турбидиметрического канала до некоторого значения в качестве информативного параметра используется сигнал с датчика обратного рассеяния, что позволяет увеличить диапазон измерения. Однако, если в пределах заданной мутности среды сигнал с датчика обратного рассеяния не превышает уровень сигнала турбидиметрического, применение данного метода неэффективно. Интенсивность отраженного неоднородностями излучения в значительной мере зависит от отражающей способности частиц и самой среды, т. е., чем чище среда и чем лучше частицы отражают и рассеивают свет – тем больше интенсивность отраженного излучения и наоборот.

Практическая реализация данного метода позволила расширить диапазон измерения контролируемых образцов (взвесь полимерного порошка) в 1,5...4 раза в зависимости от вида порошка. Например, в пробе № 1, состоящей из частиц белого полимера размерами от 5 до 20 мк,

диапазон измерения увеличился с 1,2 до 4,5 г/л; в пробе № 2 (серый порошок) – с 1,1 до 3,2 г/л; в пробе № 3 (темно-серый порошок) – с 1,1 до 2,5 г/л. Контроль с применением данного метода моторных

и гидравлических масел невозможен, т. к. частицы загрязнений имеют низкую отражающую способность и условие равенства сигналов не выполняется.

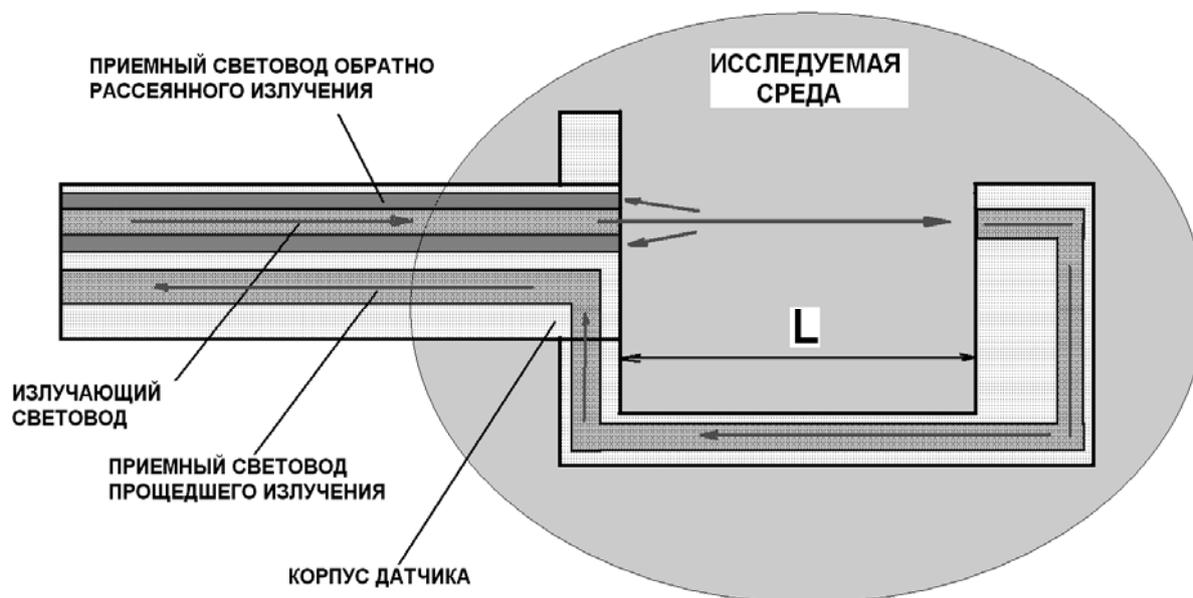


Рис. 8. Первичный преобразователь волоконно-оптического датчика

### Выводы

В результате проведенных исследований и анализа исходных данных определен спектральный диапазон зондирующего излучения (500...880 нм); выбраны источники, приемники и трансляторы излучения с учетом решаемых задач; определены информа-

тивные параметры зондирующего излучения; проведены экспериментальные исследования и моделирование волоконно-оптического датчика, на основе которых разработан метод, позволяющий увеличить чувствительность и расширить диапазон измерения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Максименко, А. Н. Оптико-волоконный контроль технических сред и масел строительно-дорожных машин и агрегатов / А. Н. Максименко, А. П. Марков, А. Г. Старовойтов // Метрология и приборостроение. – 2005. – № 3. – С. 20–24.
2. Барковский, В. Ф. Основы физико-химических методов анализа / В. Ф. Барковский, Т. Б. Горденцева, Н. Б. Топорова ; под ред. В. Ф. Барковского. – М. : Высш. шк., 1983. – 247 с.
3. Андреев, В. С. Лабораторные приборы для исследования жидких сред / В. С. Андреев, Е. П. Попечителей. – Л. : Машиностроение, 1981. – 312 с.
4. Ван де Хюлст, Г. Рассеяние света малыми частицами / Г. Ван де Хюлст. – М. : Иностран. лит-ра, 1961. – 536 с.
5. Сайт компании «ЭкоИнструмент» [Электронный ресурс] / Украина, 03067, г. Киев, Машиностроительная 50. – Режим доступа : file : // localhost / F : / новая%20статья / веб / Теория%20и%20практика%20измерения%20мутности.%20Турбидиметрия%20и%20нефелометрия..mht. – Дата доступа : 05.09.2012.

6. Сайт компании «ЭкоИнструмент» [Электронный ресурс] / Украина, 03067, г. Киев, Машиностроительная 50. – Режим доступа : file : // localhost / F : / новая%20статья / веб / Единицы%20 измерения%20мутности.mht. – Дата доступа : 05.09.2012.

7. **Вейнберг, В. Б.** Оптика световодов / В. Б. Вейнберг, Д. К. Саггаров. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1977. – 320 с.

8. **Зак, Е. А.** Волоконно-оптические преобразователи с внешней модуляцией / Е. А. Зак. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 128 с.

*Статья сдана в редакцию 9 октября 2012 года*

**Алексей Петрович Марков**, науч. сотрудник НИЧ, Белорусско-Российский университет.  
Тел.: 8-0222-25-38-46. E-mail: alexM7788@yandex.ru.

**Aleksei Petrovich Markov**, research worker of the Research Division, Belarusian-Russian University.  
Tel.: 8-0222-25-38-46. E-mail: alexM7788@yandex.ru.

---

УДК 620.179.14

*В. А. Новиков, Г. И. Скрябина, А. В. Шилов, А. В. Кушнер*

## **РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ ПЛЕНКИ, ВИЗУАЛИЗИРУЮЩЕЙ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ, В ОБЛАСТИ ДЕФЕКТА**

---

UDC 620.179.14

*V. A. Novikov, G. I. Skryabina, A. V. Shilov, A. V. Kushner*

## **CALCULATION OF THE REFLECTION COEFFICIENT OF THE MAGNETIC FIELD VISUALIZING FILM IN THE ZONE OF DEFECTS**

---

### **Аннотация**

Разработана методика расчета коэффициента отражения пленки, визуализирующей магнитные поля, в процессе контроля ферромагнитных объектов. Получены математические выражения, произведен аналитический расчет и определен характер изменения коэффициента отражения света от визуализирующей магнитные поля пленки в зоне индикаторных рисунков различных типов дефектов сплошности с учетом их формы, параметров и глубины залегания при контроле объектов в приложенном поле для случая, когда внешний световой поток направлен перпендикулярно поверхности пленки.

### **Ключевые слова:**

магнитный контроль, дефекты сплошности, визуализация магнитного поля, коэффициент отражения света.

### **Abstract**

Methods of calculating the reflection coefficient of the magnetic field visualizing film while monitoring ferromagnetic objects are developed. Mathematical expressions are received, the analytical calculation is performed, and the change of the coefficient of light reflection from the magnetic field visualizing film in the zone of indicator pictures of integrity defects of different types is determined with consideration of their form, parameters and occurrence depth, the objects being monitored in the applied field with an external light flow directed perpendicular to the film surface.

### **Key words:**

magnetic inspection, defects of integrity, magnetic field visualization, light reflection coefficient.

---

Известными средствами визуализации магнитных полей рассеяния дефектов сплошности ферромагнитных изделий являются магнитные порошки, магнитные суспензии и жидкости, магнитная лента, феррит-гранатовая пленка и др. В последние годы для неразрушающего контроля ферромагнитных объектов, с целью обнаружения в них дефектов, начали применять магнитную пленку, визуализирующую магнитные поля [1–5]. Она содержит частички никеля, помещенные в миниатюрные капсулы с гелем

и равномерно распределенные в нем. В зависимости от своего расположения эти частички по-разному отражают падающий свет. Пленка окрашивается в светлые тона, когда частицы располагаются параллельно ее поверхности, и темнеет, когда они ориентированы перпендикулярно. Пленка имеет толщину 0,15 мм и может многократно использоваться для неразрушающего контроля после ее размагничивания.

В процессе контроля пленку укладывают на поверхность ферромагнитно-

го объекта и намагничивают вместе с ним. Под действием полей рассеяния дефектов, находящихся в объекте, на пленке возникают их индикаторные рисунки, по присутствию которых судят о наличии дефектов в изделии. Однако такой метод контроля является индикаторным и не позволяет оценить величину несплошности по виду ее индикаторного рисунка, а также сделать заключение, превышает ли она браковочный уровень, установленный нормативно-технической документацией. Другими словами, при визуализации полей рассеяния дефектов на магнитной пленке индикаторные рисунки дефектов необходимо оценить количественно для сравнения с индикаторными рисунками минимальных недопустимых несплошностей. Поэтому разработка методики расчета количественных характеристик индикаторных рисунков дефектов на пленке, визуализирующей магнитные поля, в процессе контроля ферромагнитных объектов, с целью их количественной оценки, является важной и актуальной задачей.

При рассмотрении указанной задачи примем следующие допущения:

- размагниченная пленка уложена на плоскую поверхность контролируемого ферромагнитного объекта;
- ферромагнитные частицы, находящиеся в капсулах, имеют вытянутую форму и распределены равномерно и ориентированы хаотически;
- размеры частиц много больше длин волн видимого света (дифракция света на частицах отсутствует);
- лучи света направлены перпендикулярно поверхности пленки и проникают лишь в тонкий поверхностный слой геля глубиной не более длины ферромагнитной частицы;
- свет отражается от ферромагнитных частиц, находящихся у поверхности пленки;
- поглощение света ферромагнитными частицами отсутствует;

- суммарный отраженный световой поток зависит от количества ферромагнитных частиц, отражающих свет, их ориентации относительно падающего светового потока и потерь;

- постоянное внешнее поле  $H_0$  направлено параллельно поверхности объекта и пленки, контроль производится в приложенном поле;

- количество ферромагнитных частиц, участвующих в формировании отраженного светового потока, пропорционально отношению суммарной напряженности поля в точке к напряженности поля насыщения  $H_s$  магнитной пленки (напряженности, при которой все ферромагнитные частицы ориентированы параллельно поверхности пленки). Экспериментально установлено, что для исследуемой пленки  $H_s = 60000$  А/м.

Необходимо рассчитать коэффициент отражения пленки, визуализирующей магнитные поля, в процессе контроля ферромагнитных объектов.

Расчетная схема изображена на рис. 1. Ферромагнитная частица 1 ориентирована по касательной к силовой линии 2 магнитного поля в некоторой точке  $O$ . Введем систему координат  $XOY$ , как показано на рис. 1.

Ось  $X$  параллельна поверхности магнитной пленки, уложенной на объект контроля, ось  $Y$  – перпендикулярна ей. Внешнее постоянное однородное поле напряженностью  $H_0$  направлено вдоль оси  $X$ . Длина частиц никеля, находящихся в геле, составляет около 50 мкм и на порядок больше их ширины. Поэтому длины волн видимых лучей света (0,4...0,8 мкм) много меньше размеров частиц. В этом случае свет распространяется прямолинейно и его дифракция на частицах отсутствует. Внешний световой поток  $\Phi_0$  падает вдоль оси  $Y$  под углом  $\alpha$  к нормали  $n$  к поверхности частицы и отражается под таким же углом. Если пренебречь потерями, которые происходят при отражении света от пленки, то  $\Phi_r = k\Phi_0$ , где  $k$  –

коэффициент пропорциональности, определяемый конструкцией используемой установки (ее оптической схемой). Примем допущение, что оператор наблюдает встречный (отраженный и рас-

сеянный) световой поток, направленный вдоль оси  $Y$ , а именно  $\Phi_r \cos 2\alpha = k\Phi_0 \cos 2\alpha = k\Phi_0 \cos 2\gamma$ .

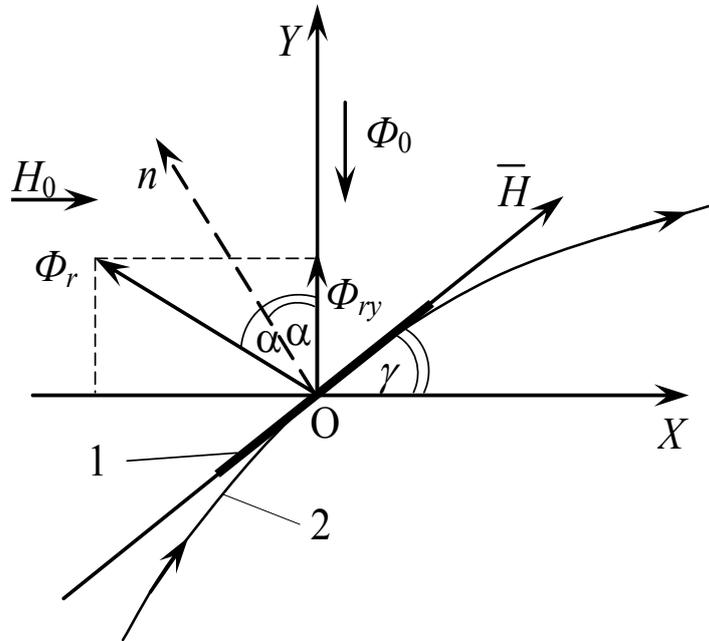


Рис. 1. Расчетная схема оптических характеристик индикаторных рисунков дефектов на пленке, визуализирующей магнитные поля: 1 – ферромагнитная частица, находящаяся в пленке; 2 – силовая линия магнитного поля;  $H_0$  – напряженность намагничивающего поля;  $\Phi_0$ ,  $\Phi_r$ ,  $\Phi_{ry}$  – внешний, отраженный и наблюдаемый световые потоки соответственно

В соответствии с принятыми допущениями наблюдаемый световой поток, направленный вдоль оси  $Y$ ,

$$\Phi_{ry} = k \frac{\sqrt{H_x^2 + H_y^2}}{H_s} \cdot \Phi_0 \cos 2\alpha. \quad (1)$$

Система уравнений, удовлетворяющая принятым выше допущениям, имеет вид:

$$\begin{cases} \Phi_{ry} = \frac{\sqrt{H_x^2 + H_y^2}}{H_s} \cdot \Phi_0 \cos 2\alpha; \\ \sqrt{H_x^2 + H_y^2} \leq H_s; \\ \cos 2\alpha > 0, \end{cases} \quad (2)$$

где  $H_x = H_0 + H_{xd}$  и  $H_y = H_{yd}$  – тангенциальная и нормальная составляющие поля в точке  $O$  соответственно.

Если  $\cos 2\alpha \leq 0$ , то наблюдаемый световой поток будет направлен навстречу оси  $Y$  и восприниматься не будет.

Для произвольной точки с координатами  $x$  и  $y$

$$\begin{aligned} \cos 2\alpha &= \cos 2\gamma = \frac{1 - \operatorname{tg}^2 \gamma}{1 + \operatorname{tg}^2 \gamma} = \\ &= \frac{(H_0 + H_{xd}(x, y))^2 - H_{yd}^2(x, y)}{(H_0 + H_{xd}(x, y))^2 + H_{yd}^2(x, y)}, \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{H_{yd}(x, y)}{H_0 + H_{xd}(x, y)}.$$

Тогда коэффициент отражения света

$$r = \frac{\Phi_{ry}}{k\Phi_0} = \frac{\sqrt{(H_0 + H_{xd}(x, y))^2 + H_{yd}^2(x, y)}}{kH_s} \times \frac{(H_0 + H_{xd}(x, y))^2 - H_{yd}^2(x, y)}{(H_0 + H_{xd}(x, y))^2 + H_{yd}^2(x, y)}, \quad (4)$$

а система уравнений (2) принимает вид:

$$\left\{ \begin{aligned} r &= \frac{\Phi_{ry}}{k\Phi_0} = \frac{\sqrt{(H_0 + H_{xd}(x, y))^2 + H_{yd}^2(x, y)}}{kH_s} \times \frac{(H_0 + H_{xd}(x, y))^2 - H_{yd}^2(x, y)}{(H_0 + H_{xd}(x, y))^2 + H_{yd}^2(x, y)}; \\ \sqrt{(H_0 + H_{xd}(x, y))^2 + H_{yd}^2(x, y)} &\leq H_s; \\ (H_0 + H_{xd}(x, y))^2 - H_{yd}^2(x, y) &> 0. \end{aligned} \right. \quad (5)$$

Так как в работе определяется относительное изменение коэффициента

отражения, то абсолютное значение величины  $k$  в (5) не требуется.

Для расчета суперпозиции полей в зоне цилиндрического внутреннего дефекта радиуса  $a$ , находящегося в намагниченной ферромагнитной пластине, с учетом влияния границ раздела сред пластина–воздух и пластина–дефект, использованы выражения для  $H_x$  и  $H_y$ , полученные в [6], в системе координат, приведенной на рис. 2.

Результаты расчета коэффициента отражения света  $r$  на визуализирующей магнитные поля пленке, расположенной на поверхности образца в зоне цилиндрического дефекта, от расстояния  $x$  до плоскости симметрии дефекта и глубины  $h$  его залегания приведены на рис. 3. Из рисунка видно, что изменение коэффициента отражения света  $r$  на пленке поперек дефекта имеет колоколообразный вид с максимумом в плоскости симметрии дефекта и двумя минимумами по обе стороны выступа, глубина которых увеличивается с уменьшением глубины залегания дефекта.

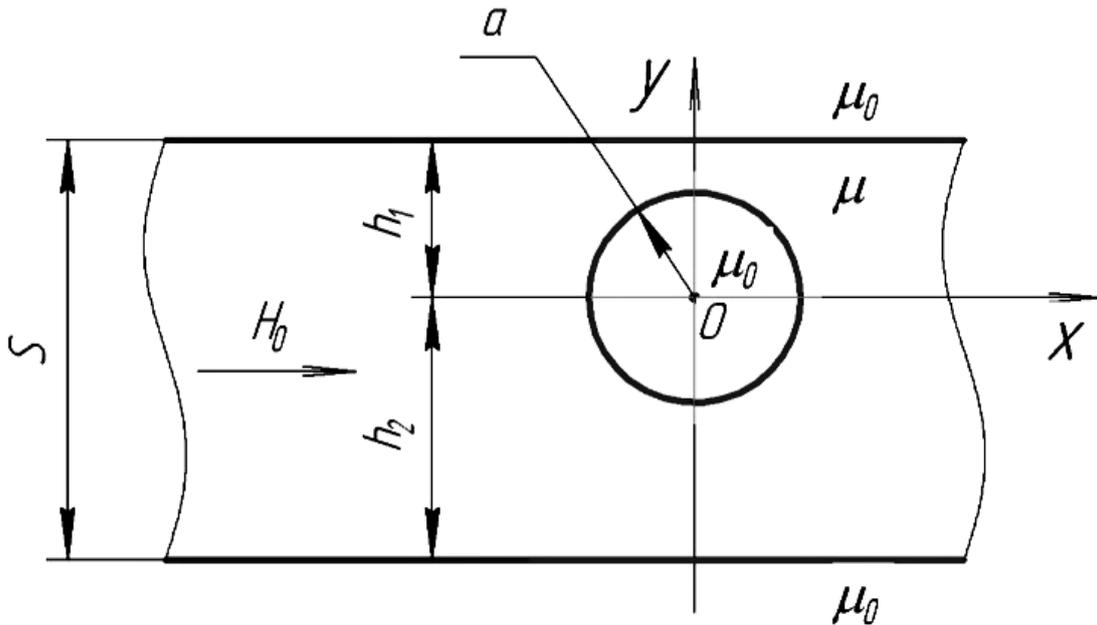


Рис. 2. Положение системы координат при расчете по формулам (6) и (7) суперпозиции полей в зоне дефекта

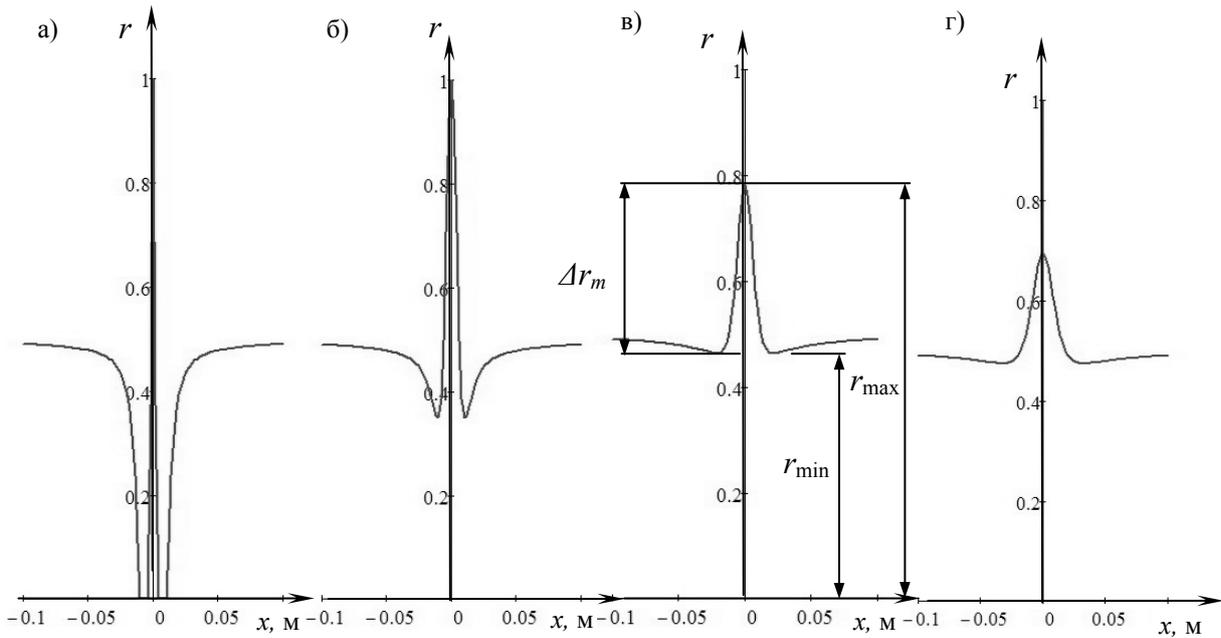


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения света  $r$  на визуализирующей магнитные поля пленке, расположенной на поверхности ферромагнитной пластины толщиной 25 мм в зоне индикаторного рисунка цилиндрического дефекта диаметром 2 мм, от расстояния  $x$  до плоскости симметрии дефекта и глубины  $h$  его залегания (режим намагничивания  $H_0 = 300$  А/см, глубина залегания: а – 5 мм; б – 10 мм; в – 15 мм; г – 20 мм)

Зависимость максимального приращения коэффициента отражения света  $\Delta r_m$  на визуализирующей магнитные поля пленке в зоне индикаторного рисунка дефекта от глубины  $h$  его залегания представлена на рис. 4. Из рисунка видно, что с увеличением глубины зале-

гания дефекта от 0 до 5 мм максимальное приращение коэффициента отражения света  $\Delta r_m = r_{\max} - r_{\min}$  постоянно, а при дальнейшем увеличении  $h_1$  происходит резкое уменьшение  $\Delta r_m$  до  $h_1 = 20$  мм, а затем  $\Delta r_m$  стабилизируется в диапазоне  $20 \geq h_1 \geq 22,5$  мм.

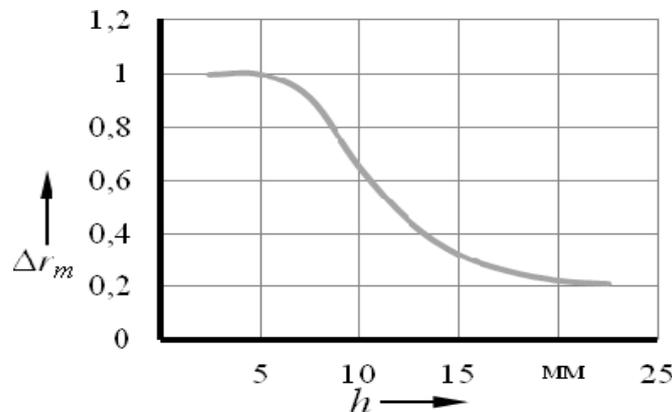


Рис. 4. Зависимость максимального приращения коэффициента отражения света  $\Delta r_m$  на визуализирующей магнитные поля пленке в зоне индикаторного рисунка дефекта диаметром 2 мм от глубины его залегания  $h$  в пластине толщиной 25 мм

На рис. 5 представлены графики зависимостей коэффициента отражения света пленки в зонах индикаторных рисунков дефектов от расстояния  $x$  до плоскости симметрии дефекта и его диаметра при глубине залегания дефек-

та  $h = 12,5$  мм. Из рисунка видно, что при диаметрах дефекта 2 мм и более наблюдается «срез» минимумов  $r(x)$ , т. к. на этих участках отраженный свет будет направлен навстречу оси  $Y$  и наблюдателем восприниматься не будет.

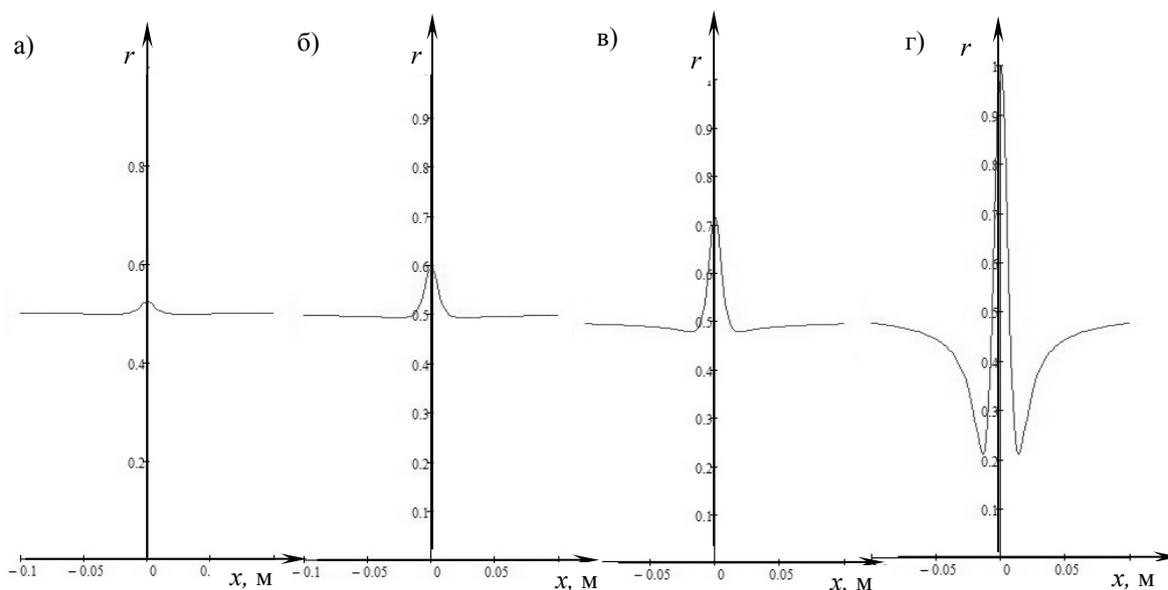


Рис. 5. Зависимость коэффициента отражения света  $r$  пленки в зоне индикаторного рисунка дефекта от расстояния  $x$  до плоскости симметрии дефекта и его диаметра (режим намагничивания  $H_0 = 300$  А/см, глубина залегания дефекта  $h = 12,5$  мм, диаметр дефекта  $d = 0,5; 1; 1,5; 2; 3$  мм)

На рис. 6 показана зависимость максимального приращения коэффициента отражения света  $\Delta r_m$  визуализирующей магнитные поля пленки в зоне индикаторного рисунка дефекта от его диаметра при глубине залегания дефекта  $h = 12,5$  мм. Из рисунка видно, что с увеличением диаметра дефекта максимальное приращение коэффициента отражения света  $\Delta r_m$  от пленки, в зоне индикаторного рисунка несплошности, возрастает, пока пленка в зоне дефекта не намагничивается до насыщения при диаметре дефекта 4 мм, затем  $\Delta r_m$  стабилизируется.

На рис. 7 представлены зависимости коэффициента отражения света на

пленке в зоне индикаторного рисунка дефекта диаметром 2 мм, находящегося на глубине 12,5 мм, от расстояния  $x$  до плоскости симметрии дефекта и режима намагничивания. Из рисунка видно, что с ростом напряженности поля вначале происходит увеличение максимального значения приращения коэффициента отражения света, затем его значение стабилизируется, потом происходит убывание  $\Delta r_m$ . Чем меньше глубина залегания дефекта, тем больше  $\Delta r_m$ . Отрицательные части кривой  $r(x)$  при изменении  $H_0$  в диапазоне от 2 до 25 А/см отсутствуют, т. к. соответствуют лучам света, отраженным вглубь пленки. Эти лучи не видны для наблюдателя (рис. 8).

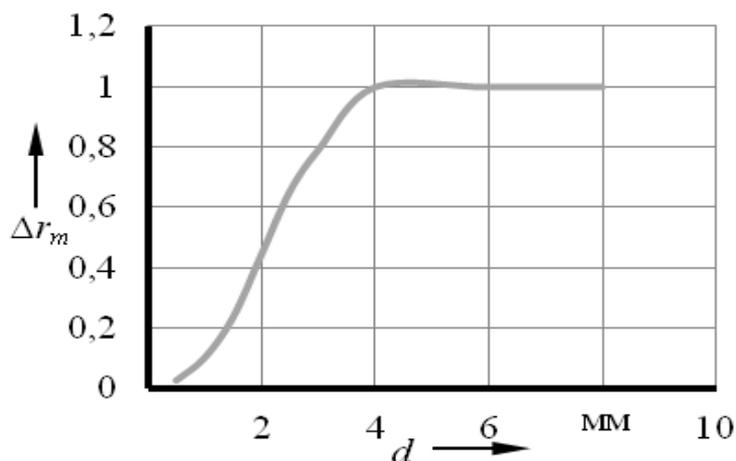


Рис. 6. Зависимость максимального приращения коэффициента отражения света  $\Delta r_m$  визуализирующей магнитные поля пленки в зоне индикаторного рисунка дефекта от его диаметра (глубина залегания дефекта  $h = 12,5$  мм)

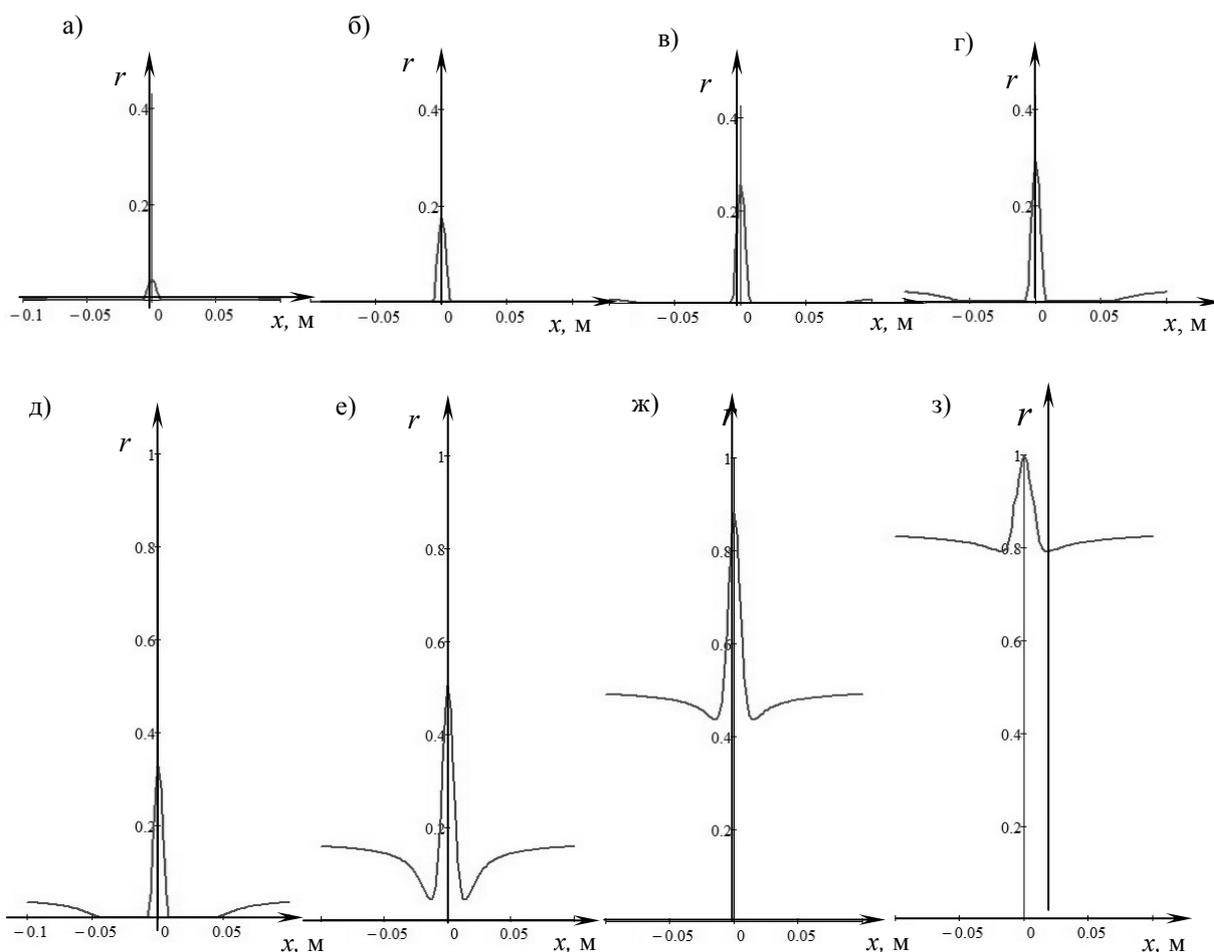


Рис. 7. Зависимость коэффициента отражения пленки в зоне индикаторного рисунка дефекта от расстояния  $x$  до плоскости симметрии дефекта и режима намагничивания (глубина залегания 12,5 мм, диаметр дефекта  $d = 2$  мм, режим намагничивания  $H_0$ : а – 2 А/см; б – 5 А/см; в – 10 А/см; г – 16,5 А/см; д – 25 А/см; е – 100 А/см; ж – 300 А/см; з – 500 А/см)

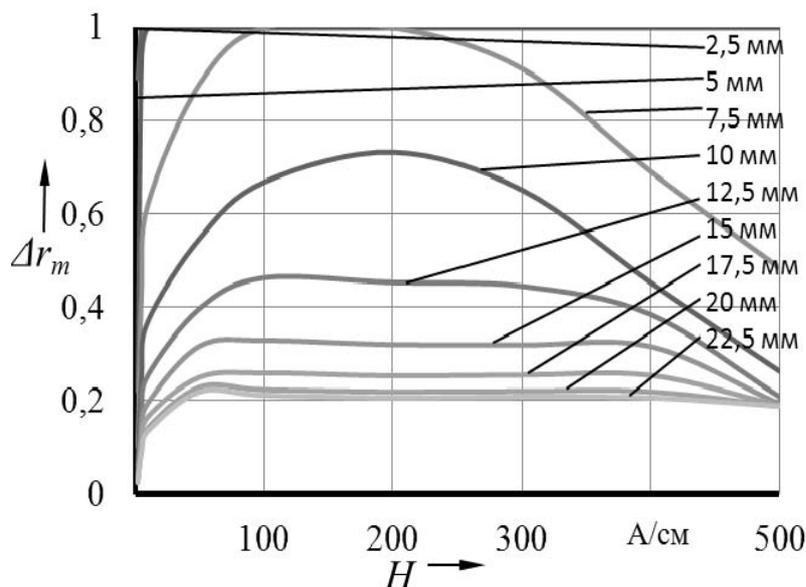


Рис. 8. Зависимость максимального приращения коэффициента отражения света  $\Delta r_m$  визуализирующей магнитные поля пленки в зоне индикаторного рисунка для дефекта диаметром 2 мм от напряженности намагничивающего поля для глубины залегания дефекта  $h = 2,5; 5; 7,5; 10; 12,5; 15; 17,5; 20; 22,5$  мм

Для расчета суперпозиции полей в зоне прямоугольного поверхностного дефекта наружной поверхности, находящегося в пластине, использованы выражения для  $H_x$  и  $H_y$ , полученные в [7], в системе координат, изображенной на рис. 9, и выражение для поверхностной плотности «магнитных зарядов» [8]. Ниже представлены зависимости коэффициента отражения света в зоне индикаторного рисунка прямоугольного поверхностного дефекта наружной поверхности от расстояния до середины дефекта и его глубины (рис. 10), а также его максимального приращения  $\Delta r_m$  от глубины дефекта (рис. 11, а). Графики построены для дефектов шириной 1,6 мм, находящихся в пластине толщиной 8 мм при режиме намагничивания  $H_0 = 300$  А/см. Из рис. 10 видно, что характер изменения  $r(x)$  для наружных дефектов прямоугольной формы аналогичен характеру изменения  $r(x)$  для внутренних дефектов цилиндрической формы, удаленных от поверхности. С ростом глубины несплошности происходит увеличение коэффициента отражения света на поверхности пленки в зоне дефекта (см. рис. 10).

Из рис. 11 видно, что характер изменения коэффициента отражения света индикаторного рисунка дефекта на визуализирующей магнитные поля пленке, уложенной на ферромагнитную пластину, намагниченную параллельно ее поверхности, когда внешний световой поток направлен перпендикулярно поверхности пленки, аналогичен характеру изменения тангенциальной составляющей поля рассеяния дефекта на поверхности объекта. Близок и характер изменения поля внутреннего дефекта.

С ростом глубины несплошности происходит также увеличение максимального приращения коэффициента отражения света на поверхности пленки в зоне дефекта (рис. 12, а). С увеличением ширины дефекта наружной поверхности от 0,1 до 1,5 мм наблюдается возрастание  $\Delta r_m$ , а затем его монотонное убывание при дальнейшем увеличении ширины (рис. 12, б).

Таким образом, разработана методика расчета коэффициента отражения пленки, визуализирующей магнитные поля, в процессе контроля ферромагнитных объектов.

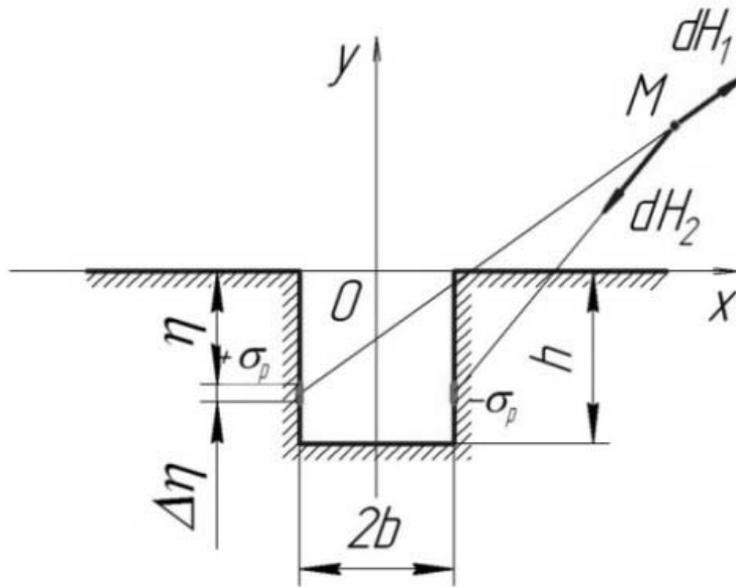


Рис. 9. К расчету поля прямоугольного поверхностного дефекта

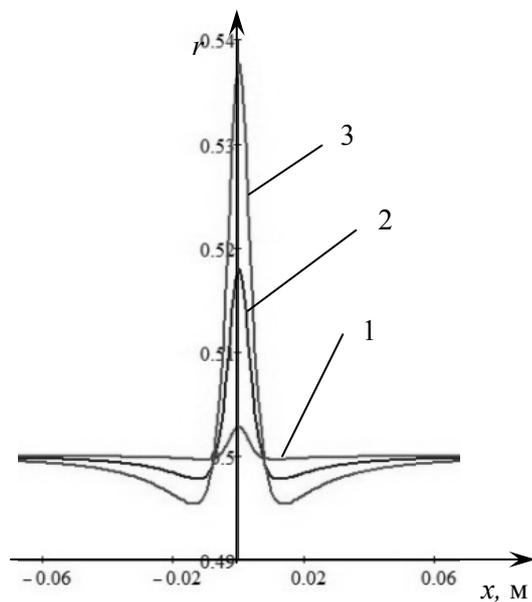


Рис. 10. Зависимость коэффициента отражения света визуализирующей магнитные поля пленки в зоне индикаторного рисунка прямоугольного поверхностного дефекта наружной поверхности от расстояния  $x$  от плоскости симметрии дефекта и его глубины  $h$  (режим намагничивания  $H_0 = 300$  А/см, толщина пластины  $s = 8$  мм, ширина дефекта  $2b = 1,6$  мм, глубина: 1 – 1 мм; 2 – 2 мм; 3 – 3 мм)

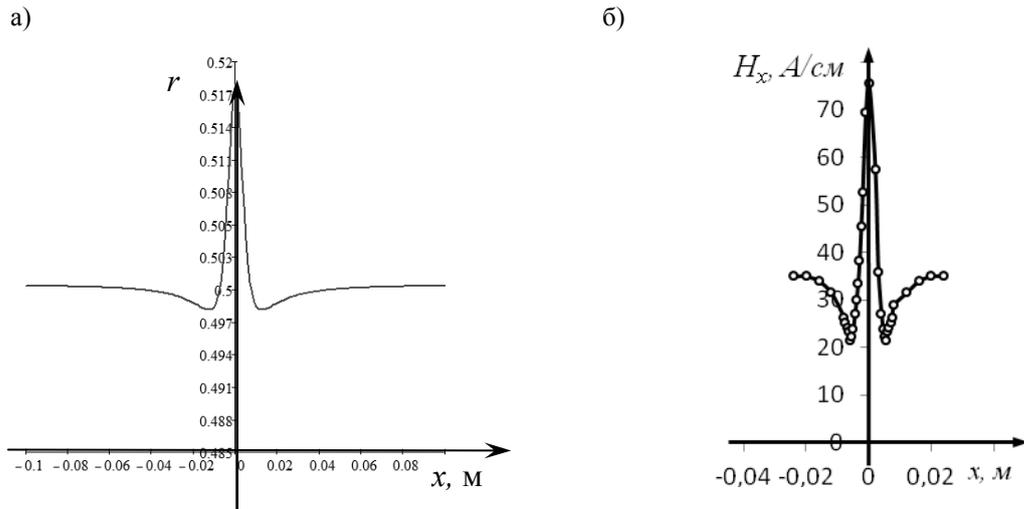


Рис. 11. Сравнение коэффициента отражения света  $r(x)$  индикаторного рисунка дефекта наружной поверхности в виде прямоугольной щели на пленке (а) и его тангенциальной составляющей поля рассеяния [9] (б) (режим намагничивания  $H_0 = 300$  А/см, толщина пластины  $s = 8$  мм, ширина дефекта  $2b = 1,6$  мм, глубина  $h = 3,6$  мм)

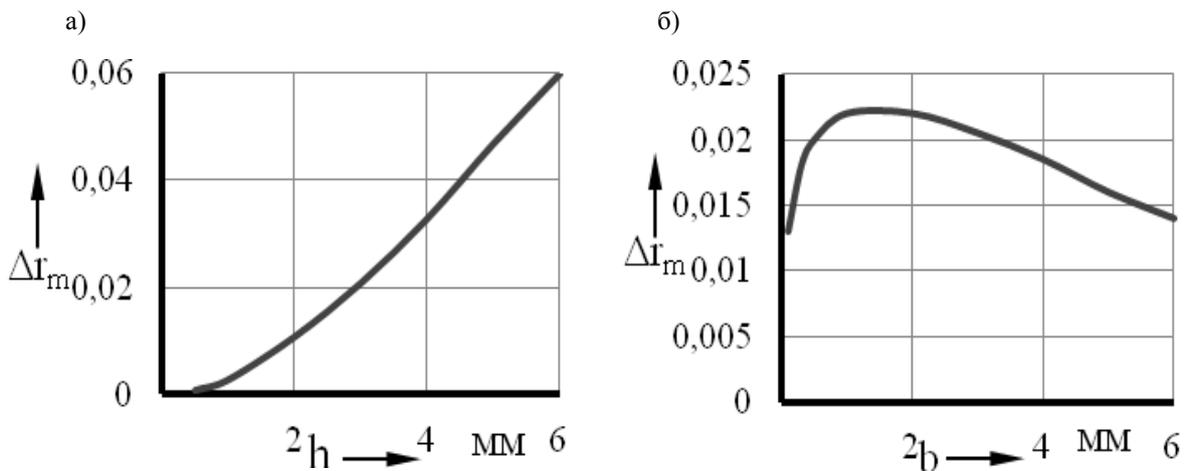


Рис. 12. Зависимость максимального приращения коэффициента отражения  $\Delta\Gamma_m$  света в зоне индикаторного рисунка прямоугольного поверхностного дефекта на пленке от его глубины  $h$  (а) и ширины  $2b$  (б) при напряженности поля  $H_0 = 300$  А/см: а – ширина дефекта 1,6 мм; б – глубина дефекта 3 мм

Получены математические выражения, произведен аналитический расчет и определен характер изменения коэффициента отражения света в зоне индикаторных рисунков дефектов на визуализирующей магнитные поля пленке для различных типов дефектов сплошности с учетом их формы, параметров и

глубины залегания при контроле объектов в приложенном поле для случая, когда внешний световой поток направлен перпендикулярно поверхности пленки.

Теоретически установлено, что характер изменения коэффициента отражения света на визуализирующей магнитные поля пленке, уложенной на

ферромагнитную пластину, намагниченную параллельно ее поверхности, когда внешний световой поток направлен перпендикулярно поверхности пленки, аналогичен характеру изменения тангенциальной составляющей поля рассеяния дефекта на поверхности объекта: изменение коэффициента отражения света  $r$  от пленки поперек дефекта имеет колоколообразный вид с максимумом в плоскости симметрии дефекта и двумя минимумами по обе стороны выступа, глубина которых увеличивается с уменьшением глубины залегания дефекта.

С увеличением глубины залегания дефекта  $h_1$  от 0 до 5 мм максимальное приращение коэффициента отражения света  $\Delta r_m = r_{\max} - r_{\min}$  постоянно, а при дальнейшем увеличении  $h_1$  происходит резкое уменьшение  $\Delta r_m$  до  $h_1 = 20$  мм, а затем  $\Delta r_m$  стабилизируется в диапазоне  $20 \geq h_1 \geq 22,5$  мм. При увеличении диаметра дефекта максимальное приращение коэффициента отражения света  $\Delta r_m$  от пленки в зоне индикаторного рисунка несплошности возрастает, пока пленка в зоне дефекта не намагничивается до насыщения, затем  $\Delta r_m$  стабилизируется. С ростом напряженности поля

происходит увеличение максимального значения приращения коэффициента отражения света, затем его значение стабилизируется, а потом происходит убывание  $\Delta r_m$ .

Отрицательные части кривой  $r(x)$  при изменении  $H_0$  в диапазоне от 2 до 25 А/см, а также при диаметрах дефекта от 2 мм и более ( $H_0 = 300$  А/см) отсутствуют, т. к. соответствуют лучам света, отраженным вглубь пленки. Эти лучи не видны для наблюдателя.

Характер изменения  $r(x)$  для индикаторных рисунков дефектов наружной поверхности в виде щели с параллельными стенками, перпендикулярными поверхности пластины, аналогичен характеру изменения  $r(x)$  индикаторных рисунков от внутренних дефектов цилиндрической формы, удаленных от поверхности на расстояние больше 10 мм. С ростом глубины несплошности происходит увеличение коэффициента отражения света и его приращения на поверхности пленки в зоне дефекта. С увеличением ширины дефекта наружной поверхности от 0,1 до 1,5 мм наблюдается возрастание  $\Delta r_m$ , а затем его монотонное убывание при дальнейшем увеличении ширины.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новиков, В. А. Визуализация полей дефектов ферромагнитных объектов с помощью пленки «Flux-detektor» / В. А. Новиков, А. В. Шилов, А. В. Кушнер // Контроль. Диагностика. – 2010. – № 5. – С. 18–22.
2. Шилов, А. В. Количественная оценка индикаторных рисунков дефектов при визуализации их полей на магнитной пленке / А. В. Шилов, В. А. Новиков, А. В. Кушнер // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2010. – № 2. – С. 152–160.
3. Шилов, А. В. Количественная оценка индикаторных рисунков дефектов при визуализации их полей на магнитной пленке в приложенном поле / А. В. Шилов, В. А. Новиков, А. В. Кушнер // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2011. – № 1. – С. 160–168.
4. Перспективные направления магнитографической дефектоскопии в машиностроении / В. А. Новиков [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2011. – № 2. – С. 76–86.
5. Исследование гистерезисных явлений в магнитной ленте и контролируемом металле с целью повышения достоверности магнитографического контроля металлоконструкций / В. А. Новиков [и др.] // Достижения физики неразрушающего контроля и технической диагностики : сб. науч. тр. – Минск : Ин-т прикладной физики НАН Беларуси, 2011. – С. 25–30.
6. Шур, М. Л. Магнитоэстатическое поле дефекта, расположенного в плоскопараллельной пластине / М. Л. Шур, В. Е. Щербинин / Дефектоскопия. – 1977. – № 3. – С. 92–96.
7. Зацепин, Н. Н. К расчету магнитоэстатического поля дефектов. 1. Топография полей дефектов / Н. Н. Зацепин, В. Е. Щербинин // Дефектоскопия. – 1966. – № 5. – С. 50–59.

8. **Шур, М. Л.** Теоретические вопросы формирования поля поверхностного дефекта / М. Л. Шур, В. Е. Щербинин // Дефектоскопия. – 1988. – № 3. – С. 14–25.

9. **Щербинин, В. Е.** К расчету магнитостатического поля дефектов. II. Экспериментальная проверка основных расчетных закономерностей / Н. Н. Зацепин, В. Е. Щербинин // Дефектоскопия. – 1966. – № 5. – С. 50–59.

*Статья сдана в редакцию 13 сентября 2012 года*

**Владимир Алексеевич Новиков**, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.

**Галина Ивановна Скрябина**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.

**Андрей Владимирович Шилов**, начальник отдела, Белорусско-Российский университет.

**Андрей Валерьевич Кушнер**, канд. техн. наук, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет.

**Vladimir Alekseyevich Novikov**, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University.

**Galina Ivanovna Skryabina**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.

**Andrei Vladimirovich Shilov**, Head of the department, Belarusian-Russian University.

**Andrei Valeryevich Kushner**, PhD (Engineering), senior lecturer, Belarusian-Russian University.

---

УДК 681.7.068

*И. В. Шилова*

---

## МНОГОЭЛЕМЕНТНЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ

---

UDC 681.7.068

*I. V. Shilova*

---

## MULTI-ELEMENT FIBER-OPTIC EXCESS PRESSURE SENSOR

---

### **Аннотация**

Приведены две конструкции многоэлементных волоконно-оптических датчиков давления, использующих изменение потерь в изогнутых волоконных световодах. Проведен выбор пары источник-фотоприемник для получения линейной градуировочной характеристики датчика. Разработаны электрические принципиальные схемы датчиков и получены их градуировочные характеристики.

### **Ключевые слова:**

волоконно-оптический датчик, датчик давления, волоконный световод.

### **Abstract**

Two designs of multi-element fiber-optic pressure sensors using the change of losses in bent optical fibers are presented. The choice of the pair, a radiation source - a photodetector, has been performed in order to obtain linear calibration characteristics of the sensor. The electrical circuit diagrams for the sensors have been developed and their calibration characteristics have been obtained.

### **Key words:**

fiber-optic sensor, pressure sensor, optical fiber.

---

В некоторых областях промышленности, например в энергетике, высокий уровень электромагнитных полей создает помехи и наводки в обычных датчиках давления, что препятствует точному измерению давления в тех или иных технических системах. Наглядным примером тому могут служить маломасляные выключатели на электростанциях. В промышленности нередко возникает задача измерения давления горючих и взрывоопасных жидкостей или газов, а также в технических системах атомных электростанций.

Все эти задачи наиболее оптимально могут быть решены с помощью волоконно-оптических датчиков давления. В настоящее время разработано немалое количество волоконно-опти-

ческих первичных преобразователей различных физических величин [1–4]. Из разнообразия конструкций волоконно-оптических датчиков наиболее простыми и надежными являются амплитудные датчики, использующие изменение потерь в изогнутых волоконных световодах. Главный их недостаток – низкая чувствительность по сравнению с интерференционными и поляризационными волоконно-оптическими датчиками. Поэтому не прекращаются поиски возможностей повышения чувствительности изгибных датчиков. Исследования идут в направлении использования многоэлементных конструкций, содержащих в одном датчике различные типы оптических волокон [5], с применением микроструктурных волоконных свето-

водов [6] и регистрацией изменения спектральных характеристик излучения при механическом воздействии на изогнутый световод [7].

Помимо всего прочего, при использовании волоконных световодов в датчиках возникает задача ввода излучения в световод. Этим недостатком лишен разработанный нами датчик давления, содержащий волоконно-оптическую светопередающую часть в виде волоконно-оптического жгута, состоящую из нескольких волоконных световодов, круглую на концах и плоскую в середине. Применение светопередающей части в виде волоконно-оптического жгута значительно упрощает конструкцию датчика, т. к. в этом случае исчезает задача ввода излучения в световоды. Это позволяет использовать в качестве источника излучения светодиода простой пристыковкой без применения юстирующего устройства [8, 9].

Для решения вышеизложенных задач сначала был разработан макет многоэлементного волоконно-оптического датчика давления, схема которого приведена на рис. 1.

Основой предлагаемой конструкции макета волоконно-оптического датчика давления является основание 4 с крышкой 5, которая может перемещаться вдоль направляющих 6 с помощью

микрометрического винтового механизма и сдавливать резиновую втулку 3 с волоконными световодами 2, закрепленными на ней с помощью клея. Каждый волоконный световод намотан в 10 витков на резиновую втулку 3. Первичным преобразователем и устройством для передачи излучения от источника к фотоприемнику этого датчика является волоконно-оптический жгут 2, содержащий несколько отрезков многомодового кварц-кварцевого волоконного световода в полимерной защитной оболочке диаметром 300 мкм с диаметром сердцевины 50 мкм и диаметром стеклянной оболочки 125 мкм. При разработке конструкции датчика были выбраны многомодовые волоконные световоды, поскольку они имеют невысокую стоимость и большой радиус сердцевины, что облегчает ввод излучения в жгут. На концах жгута волокна собраны и склеены вместе в виде цилиндра. Диаметр втулки 3 был выбран 10 мм, т. к. проведенные эксперименты показали, что для данного типа волоконного световода при таком радиусе изгиба датчик такой конструкции имеет наибольшую чувствительность. Также проведенные эксперименты показали, что радиус изгиба используемого в работе многомодового волоконного световода более 3 мм не приводит к его разрушению.

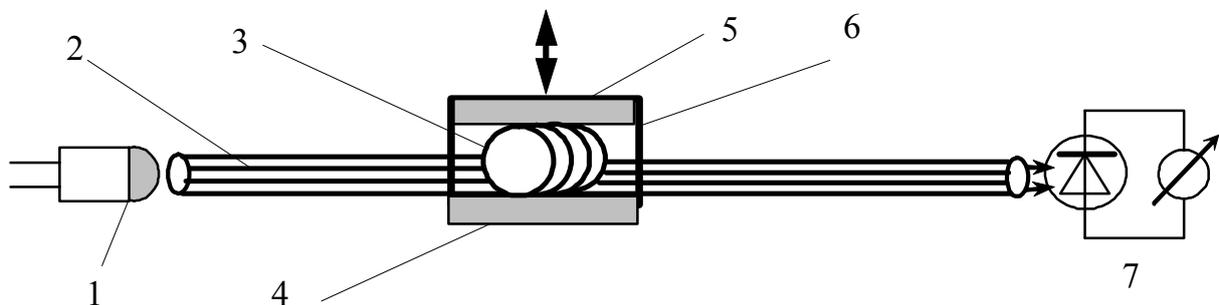


Рис. 1. Схема макета многоэлементного волоконно-оптического датчика давления: 1 – светодиод; 2 – волоконно-оптический жгут; 3 – резиновая втулка с волоконными витками; 4 – основание; 5 – крышка; 6 – направляющие; 7 – устройство регистрации излучения

Макет волоконно-оптического датчика работает следующим образом. Микрометрический механизм сплюсчивает резиновую втулку с наклеенными на нее волоконными световодами. В этом случае в волоконном световоде кривизна витков изменяется, что приводит к преобразованию мод и выходу энергии мод высших порядков в защитную полимерную оболочку с поглощением излучения в ней. Вследствие этого поток излучения, попадающий на устройство регистрации, уменьшается. Чувствительность датчика увеличивается с увеличением числа витков [10].

В качестве источника излучения (ИИ) в экспериментах использовались светодиоды, которые непосредственно, без использования согласующих устройств, приставлялись к входному концу волоконно-оптического жгута. В качестве приемника излучения (ПИ) применялся фотодиод.

Проведен анализ зависимости выходного сигнала фотоприемника от величины перемещения крышки 5 относительно основания 4, результаты которого приведены на рис. 2 для различных комбинаций применяемых источников и фотоприемников.

Из приведенных зависимостей видно, что наибольшая линейность наблюдается для случая со светодиодом  $\lambda = 630 \dots 640$  нм в качестве источника излучения и ФД-256 в качестве приемника излучения.

При проведении экспериментов с макетом влияние внешней засветки было исключено.

На основании полученных экспериментов была разработана структурная схема двухканального волоконно-оптического датчика давления, представленная на рис. 3, которая позволяет избавиться от погрешности, связанной с изменением потока излучения источника.

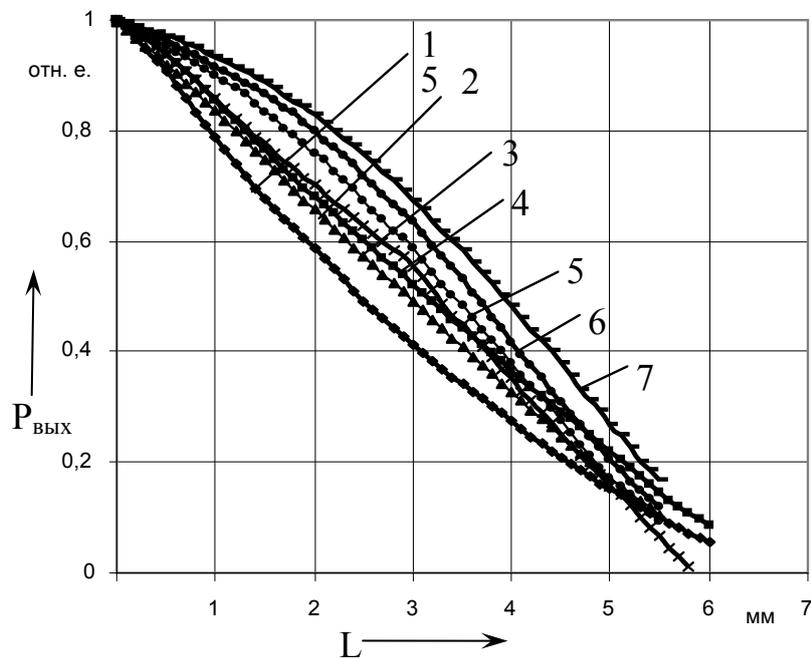


Рис. 2. Зависимость выходного сигнала фотоприемника от величины перемещения крышки относительно основания: 1 – ИИ – светодиод  $\lambda = 938 \dots 968$  нм; ПИ – ОМЗ-65; 2 – ИИ – светодиод  $\lambda = 470 \dots 480$  нм; ПИ – ФД-256; 3 – ИИ – светодиод  $\lambda = 630 \dots 640$  нм; ПИ – ФД-256; 4 – ИИ – светодиод  $\lambda = 630 \dots 640$  нм; ПИ – ОМЗ-65; 5 – ИИ – светодиод, излучающий белый свет; ПИ – ФД-256; 6 – ИИ – ИК светодиод; ПИ – ФД-265А; 7 – ИИ – светодиод белого света; ПИ – ФД-265А

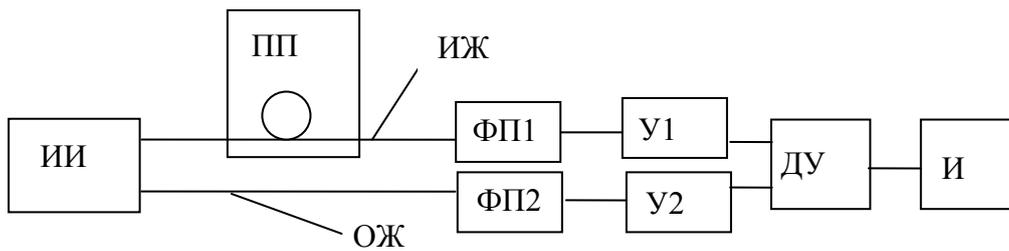


Рис. 3. Структурная схема волоконно-оптического датчика давления: ИИ – источник излучения; ФП – фотоприемник; ОЖ – опорный жгут; ИЖ – измерительный жгут; ПП – первичный преобразователь; У – усилитель; ДУ – дифференциальный усилитель; И – индикатор

Под действием измеряемого давления в первичном преобразователе деформируются кольца волоконных световодов в светопередающей части измерительного жгута датчика, что приводит к изменению кривизны колец световодов. Поток излучения, попадающий на фотоприемник ФП1 излучения, уменьшается. Поток излучения, проходящий

через опорный жгут, не изменяется. В дифференциальном усилителе вычитается из сигнала опорного канала сигнал измерительного. Результат отображается на индикаторе.

Схема преобразования прогиба мембраны датчика давления в величину изменения кривизны колец волоконных световодов приведена на рис. 4.

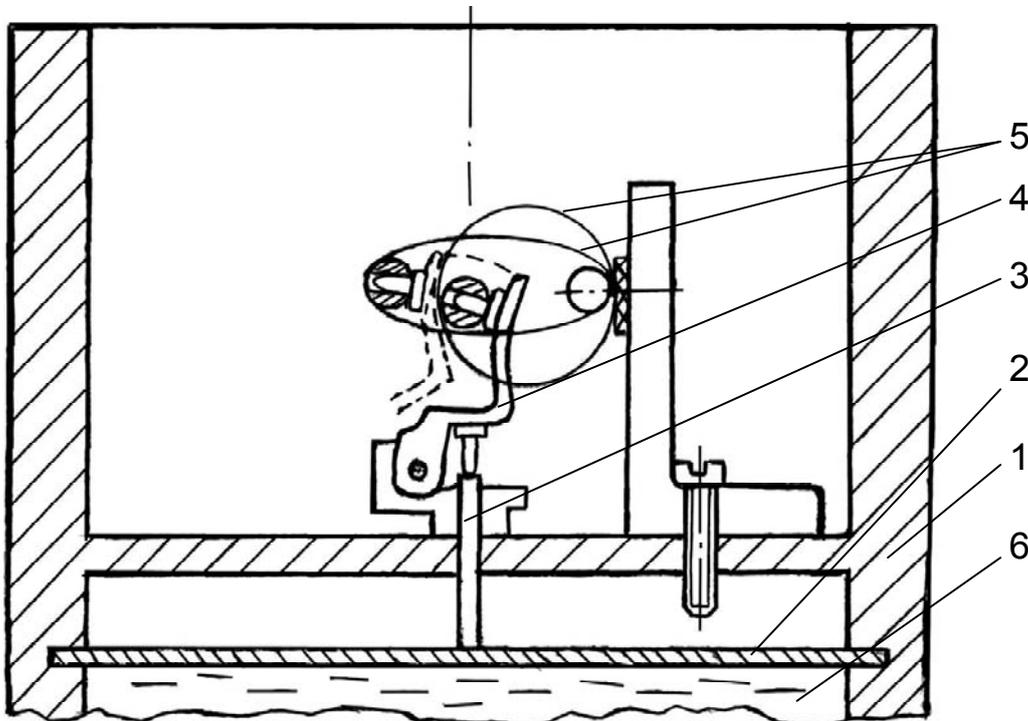


Рис. 4. Схема преобразования прогиба мембраны датчика давления в величину изменения кривизны колец волоконных световодов: 1 – корпус; 2 – мембрана; 3 – шток; 4 – поворотный механизм; 5 – светопередающая часть; 6 – измеряемая среда (жидкость или газ)

Конструкция первичного преобразователя волоконно-оптического датчика давления содержит корпус 1, прикрепляемый с помощью штупера к объекту, давление жидкости или газа в котором измеряется. В корпусе 1 закреплена мембрана 2, которая при увеличении давления изгибается и смещает штوك 3, который, в свою очередь, с помощью поворотного механизма 4 растягивает кольца волоконных световодов светопередающей части 5. При этом в волоконном световоде кривизна витков изменяется, что приводит к уменьшению выходного сигнала вследствие выхода энергии мод высших порядков в защит-

ную полимерную оболочку. В качестве источника излучения используется светодиод с длиной волны 630...640 нм, в качестве приемника излучения – фотодиод ФД-256.

Были изготовлены две конструкции многоэлементных волоконно-оптических датчиков давления (МВОДД-01 и МВОДД-02), рассчитанные на два диапазона: 0...1,5 и 0...1 МПа соответственно, которые отличались лишь применением мембран с разной жесткостью.

Была разработана электрическая принципиальная схема датчика МВОДД-01, представленная на рис. 5.

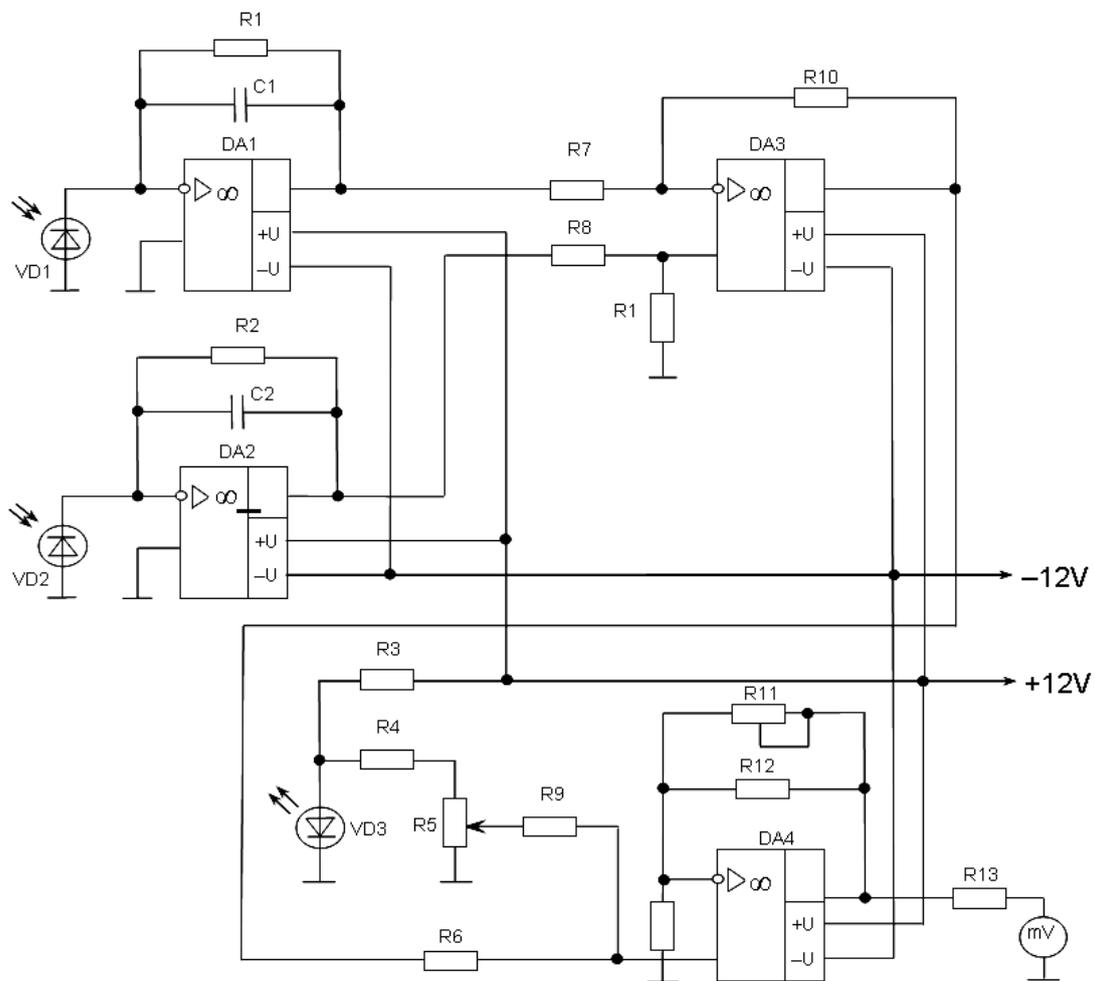


Рис. 5. Электрическая принципиальная схема МВОДД-01

Сигнал с измерительного канала поступает на усилитель DA1, с опорного – на усилитель DA2. Затем оба сигнала поступают на дифференциальный усилитель DA3. Таким образом, показания датчика не зависят от изменения характеристик светодиода с течением времени. После этого сигнал переворачивается, т. к. изначально самое большое значение сигнала соответствует нулевому избыточному давлению. Рези-

стор R9 служит для установки нуля датчика, резистор R11 на усилителе DA4 – для калибровки датчика. Выходной сигнал МВОДД-01 является вольтовым от 0 до 1,5 В, что соответствует измеряемому давлению от 0 до 1,5 МПа.

Внешний вид МВОДД-01 представлен на рис. 6.

Градуировочная характеристика МВОДД-01 представлена на рис. 7.



Рис. 6. Внешний вид МВОДД-01: 1 – первичный преобразователь; 2 – блок обработки сигнала

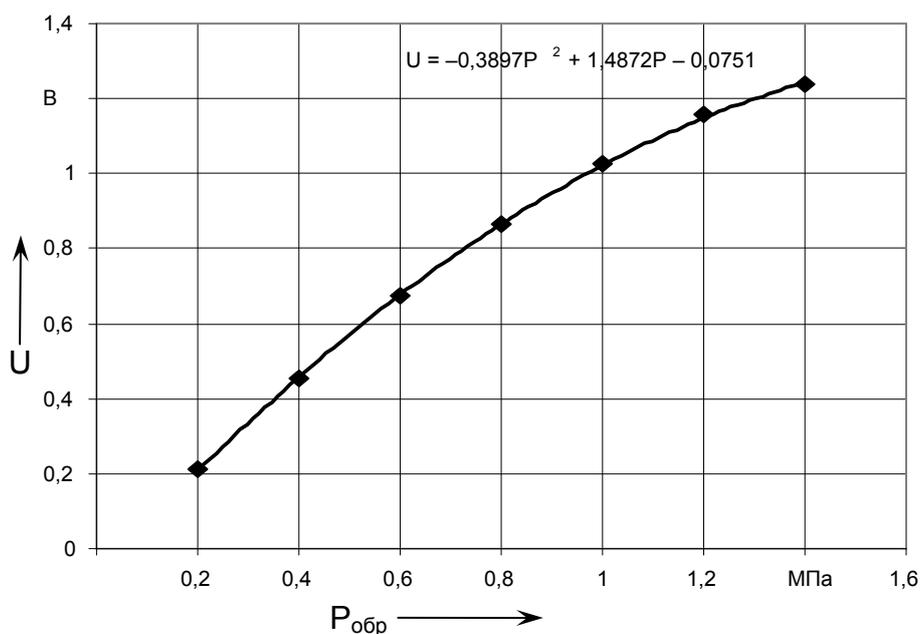


Рис. 7. Градуировочная характеристика МВОДД-01

Полученную градуировочную характеристику можно аппроксимировать квадратичной зависимостью по методу наименьших квадратов с помощью программы Excel:

$$U = -0,3897P^2 + 1,4872P - 0,0751. \quad (1)$$

Разработанный датчик МВОДД-01 прошел испытания на станке специальным токарном 1А751Ф3.Н248 на РУП завод «Могилевлифтмаш». На этом же предприятии датчик прошел поверку на специальном стенде для поверки манометров. Результаты измерений сравнивались с данными, полученными с образцового манометра МО-11202 с классом точности 0,4.

Результаты обработки проведенных испытаний показали, что относительная погрешность разработанного многоэлементного волоконно-оптического датчика давления составила не более 4 %, приведенная погрешность – не более 2,5 %.

Датчик МВОДД-02 отличается от МВОДД-01 тем, что имеет вынесенный

преобразователь за счет светопередающей части, которая собрана на концах в волоконно-оптические жгуты длиной 6 м. Данными жгутами первичный преобразователь соединен с блоком обработки сигнала. Это позволяет использовать такой датчик для измерения давления в зоне, где возможны нежелательные воздействия на этот блок, т. к. позволяет удалить его на 6 м за пределы действия высокого уровня электромагнитных полей, взрывоопасных сред, повышенного уровня вибрации и т. д.

Электрическая схема датчика МВОДД-02 отличается от электрической схемы МВОДД-01 тем, что дополнительно содержит источник тока, управляемый напряжением, что позволяет получить токовый сигнал 4...20 мА, пропорциональный воздействию давлению от 0 до 1 МПа.

Внешний вид МВОДД-02 представлен на рис. 8.

Градуировочная характеристика датчика МВОДД-02 представлена на рис. 9.

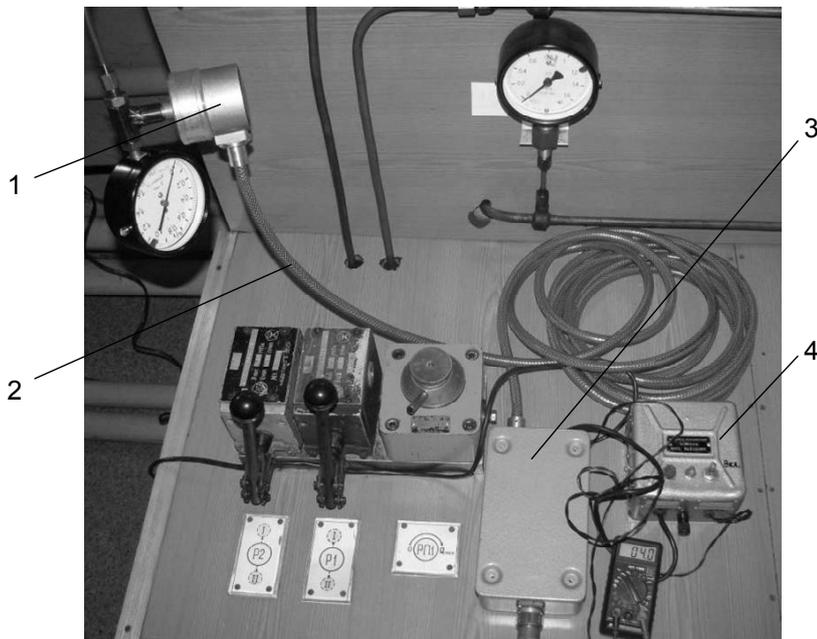


Рис. 8. Внешний вид МВОДД-02: 1 – первичный преобразователь; 2 – волоконно-оптический жгут; 3 – блок обработки сигнала; 4 – блок питания датчика

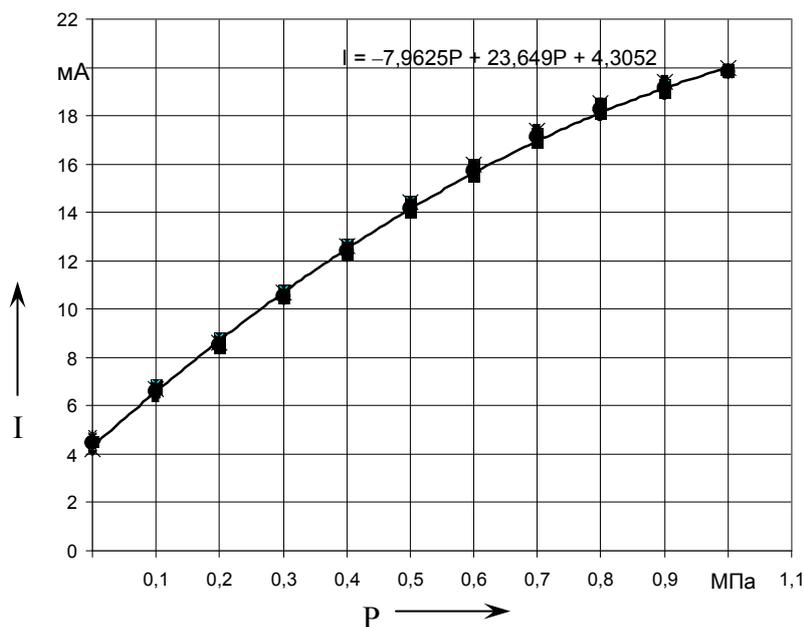


Рис. 9. Градуировочная характеристика МВОДД-02

Градуировочная характеристика МВОДД-02 также была аппроксимирована:

$$I = -7,962P^2 + 23,649P + 4,3052. \quad (2)$$

МВОДД-02 по предварительным оценкам имеет приведенную погрешность около 4 %.

Таким образом, был разработан волоконно-оптический датчик для измерения избыточного давления жидкостей или газов, являющийся взрывобезопасным, помехозащищенным в условиях высокого уровня электромагнитных полей и имеющий невысокую стоимость.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fiber Optic Sensors. London / Yin Shizhuo [etc.]. – New York : CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2008.
2. **Окиси, Т.** Волоконно-оптические датчики / Т. Окиси, К. Окамото, М. Оцу ; под ред. Т. Окиси. – Л. : Энергоатомиздат, 1990.
3. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников / Под ред. Э. Удда. – М. : Техносфера, 2008.
4. **Бусурин, В. И.** Волоконно-оптические датчики. Физические основы, вопросы расчета и применения / В. И. Бусурин, Ю. Р. Носов – М. : Энергоатомиздат, 1990.
5. **Donlagic, D.** Fiber-optic microbend sensor structure / D. Donlagic, M. Završnik // Opt. Lett. – 1997. – Vol. 22, № 11. – P. 837–839.
6. Tunable fiber grating fabricated in photonic crystal fiber by use of mechanical pressure / J. H. Lim [etc.] // Opt.Lett. – 2004. – Vol. 29, № 4. – P. 331–333.
7. **Ivanov, O. V.** Wavelength shift and split of cladding mode resonances in microbend long-period fiber gratings under torsion / O. V. Ivanov // Opt. Commun. – 2004. – Vol. 232, № 1–6. – P. 159–166.
8. **Борисов, В. И.** Многоканальный микроизгибный волоконно-оптический датчик механического усилия / В. И. Борисов, И. В. Шилова // Вестн. МГТУ. – 2004. – № 1. – С. 19–21.

9. **Борисов, В. И.** Многоканальный микроизгибный волоконно-оптический датчик температуры / В. И. Борисов, И. В. Шилова // Вестн. МГТУ. – 2004. – № 2. – С. 21–24.

10. **Борисов, В. И.** Волоконно-оптический тензодатчик / В. И. Борисов, Е. М. Силутина, И. В. Шилова // Вестн. МГТУ. – 2006. – № 3. – С. 39–43.

*Статья сдана в редакцию 30 июня 2012 года*

**Ирина Владимировна Шилова**, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет.  
Тел.: +375-293-49-91-23. E-mail: irina.schilova@tut.by.

**Irina Vladimirovna Shilova**, senior lecturer, Belarusian-Russian University. Tel.: +375-293-49-91-23.  
E-mail: irina.schilova@tut.by.

## ФИЗИКА

УДК 535.222 + 621.375

*В. А. Юревич, А. С. Скапцов, Ю. В. Юревич*

### РЕЗОНАНСНАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ КОРОТКИХ ОПТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ СРЕДУ ИЗ МОНОДИСПЕРСНЫХ НАНОЧАСТИЦ

UDC 535.222 + 621.375

*V. A. Yurevich, A. S. Scaptsov, Y. V. Yurevich*

### RESONANT TRANSFORMATION OF SHORT OPTICAL PULSES DURING THEIR PROPAGATION THROUGH THE MEDIUM FORMED BY MONODISPERSIVE NANOPARTICLES

#### **Аннотация**

На основе компьютерного моделирования анализируются закономерности коллективной реакции ансамбля активных наноразмерных частиц на когерентное излучение. Иллюстрируется зависимость автоколебательной структуры световых импульсов, взаимодействующих с ансамблем, от уровня резонансного поглощения.

#### **Ключевые слова:**

наноразмерные частицы, когерентное взаимодействие, квазирезонансная поляризованность, автоколебательная структура интенсивности.

#### **Abstract**

Based on computer modelling, some features of a collective reaction of the active nanometrical particles ensemble on coherent radiation are analyzed. The dependence of the self-oscillatory structure of light pulses interacting with nanoparticles on the level of resonant absorption is illustrated.

#### **Key words:**

nanometrical particles, coherent interaction, quasi-resonant polarisability, light intensity self-oscillatory structure.

#### **Введение**

Для развития теории оптических эффектов в средах, образованных мелкодисперсными частицами, одной из проблем, нуждающихся в решении, является выяснение закономерностей отклика совокупности наноразмерных частиц на когерентное излучение. Изучение особенностей поглощения света и люминесценции в мелкодисперсных

средах оказывается важным для оценки размера наночастиц, их концентрации, степени упорядоченности или периода расположения [1, 2]. Не менее важна задача определения характера физических механизмов, действующих в процессе формирования наночастиц. Известно, что взаимодействие наночастиц между собой способно обусловить кооперативные эффекты, приводящие к возникновению области проводимости в

запрещенной зоне, к потерям мощности излучения вследствие процессов передачи энергии (тушению люминесценции), к люминесценции с эффектами усиления [2–4]. Все эти процессы существенно зависят от концентрации и размера структурных элементов мелкодисперсных сред.

Разрешению проблемы оценки по результатам эксперимента ряда физических свойств этих элементов может послужить и анализ закономерностей резонансного отклика импульса таких сред на лазерное излучение. В частности, модуляция огибающей интенсивности прошедшего света или индуцированный в условиях нелинейности резонансного взаимодействия сдвиг несущей частоты должны проявлять зависимость от размера наночастиц, их концентрации и дипольного момента. Именно в коллективных процессах поглощения и переизлучения средой коротких световых импульсов, когда частицы взаимодействуют только через переизлучаемое ими световое поле, корреляции образующих среду частиц зависят от их концентрации и дипольного момента (значение последнего связано с их размерами). Поэтому естественно ожидать, что в особенностях коллективной реакции совокупности монодисперсных частиц на излучение в этих условиях и должны проявиться их свойства.

#### ***Исходная гипотеза и основные уравнения***

Работа посвящена изучению трансформации особо коротких оптических импульсов при прохождении через среду, включающую совокупность наночастиц в матрице, находящейся в конденсированном состоянии. Предполагается, что означенная совокупность мелкодисперсных элементов образует ансамбль активных частиц, способных коллективно реагировать на приложенное резонансное световое поле. Коллективную реакцию также именуют когерентной, имея в виду когерентность

действующего поля и поляризованности среды в условиях относительно слабого проявления релаксационных механизмов уширения спектральных линий поглощения. Когерентное взаимодействие короткого светового импульса с ансамблем монодисперсных частиц может быть подвержено заметному влиянию квазирезонансного эффекта нелинейности поляризационного отклика. Специфика этого эффекта связана с различием поляризуемостей частиц в основном и возбужденном состоянии и выражается в зависимости рефракции света в среде от её энергетического состояния. Проявление рефракционной нелинейности такого типа довольно типично для материалов, в которых активные центры имеют размеры, примерно на порядок и более превышающие размер атома [2, 3]. Сами по себе наночастицы характеризуются именно таким размером [5], и их дипольный момент может достигать довольно высоких значений. В этом случае при условии относительно узкой линии спектрального резонанса вероятность резонансного поглощения столь же значительна. В отклике сред, содержащих такие частицы, на лазерные импульсы с несущими частотами в области оптического резонанса должны наблюдаться кооперативные эффекты. В частности, сверхкороткие интенсивные импульсы при прохождении через вещество могут приобретать нутационную субструктуру.

При формулировке расчётной модели полагаем, что на слой среды, содержащей активные монодисперсные частицы, нормально падает плоская световая волна с несущей частотой  $\omega$ . Амплитуда волны  $E_i$  относительно медленно меняется на расстояниях порядка длины волны  $\lambda = 2\pi c/\omega$  и на промежутках времени, сравнимых с периодом светового колебания. При предположении возможности резонансного отклика среды с учетом квазирезонансного эффекта нелинейности взаимодействие поля лазерного излучения с веществом в

рамках двухуровневой схемы может быть описано аналогично [6] модифицированной системой уравнений Максвелла-Блоха для квазистационарной комплексной амплитуды поля  $E(x, t)$  проходящей в направлении оси  $Ox$  волны и вероятностных переменных – поляризованности  $p$  и разности заселённости уровней основного перехода  $n$ , отнесённых к одному атому:

$$\begin{aligned} & \left( \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\eta}{c} \frac{\partial}{\partial t} \right) E = \\ & = \frac{\omega N}{3c} \left[ \frac{\mu}{\varepsilon_0} p - i 2\pi \Delta \alpha (n - n_0) E \right]; \\ \dot{p} + \left\{ \frac{1}{T_2} + i \left( \omega - \omega_0 + \frac{\Delta \alpha}{\hbar} \pi \varepsilon_0 |E|^2 \right) \right\} p = \\ & = -\frac{\mu}{\hbar} n E; \\ \dot{n} + \frac{n - n_0}{T_1} = -\frac{\mu}{2\hbar} (p^* E + p E^*). \quad (1) \end{aligned}$$

Здесь  $\mu$  – средний дипольный момент наночастиц;  $N$  – их концентрация;  $\Delta \alpha$  – дефект поляризуемости (разность поляризуемостей в основном и возбуждённом состоянии частицы);  $\omega_0$  – резонансная частота перехода;  $n_0$  – начальное значение разности заселённости;  $T_1$  и  $T_2$  – времена продольной и поперечной релаксации. Величина, обратная значению  $T_2$ , характеризует однородное уширение спектральной линии резонансного поглощения. Значения среднего дипольного момента  $\mu$  в применяемой схеме могут быть оценены произведением заряда электрона  $e$  на плечо элементарного диполя  $d$ , величина которого примерно равна среднему размеру наночастицы. Напряжённостью  $E$  определяется действующее в местах нахождения наночастиц световое поле, его динамика в слое непосредственно определена двумя материальными компонентами: резонансной поляризованностью  $p$  и квазирезо-

нансной составляющей поляризации, пропорциональной  $2\pi \varepsilon_0 \Delta \alpha N (n - n_0) E$  в уравнении переноса напряженности  $E$  системы (1). С влиянием переходов, соседних с резонансным, связана возможность квадратичного штарковского эффекта: штарковское смещение резонансных уровней в представлении обобщенной двухуровневой схемы [7] описывается фазовым сдвигом резонансной поляризации, пропорциональным  $\Delta \alpha |E|^2 / \hbar$ .

Для решения задач моделирования на основе (1) удобно использовать нормированные переменные и коэффициенты:  $e(x, t) = \mu \hbar^{-1} \sqrt{T_1 T_2} E(x, t)$ ,  $\Delta = (\omega - \omega_0) T_2$  и  $\beta = 2\pi \mu^{-2} \hbar \varepsilon_0 \Delta \alpha \sqrt{T_2 T_1^{-1}}$ , а также определить параметр  $\kappa = \frac{\mu^2 \omega_0 N}{3 \varepsilon_0 c \hbar} T_2$ , как

известно, выражающий коэффициент ненасыщенного поглощения на частоте резонанса. В этом представлении напряженности полей  $E_i$  и  $E$  нормируются по величине напряженности поля, соответствующего мощности насыщения, а отстройка частоты от центра линии  $\omega - \omega_0$  – по полуширине резонанса поглощения. Уравнения для квазистационарных переменных поля и отклика среды тогда запишутся так:

$$\begin{aligned} & \left( \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\eta}{c} \frac{\partial}{\partial t} \right) e = \\ & = \kappa \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} [p - i \beta (n - n_0) e]; \\ \dot{p} + \left[ 1 + i \left( \Delta + \frac{\beta}{2} |e|^2 \right) \right] \frac{p}{T_2} = \\ & = -\frac{ne}{\sqrt{T_1 T_2}}; \\ \dot{n} = \frac{1}{T_1} \left[ n_0 - n - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} (p^* e + p e^*) \right]. \quad (2) \end{aligned}$$

Далее в рамках численного интегрирования системы (2) моделировался процесс трансформации лазерного импульса, проходящего плоскопараллельный слой длины  $L$  с поглощением.

### **Методика моделирования в конкретной физической ситуации**

В среде слоя образующие её наночастицы предполагались центрами, активно реагирующими на резонансное поле излучения. Естественно было считать, что их совокупность в начальный момент времени, т. е. в отсутствие зондирующего извне поля, находится в основном состоянии, т. е.  $n(x, t=0) = n_0 = 1,0$ , а резонансная поляризованность отсутствует –  $p(x, t=0) = 0$ . Рассматривалась известная задача Дирихле, т. е. расчет зависимости «выходного» поля  $e(x=L, t)$  на основе (2) проводился при заданном распределении напряжённости поля  $e(x=0, t) = \mu \hbar^{-1} \sqrt{T_1 T_2} E_i(t)$  на «входной» грани слоя.

В задаче моделирования поведения отклика ансамбля наночастиц в сильно нестационарных условиях внешнего воздействия напряжённость поля  $E_i(t)$  зондирующего светового импульса пикосекундной длительности задавалась в виде гиперболического секанса. Амплитуды напряжённости всплесков приложенного светового поля соответствовали случаю рассматриваемых в теории когерентного взаимодействия так называемых  $\pi$ -импульсов. Значение так называемого полярного угла вектора Блоха, рассчитываемого для импульса как  $\theta_0 = \frac{\mu}{\hbar} \int_0^\infty E_i(t) dt$  и выражающего «площадь импульса амплитуды поля», для входных импульсов было сравнимым с  $\pi$ . Отметим, что в представлении полярного угла  $\theta_0$  используется нормировка, означающая, что подинтегральная переменная, которая линейно связана с напряжённостью поля, имеет размерность частоты. В прошедшем среду резонанс-

ном излучении возможно самопроизвольное возникновение модуляции с частотой, зависящей от напряжённости поля. Этот нелинейный динамический эффект предсказан в теории когерентного взаимодействия и известен как проявление частоты Раби [8].

Численное интегрирование проводилось в рамках решения системы разностных уравнений, использовался традиционный метод конечных разностей – уравнения модели (2) сводились к соответствующим рекуррентным алгебраическим соотношениям.

Примеры численного расчёта динамики безразмерной интенсивности  $Y(t) = |e(x=L, t)|^2$  на основе разностного аналога системы (2), которые выражают наиболее характерные особенности трансформации импульсов, приведены на рис. 1. Характер изменений в импульсах отслеживается для нарастающего ряда значений коэффициента ненасыщенного поглощения  $\kappa$  (в случае  $\kappa = 0$  зависимость интенсивности излучения от времени представляет форму входного импульса). Значения величины  $\kappa$  для фиксированных величин остальных параметров определялись концентрацией активных нанометрических частиц  $N$ . В выборе параметров наночастиц (их природы, размеров и концентрации), а также спектрального диапазона зондирующего поля, которые использовались при определении коэффициентов системы (2) в расчётах, исходили, в основном, из оценок, данных в [2–4].

### **Автомодуляционные изменения прошедших импульсов**

В условиях значительного поглощения пиковая мощность выходного импульса естественно снижается, происходит увеличение его общей длительности. Следствием резонансного взаимодействия коротких импульсов со средой в рассматриваемой модели прежде всего является возникновение особого

рода субструктуры интенсивности у прошедшего среду импульса.

Реально поле излучения должно представлять собой сферическую волну

и эффект возникновения нутационных автоколебаний особо чувствителен к среднему расстоянию между частицами.

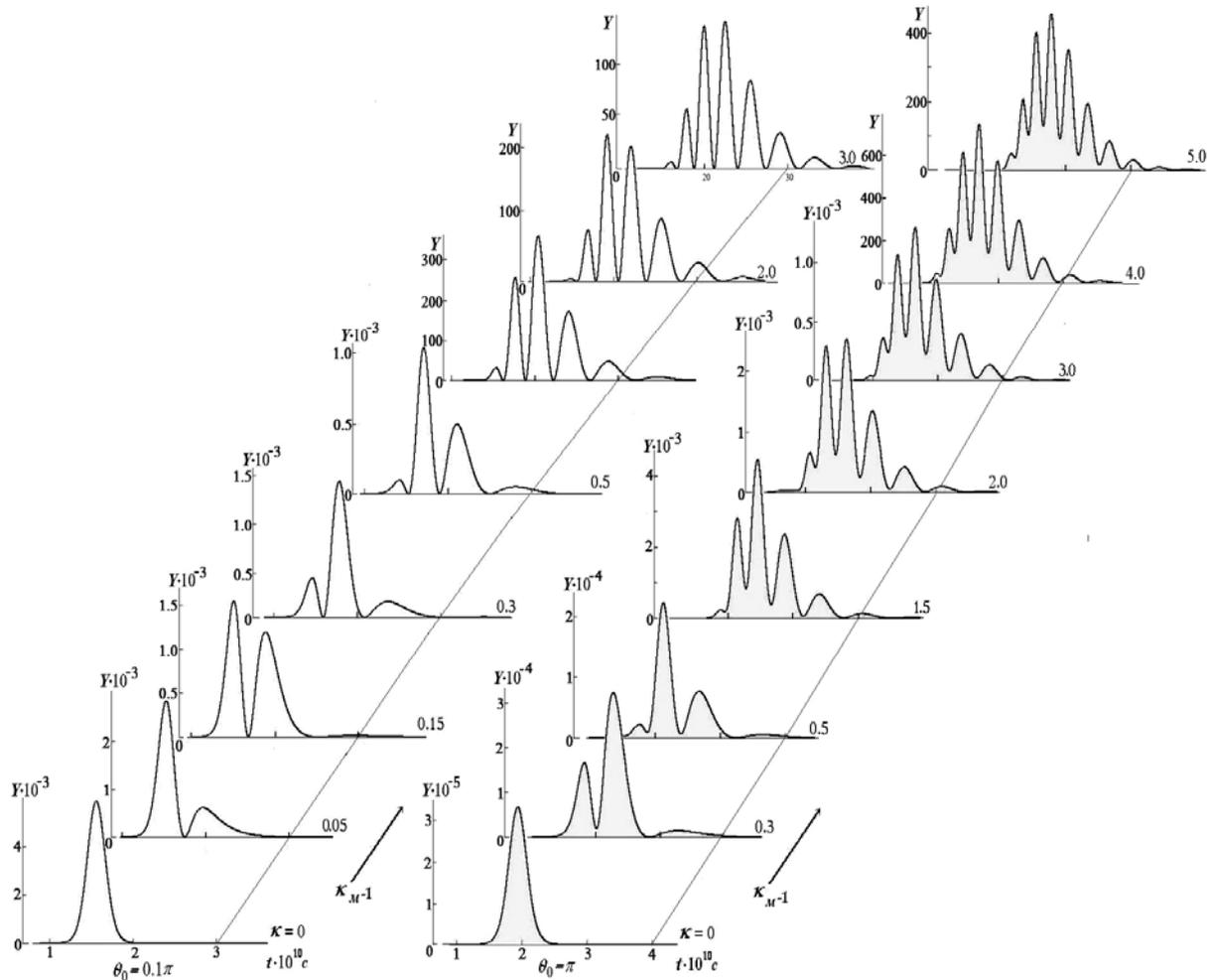


Рис. 1. Временная структура интенсивности импульсного излучения, прошедшего через слой нанометрических частиц, в зависимости от коэффициента резонансного поглощения:  $\mu = 6,4 \cdot 10^{-27}$  Кл·м;  $T_1 = 1,0 \cdot 10^{-4}$  с;  $T_2 = 1,0 \cdot 10^{-10}$  с;  $L = 0,3$  м;  $\lambda = 5,03 \cdot 10^{-7}$  м;  $\beta = 1,0$ ;  $\eta = 3,6$

Чем выше их концентрация, тем меньше это расстояние. Поэтому и в рассматриваемом случае приложенного плосковолнового светового поля частота нутационных колебаний возрастает с увеличением резонансного поглощения, и, кроме того, существуют пороговые для заданного уровня входных величин полярного угла вектора Блоха значения плотности возбуждённых частиц [8]. Последней осо-

бенностью и объясняются различные значения поглощения, с которых «стартует» возникновение автомодуляционной структуры в случае двух разных значений пиковой мощности входного импульса на рис. 1. Можно показать, что в используемой модели при условии  $\beta = 0$  для точного резонанса ( $\Delta = 0$ ) и  $T_1, T_2 \rightarrow \infty$  частота нутационных осцилляций должна определяться собственной частотой коле-

баний полярного угла вектора Блоха

$$\theta(\tau) = \frac{\mu}{\hbar} \int_0^\tau E(\tau') d\tau', \text{ где } \tau = t - \eta x/c,$$

т. е. величиной  $\Omega = (c\kappa/\eta)^{1/2} (T_1/T_2)^{1/4}$ .

Таким образом, по изменениям в характере автомодуляционной субструктуры импульсов, возникающей как следствие нутационных автоколебаний полярного угла вектора Блоха, можно судить о вариациях концентрации или размера наночастиц. Резонансная трансформация входных импульсов является нелинейным автомодуляционным эффектом в поглощении или излучении светового поля. Пиковая мощность входного импульса должна быть высокой – такой, чтобы напряжённость поля в импульсе была сравнимой с внутримолекулярным электрическим полем частиц, т. е. естественно должны использоваться лазерные импульсы. Изменение частоты нутации в прошедших импульсах с ростом поглощения на рис. 1 не имеет прямого согласования с изменением  $\Omega$  в зависимости от  $\kappa$ . Во-первых, это связано с тем, что в расчётах использовалась более реальная модель, где времена  $T_1$  и  $T_2$  хотя и значительно превышают длительность входного импульса, но считаются конечными. Во-вторых, принятая модель учитывает квазирезонансную поляризованность. Следствием её существования является фазовая модуляция прошедшего сигнала, которая приводит к тому, что нутационные колебания оказываются менее

контрастными и следуют с большей частотой, общая продолжительность выходного импульса несколько снижается. Это также заметно из сравнения динамики изменений в импульсах с двумя разными значениями входной пиковой мощности, иллюстрируемой на рис. 1. Отметим, что хотя разница в контрасте модуляции значительна, число различных нутационных выбросов при одинаковом уровне резонансного поглощения практически не меняется.

### Заключение

Полученные результаты могут быть основой для разработки приёмов диагностики свойств физических объектов, образуемых наноразмерными частицами. Самосогласованная коллективная реакция ансамбля этих частиц на импульсное поле зондирующего когерентного излучения обладает рядом характерных особенностей, которые обычно регистрируются в экспериментальных измерениях. Главной среди этих особенностей является возникновение выраженной субструктуры в интенсивности прошедших через слой наноразмерными частиц оптических импульсов. Частота следования и число нутационных выбросов, образующих автоколебательную субструктуру, являются хорошо различимыми в измерении характеристиками и критичны по отношению к размеру и концентрации монодисперсных наночастиц.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Size-dependent enhancement of nonlinear optical properties in Nanocolloids of ZnO / L. Irimpan [et al.] // Journ. of Appl. Phys. – 2008. – Vol. 103, № 3. – P. 033105–033108.
2. **Смынгына, В. А.** Люминесцентные свойства нанокристаллов CdS, легированных атомами лития и алюминия / В. А. Смынгына, В. М. Скобеева, Н. В. Малущин // Sensor Electronics and Microsystem Technologies. – 2011 – Т. 2, № 1. – С. 55–58.
3. **Ekimov, A. I.** Quantum size effect in semiconductor microcrystals / A. I. Ekimov, A. L. Efros, A. A. Onushenko // Solid State Communication. – 1995. – Vol. 56, № 4511. – С. 921–924.
4. Учет рассеяния и перепоглощения при анализе спектров люминесценции наночастиц / В. И. Кочубей [и др.] // Квант. электроника. – 2011. – Т. 41, № 4. – С. 335–339.
5. **Chang, T. Y.** Fast self-induced refractive index changes in optical media: a survey / T. Y. Chang // Opt. Engineering. – 1981. – Vol. 20, № 2. – P. 220–232.

6. **Юревич, В. А.** Особенности когерентного усиления коротких оптических импульсов в средах с нерезонансной поляризуемостью / В. А. Юревич // Квант. электроника. – 1990. – Т. 17, № 7. – С. 951–953.
7. Local-field effects in a dense ensemble of resonant atoms : Model of a generalized two-level system / A. A. Afanas'ev [et al.] // Phys. Rev. A. – 1999. – Vol. 60, № 2. – P. 1523–1529.
8. **Аллен, Л.** Оптический резонанс и двухуровневые атомы / Л. Аллен, Дж. Эберли. – М. : Мир, 1978. – 216 с.

*Статья сдана в редакцию 18 июля 2012 года*

**Владимир Антонович Юревич**, д-р физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, Могилёвский государственный университет продовольствия. Тел.: +375-447-52-56-14.

**Андрей Сергеевич Скапцов**, канд. физ.-мат. наук, доц., Могилёвский государственный университет продовольствия. Тел.: 8-0222-48-59-02.

**Юрий Владимирович Юревич**, ассистент, Могилёвский государственный университет продовольствия. Тел.: 8-0222-48-59-02.

**Vladimir Antonovich Yurevich**, DSc (Physics and Mathematics), senior research fellow, Mogilev State University of Food Technologies. Tel.: +375-447-52-56-14.

**Andrei Sergeyeovich Scaptsov**, PhD (Physics and Mathematics), Associate Prof., Mogilev State University of Food Technologies. Tel.: 8-0222-48-59-02.

**Yury Vladimirovich Yurevich**, assistant lecturer, Mogilev State University of Food Technologies. Tel.: 8-0222-48-59-02.

**ЭКОНОМИКА .  
ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ**

УДК 338.532.4.025

*И. В. Ивановская, Н. П. Драгун*

**ВЫЯВЛЕНИЕ ЦЕНОВОГО СГОВОРА ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ НА ТОВАРНЫХ РЫНКАХ БЕЛАРУСИ: ТЕОРИЯ НА ПРАКТИКЕ**

UDC 338.532.4.025

*I. V. Ivanovskaya, N. P. Dragun*

**THE DISCLOSURE OF THE PRICE COLLUSION OF MANUFACTURERS ON COMMODITY MARKETS OF BELARUS: THEORY AND PRACTICE**

**Аннотация**

Представлена апробация действующей методической базы антимонопольного законодательства Беларуси на примере отечественных рынков продукции деревообработки, призванная определить основные направления ее совершенствования в области выявления, пресечения и предупреждения ценового сговора товаропроизводителей. Установлены причины недостаточной эффективности действующей методической базы антимонопольного законодательства Беларуси в области выявления и предупреждения соглашений и согласованных действий товаропроизводителей о ценах и представлены направления ее совершенствования.

**Ключевые слова:**

ценовой сговор, ценовые соглашения, согласованные действия о ценах, антимонопольное законодательство, рынки продукции деревообработки.

**Abstract**

The paper provides testing of the operating methodological base of the Belarus antimonopoly law exemplified by home markets of wood-processing products, which is presumed to determine the basic trends of its improvement with the purpose of revealing, restraining and preventing any price collusion of manufactureres. The causes of insufficient effectiveness of the current methodological base of the antimonopoly law of Belarus in disclosing and preventing manufacturers' agreements and concerted actions on pricing are established, and trends of its perfection are presented.

**Key words:**

price collusion, price agreements, concerted actions on prices, antimonopoly law, markets of wood-processing products.

**Введение**

Вступление в силу в начале 2011 г. так долго ожидавшихся отечественными субъектами хозяйствования и сторонами рыночного механизма распределения ресурсов в экономике нормативных актов, направленных на ли-

берализацию ценообразования (Директива № 4 от 31.12.2010 г., Указ Президента Республики Беларусь № 72 от 25.02.2011 г., Постановление Министерства экономики № 46 от 31.03.2011 г.), не только не привело к снижению цен и повышению аллокативной эффективно-

© Ивановская И. В., Драгун Н. П., 2012

сти товарных рынков, но и вызвало невиданный ранее монопольный рост цен.

Для упрощенного понимания принципов функционирования рыночной экономики подобная ситуация необъяснима (вернее, ошибочно объяснима существенной девальвацией белорусского рубля в 2011 г.), так же как и непонятна фактическая недееспособность отечественного антимонопольного законодательства. Поэтому существует обстоятельная необходимость исследования процессов установления цен в условиях олигополистической структуры большинства товарных рынков Беларуси и либерализации ценообразования.

Авторами установлено, что в сложившейся в Беларуси экономической ситуации достижение в период до 2015 г. целей социально-экономического развития страны, связанных со снижением инфляции до 9...11 % и повышением реальных доходов населения в 1,7...1,8 раза к уровню 2010 г., предусмотренное «Программой социально-экономического развития Республики Беларусь на 2011...2015 гг.», возможно прежде всего путем ограничения и пресечения антиконкурентных соглашений (согласованных действий товаропроизводителей) о ценах.

Проведенный авторами анализ законодательных и нормативных документов, а также практики антимонопольного регулирования в Республике Беларусь позволил сделать вывод о том, что одной из основных причин недостаточной эффективности работы антимонопольных органов по выявлению и пресечению антиконкурентных соглашений (согласованных действий) о ценах субъектов хозяйствования на товарных рынках Беларуси при переходе от административного регулирования цен к рыночному ценообразованию является недостаточная формализация процесса выявления и пресечения соглашений (согласованных действий) о ценах, заключающаяся в отсутствии целого ряда

необходимых процедур и методик (определения оснований для инициирования процедуры доказательства ценового сговора товаропроизводителей; оценки последствий ценового сговора для рынка, отрасли и национальной экономики; оценки факторов, способствующих сговору и др.), а также в неполноте законодательно закрепленных процедур (отсутствие учета специфики согласованных действий субъектов хозяйствования и др.).

Целью работы авторов являлась апробация действующей методической базы антимонопольного законодательства Беларуси для определения основных направлений ее совершенствования в области выявления, пресечения и предотвращения горизонтального ценового сговора товаропроизводителей.

### **Основная часть**

Согласно положениям антимонопольного законодательства Республики Беларусь антиконкурентное ценообразование является следствием либо злоупотребления доминирующим положением субъектов хозяйствования на товарных рынках, имеющих право установления свободных цен, либо ценового соглашения нескольких хозяйствующих субъектов. Методика выявления ценовых соглашений (согласованных действий) хозяйствующих субъектов содержится в «Инструкции по выявлению и пресечению антиконкурентных соглашений (согласованных действий) о ценах» [1]. Она апробирована авторами на примере рынков продукции деревообработки Беларуси. Апробация, согласно методике, включает в себя следующие этапы.

1. Установление круга хозяйствующих субъектов, (возможно) участвующих в соглашении, а также определение соответствующего товарного рынка, заключающееся в:

– определении географического рынка – территории, на которой осуществляют деятельность (возможно)

участвующие в соглашении хозяйствующие субъекты. В работе в качестве объекта исследования выступают рынки фанеры, ДСП и ДВП Беларуси, имеющие олигополистическую структуру. Определено, что такая рыночная структура приводит к взаимозависимости маркетинговых стратегий участников и создает необходимые условия для возникновения сговора [2];

– определении долей рынка, приходящихся на хозяйствующих субъектов – участников соглашения, действующих в пределах рассматриваемого

географического рынка, и их суммарной рыночной доли (для установления факта объединенного доминирования группы хозяйствующих субъектов). Порядок расчета рыночных долей хозяйствующих субъектов, участвующих в ценовых соглашениях, представлен в «Инструкции по определению доминирующего положения хозяйствующих субъектов на товарных рынках Республики Беларусь» [3] и включает следующие этапы:

а) определение рыночных долей субъектов хозяйствования на рассматриваемом товарном рынке (табл. 1).

Табл. 1. Показатели доминирующего положения анализируемых предприятий на исследуемых товарных рынках в период с 2008 по 2010 гг.

Год	Объем производства товара в республике		Объем ввоза в республику	Объем вывоза за пределы республики		Объем республиканского рынка	Доля хозяйствующих субъектов на рынке, %	Предельная величина доли рынка, %
	всего	в т. ч. крупнейшими хоз. субъектами		всего	в т. ч. хозяйствующим субъектом			
<i>Производители фанеры, тыс. м<sup>3</sup></i>								
2008	161,0	133,38	14,4	91,6	40,9	65,3	31,59	4-х хоз. субъектов – 100
2009	151,0	115,41	10,2	127,3	51,4	16,4	20,35	
2010	156,9	120,30	17,3	137,9	55,6	36,3	46,40	
<i>Производители ДСП, тыс. м<sup>3</sup></i>								
2008	443,0	234,30	212,44	212,88	110,96	442,56	27,87	4-х хоз. субъектов – 100
2009	308,0	165,82	201,04	145,95	103,75	363,09	17,09	
2010	300,0	165,76	275,68	146,89	105,19	428,79	14,13	
<i>Производители ДВП, тыс. м<sup>2</sup></i>								
2008	58600	33439	17016	41176	29092	34440	12,62	2-х хоз. субъектов – 67
2009	36400	23381	11399	30799	20341	17000	17,88	
2010	39800	27551	14768	37037	24796	17531	15,72	
Примечания 1 Доля хозяйствующих субъектов для рынка фанеры рассчитана по крупнейшим производителям – ЗАО «Пинскдрев», ОАО «Мостовдрев», ОАО «ФандОК», ОАО «Гомельдрев»; ДСП – ЗАО «Пинскдрев», ОАО «Речищадрев», ОАО «Витебскдрев», ОАО «Ивацевичдрев»; ДВП – ОАО «Борисовский ДОК» и ОАО «Витебскдрев». 2 Рассчитано авторами на основе «Инструкции по определению доминирующего положения хозяйствующих субъектов на товарных рынках Республики Беларусь», статистической отчетности деревообрабатывающих предприятий, Национального статистического комитета и Государственного таможенного комитета Республики Беларусь [4, 5]								

Данные, представленные в табл. 1, позволяют сделать вывод о том, что в период с 2008 по 2010 гг. исследуемые предприятия были ориентированы на экспорт производимой продукции (что обусловлено превышением объемов производства над емкостью внутренне-

го рынка, а также необходимостью удовлетворения потребности страны в иностранной валюте) и формально не занимали доминирующего положения на рассматриваемых товарных рынках. Это, согласно действующему в Беларуси законодательству, исключает воз-

возникновения антиконкурентного поведения в процессе формирования отпускных цен.

В то же время рассматриваемые рынки в период с 2006 по 2010 гг. характеризовались стабильностью числа участников и их рыночных долей относительно друг друга. При этом объемы

производства отечественных производителей фанеры за анализируемый период увеличились на 12,7 %, объем импорта – в 2,2 раза; производство ДСП и ДВП сократилось на 36,2 и 24,8 % соответственно, объем импорта ДСП увеличился на 3,7 %, ДВП – на 26,9 % (табл. 2).

Табл. 2. Косвенные показатели доминирующего положения анализируемых предприятий на исследуемых товарных рынках в период с 2006 по 2010 гг.

Показатель	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.
<i>Производители фанеры</i>					
Симметричность долей рынка (коэффициент вариации долей рынка), %	7,7	6,7	8,8	13,4	8,0
Доля импорта в объеме производства, %	4,8	6,7	8,9	6,8	11,0
Доля импорта на внутреннем рынке, %	15,3	20,4	17,3	30,1	47,6
Темпы прироста производства на внутреннем рынке, %	–	7,5	–4,7	–6,3	17,5
<i>Производители ДСП</i>					
Симметричность долей рынка (коэффициент вариации долей рынка), %	29,9	32,3	30,8	34,1	31,1
Доля импорта в объеме производства, %	64,7	69,5	48,0	65,3	91,9
Доля импорта на внутреннем рынке, %	57,9	58,7	48,0	55,4	64,3
Темпы прироста производства на внутреннем рынке, %	–	–3,0	6,9	–35,3	–4,9
<i>Производители ДВП</i>					
Симметричность долей рынка (коэффициент вариации долей рынка), %	24,3	23,1	22,1	28,3	27,5
Доля импорта в объеме производства, %	19,7	26,1	29,0	31,3	37,1
Доля импорта на внутреннем рынке, %	43,6	54,5	49,4	67,1	84,2
Темпы прироста производства на внутреннем рынке, %	–	–7,0	–1,9	–30,1	17,8
Примечание – Рассчитано авторами на основе статистической отчетности концерна «Беллесбумпром» и Государственного таможенного комитета Республики Беларусь [5]					

При этом импортируемая продукция существенно отличалась от производимой отечественными деревообрабатывающими предприятиями, а основной (возможной) причиной роста импорта явилось отсутствие в стране в анализируемом периоде современных производств, которые смогли бы обеспечить потребности внутреннего рынка в высококачественной продукции деревообработки требующегося ассортимента (большеформатной фанеры, высоко-

качественных ДВП, ориентированно-стружечных плит – ОСБ и т. п.) в необходимых объемах. При этом средняя цена на импортируемые ДСП превышала экспортную в 1,6...2,4 раза, ДВП – в 3,7...5,0 раз, фанеру – в 1,6...2,3 раза, а цена на внутреннем рынке в большинстве лет анализируемого периода превышала экспортную. Данные факты не позволяют отклонить гипотезу о наличии сговора товаропроизводителей на исследуемых товарных рынках, дающе-

го им возможность компенсировать низкую рентабельность экспорта продажами на внутреннем рынке по более высоким ценам;

б) оценка степени возможного взаимодействия субъектов хозяйствования. Согласно положениям антимонопольного законодательства Беларуси формами взаимодействия субъектов хозяйствования, способствующими заключению антиконкурентных ценовых соглашений, являются: взаимодействие, основанное на обладании акциями, паями, долями в уставных фондах друг друга; взаимодействие в рамках организационно-правовых структур, в состав которых входят несколько юридически самостоятельных хозяйствующих субъектов, проводящих единую экономическую политику; взаимодействие в рамках ассоциаций или иных объединений в данной отрасли, которые могут представлять базу для координирования экономической деятельности и обмена информацией.

В период с 2006 по 2010 гг. исследуемые деревообрабатывающие предприятия входили в состав концерна «Беллесбумпром» и устанавливали цены в соответствии с законодательством Республики Беларусь:

1) отпускные цены на продукцию формировались на основе Закона Республики Беларусь «О ценообразовании», «Инструкции о порядке формирования и применения цен и тарифов», утвержденной Постановлением Министерства экономики Республики Беларусь от 10 сентября 2008 г. № 183, с учетом конъюнктуры рынка, плановой себестоимости, всех видов установленных налогов и неналоговых платежей, прибыли;

2) включение затрат в себестоимость продукции осуществлялось в соответствии с «Основными положениями по составу затрат, включаемых в себестоимость продукции», а также отраслевыми методическими рекомендациями по вопросам планирования, учета и калькулирования себестоимости про-

дукции, утверждаемыми концерном «Беллесбумпром». Затраты, включаемые в себестоимость продукции, рассчитывались по нормам, утверждаемым субъектом предпринимательской деятельности, если иное не было установлено законодательством;

3) рентабельность продукции планировалась на основе утвержденного положения концерна «Беллесбумпром», в котором поквартально указывался предельный уровень рентабельности, превышать который анализируемые предприятия не имели права;

– определении чувствительности спроса к изменению цены товара. Анализ чувствительности изменения спроса к изменению цены на рассматриваемых рынках продукции деревообработки авторами не проводился, поскольку, во-первых, в нормативных документах отсутствуют количественные показатели оценки указанного показателя, во-вторых, эластичность спроса, как установлено в результате проведенных исследований, не влияет на стимулы товаропроизводителей вступить в ценовой сговор [6].

2. Анализ особенностей товара, состоящий в:

– определении схожести условий производства товаров у различных производителей. Динамика издержек производства продукции и доля постоянных издержек в стоимости продукции исследуемых предприятий в период с 2006 по 2010 гг. представлены в табл. 3 и 4.

Таким образом, в рассматриваемом периоде у анализируемых предприятий отклонение издержек производства 1 усл. м<sup>3</sup> фанеры от среднеотраслевых значений составляло от 11,0 до 19,0 %, 1 усл. м<sup>3</sup> ДСП – от 17,5 до 30,3 %, 1 усл. м<sup>2</sup> ДВП – от 13,8 до 45,4 %. При этом наблюдалась тенденция снижения асимметричности затрат на производство указанной продукции. Доля постоянных издержек на производство фанеры в период с 2006 по 2010 гг. в среднем по от-

расли составляла от 24,0 до 29,0 %; до 33,0 %.  
ДСП – от 25,0 до 31,0 %, ДВП – от 11,0

Табл. 3. Динамика себестоимости продукции анализируемых предприятий в период с 2006 по 2010 гг.

Показатель	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.
<i>Производители фанеры, р./м<sup>3</sup></i>					
Среднее значение	625483	759597	940397	973702	1133530
Стандартное отклонение	68737	86252	100248	187690	165009
<i>Производители ДСП, р./м<sup>3</sup></i>					
Среднее значение	247939	299558	357956	456994	432367
Стандартное отклонение	46483	56294	62960	138498	74078
<i>Производители ДВП, р./м<sup>2</sup></i>					
Среднее значение	1125082	1536349	1763146	2731664	1902716
Стандартное отклонение	230503	358741	300267	1905895	263940
Примечание – Расчеты авторов на основе данных концерна «Беллесбумпром»					

Табл. 4. Динамика доли постоянных издержек в стоимости продукции анализируемых предприятий в период с 2006 по 2010 гг.

Показатель	Производитель фанеры					Производитель ДСП					Производитель ДВП				
	Год					Год					Год				
	2006	2007	2008	2009	2010	2006	2007	2008	2009	2010	2006	2007	2008	2009	2010
Среднее значение	0,26	0,24	0,26	0,27	0,29	0,26	0,28	0,27	0,31	0,25	0,33	0,32	0,11	0,30	0,19
Стандартное отклонение	0,09	0,07	0,06	0,06	0,07	0,05	0,09	0,08	0,13	0,09	0,11	0,10	0,21	0,15	0,02
Примечание – Расчеты авторов на основе данных концерна «Беллесбумпром»															

Результаты анализа условий производства позволяют утверждать, что, с одной стороны, их несхожесть для анализируемых деревообрабатывающих предприятий не способствует установлению единых цен и заключению ценовых соглашений; с другой, – невысокая доля постоянных издержек в стоимости товара облегчает возможность маневра ценами в условиях меняющейся рыночной конъюнктуры. В таких случаях угроза войны цен, приводящей к существенным потерям для производителей, стимулирует их на заключение соглашений по поддержанию цен;

– определении однородности продукции у разных поставщиков, видов ее потребления и наличия взаимозаменяемых товаров. Продукция (фанера, ДСП и ДВП) анализируемых производителей является слабодифференцированной. Ее потребительские свойства и качественные характеристики зависят от вида потребления. В настоящее время фанера, ДСП и ДВП имеют взаимозаменяемые товары (твердые древесные плиты – ТДП, ориентированно-стружечные плиты – ОСБ, МДФ и т. п.). Отсутствие в нормативных документах коли-

чественных показателей оценки влияния на вероятность существования ценового сговора однородности и взаимозаменяемости продукции не позволяет сделать однозначный вывод об их влиянии на рассматриваемых рынках. Так, с одной стороны, по однородным товарам другие виды конкуренции, кроме ценовой, затруднены, а с другой – облегчена возможность согласования цен и прочих условий соглашения. В то же время, в случаях, когда товары взаимозаменяемы, ценовой сговор практически не имеет смысла;

– анализе обоснованности завышения или занижения цены в зависимости от товара и рынка. Методика

выявления монопольных цен, являющихся результатом ценового соглашения нескольких хозяйствующих субъектов, содержится в «Инструкции по выявлению монопольных цен» [7] и включает в себя следующие этапы:

а) анализ данных, подтверждающих признаки установления монопольно высоких цен (динамики цен, объемов производства, себестоимости, прибыли от реализации и рентабельности продукции, средней заработной платы, численности работающих), и их сопоставление с «базовым» (среднеотраслевыми значениями и т. п.) уровнем (табл. 5...7).

Табл. 5. Динамика отпускных цен анализируемых предприятий в период с 2006 по 2010 гг.

В рублях

Показатель	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.
<i>Производители фанеры</i>					
Среднее значение	596418	794647	929080	793697	1000430
Стандартное отклонение	53957,2	76360	34949	66276,8	34843
<i>Производители ДСП</i>					
Среднее значение	249106	299120	345417	345438	376104
Стандартное отклонение	14608,8	19845,04	22821,3	27580,1	28782,2
<i>Производители ДВП</i>					
Среднее значение	1341822	1765098	2136846	1826077	2132296
Стандартное отклонение	35116,2	187680,7	244093,6	189376	174278
Примечание – Расчеты авторов на основе данных концерна «Беллесбумпром»					

Табл. 6. Динамика рентабельности производства продукции анализируемых предприятий в период с 2006 по 2010 гг.

В процентах

Показатель	Рынок фанеры					Рынок ДСП					Рынок ДВП				
	Год					Год					Год				
	2006	2007	2008	2009	2010	2006	2007	2008	2009	2010	2006	2007	2008	2009	2010
Среднее значение	-8,0	5,2	-0,5	-16,3	-10,5	0,36	3,28	-0,7	-19,1	-11,6	12,8	17,8	22,3	12,5	12,5
Стандартное отклонение	8,6	10,2	8,8	15,5	10,9	19,2	22,4	19,5	21,4	12,0	21,2	19,3	12,1	11,4	6,45
Примечание – Расчеты авторов на основе данных концерна «Беллесбумпром»															

Табл. 7. Динамика показателей экономической и социальной эффективности деятельности анализируемых предприятий в период с 2006 по 2010 гг.

Показатель	Рынок фанеры					Рынок ДСП					Рынок ДВП				
	Год					Год					Год				
	2006	2007	2008	2009	2010	2006	2007	2008	2009	2010	2006	2007	2008	2009	2010
<i>Темп роста объемов производства товарной продукции в натуральном выражении</i>															
Среднее значение	1,12	1,08	0,95	0,94	1,18	1,08	0,97	1,07	0,64	1,44	1,01	0,93	0,98	0,70	1,77
Стандартное отклонение	0,08	0,31	0,10	0,20	0,25	0,07	0,11	0,12	0,55	0,15	0,05	0,05	0,08	0,06	0,02
<i>Темп роста средней заработной платы работников предприятия</i>															
Среднее значение	1,08	1,10	1,30	0,99	1,25	1,15	1,27	1,13	1,04	1,12	1,16	1,17	1,35	1,08	1,31
Стандартное отклонение	0,06	0,04	0,08	0,11	0,08	0,12	0,09	0,08	0,07	0,15	0,04	0,03	0,08	0,05	0,07
По отрасли	1,09	1,07	1,19	0,91	1,28	1,09	1,07	1,19	0,91	1,28	1,09	1,07	1,19	0,91	1,28
<i>Темп роста численности работников предприятия</i>															
Среднее значение	1,09	1,02	0,98	0,98	1,09	1,01	1,01	1,03	1,01	1,04	1,19	1,09	1,02	1,03	1,16
Стандартное отклонение	0,01	0,02	0,05	0,12	0,23	0,08	0,03	0,08	0,04	0,06	0,01	0,02	0,05	0,13	0,24
По отрасли	1,08	1,01	1,03	0,94	0,98	1,08	1,01	1,03	0,94	0,98	1,08	1,01	1,03	0,94	0,98
Примечание – Расчеты авторов на основе данных концерна «Беллесбумпром»															

Данные, представленные в табл. 5 и 6, показывают, что отклонение отпускных цен производителей фанеры от среднеотраслевых значений в исследуемом периоде составляло от 3,5 до 9,6 %, ДСП – от 5,7 до 8,0 %, ДВП – от 2,6 до 11,4 %; рентабельности производства на рынке фанеры – от 8,6 до 15,5 %, ДСП – от 12,5 до 22,4 %, ДВП – от 6,5 до 21,2 %. Анализируемые предприятия изменяли отпускные цены симметрично и в одинаковом направлении. Для большинства производителей фанеры и ДСП рентабельность производства продукции была отрицательной, а коэффициент вариации рентабельности производства ДВП в анализируемом периоде сократился в 3,6 раза и составил в 2010 г. 6,5 %. В целом, симметричность изменения цен, снижение вариации значений рентабельности производства продукции и выход ее на положительные значения в конце анализируемого периода могут указывать на

существование (возникновение) ценового сговора товаропроизводителей.

В результате анализа темпов роста объемов производства продукции, численности и средней заработной платы работников (см. табл. 7) анализируемых предприятий авторами установлено: наличие на исследуемых товарных рынках в большинстве лет рассматриваемого периода монопольного эффекта в виде повышения цен при одновременном снижении объемов производства: в 2007 г. на рынках ДВП и ДСП; в 2008 г. на рынках фанеры и ДВП; в 2009 г. на рынках фанеры и ДСП; в 2010 г. на рынке ДСП; опережение темпов роста величины прибыли по отрасли над темпами роста прибыли в структуре цены проверяемых товаров; превышение в большинстве лет рассматриваемого периода темпов роста средней заработной платы работников анализируемых предприятий над среднеотраслевыми; отставание темпов рос-

та численности работников от средних по отрасли.

Таким образом, полученные в ходе анализа данных, подтверждающих признаки установления монопольно высоких цен, результаты не позволяют сделать однозначный вывод об отсутствии монополистической деятельности субъектов хозяйствования на исследуемых товарных рынках;

б) определение потенциальных возможностей проверяемого хозяйствующего субъекта по производству монополизируемого товара (величина коэффициента сменности оборудования, загрузка производственных мощностей, наличие запасов товарной продукции на складах и т. п.). Динамика показателей загрузки имеющихся производственных мощностей и темпов роста запасов товарной продукции анализируемых предприятий в период с 2006 по 2010 гг. представлена в табл. 8.

Согласно данным табл. 8, в рассматриваемом периоде загрузка производственных мощностей анализируемых предприятий по выпуску фанеры, ДСП и ДВП сократилась на 22,0; 4,0 и 15,0 % соответственно. При этом запасы готовой продукции производителей фанеры увеличились в среднем на 20,0 %, ДСП – 13,0 %, ДВП – на 9,0 %. Такую ситуацию можно объяснить как наличием антиконкурентного ценообразования производителей, так и изменениями конъюнктуры внешнего и внутреннего рынков, а также государственным регулированием способов торговли. Например, в целях упорядочения экспорта, наращивания объемов реализации и применения рыночных механизмов ценообразования с июня 2007 г. фанера клееная реализуется на экспорт через торги ОАО «Белорусская универсальная товарная биржа».

Табл. 8. Динамика показателей потенциальных возможностей анализируемых предприятий по производству монополизируемого товара в период с 2006 по 2010 гг.

Показатель	Рынок фанеры					Рынок ДСП					Рынок ДВП				
	Год					Год					Год				
	2006	2007	2008	2009	2010	2006	2007	2008	2009	2010	2006	2007	2008	2009	2010
<i>Загрузка производственных мощностей</i>															
Среднее значение	0,90	0,86	0,78	0,63	0,68	0,86	0,81	0,89	0,54	0,82	0,81	0,76	0,79	0,64	0,66
Стандартное отклонение	0,06	0,25	0,08	0,16	0,20	0,08	0,12	0,13	0,61	0,17	0,06	0,06	0,09	0,07	0,02
<i>Темп роста запасов товарной продукции на складах</i>															
Среднее значение	1,35	1,21	1,09	1,63	1,55	1,26	1,28	0,84	1,35	1,39	1,26	1,24	1,19	1,39	1,33
Стандартное отклонение	0,39	0,13	0,25	0,31	0,10	0,14	0,19	0,69	0,09	0,15	0,06	0,10	0,06	0,03	0,08
Примечание – Расчеты авторов на основе данных концерна «Беллесбумпром»															

За 2007 г. на биржевых торгах было реализовано на экспорт 56,3 тыс. м<sup>3</sup> фанеры на общую сумму 21,9 млн евро. В 2007 г. на мировом рынке произошел существенно возросли цены по большинству позиций фанеры клееной, что

нашло отражение на итогах биржевых торгов – увеличились как объемы реализации, так и стартовые цены на фанеру, выставяемые на биржевые торги, и, соответственно, биржевые котировки. В 2008 г. на экспортных биржевых торгах

фанерой произошло снижение котировок и объемов реализации фанеры. Это привело к увеличению складских запасов у производителей (запасы фанеры некоторых предприятий концерна «Беллесбумпром» выросли в десятки раз). Удельный вес запасов фанеры в среднемесечном объеме производства на январь 2009 г. составлял 163 %. По состоянию на август 2009 г. по итогам состоявшихся торгов на ОАО «Белорусская универсальная товарная биржа» при выставленных на реализацию общих объемах фанеры клееной организациями концерна в размере 782,8 тыс. м<sup>3</sup>, реализация составила 1,04 тыс. м<sup>3</sup> или менее 1,0 % от выставленного объема.

Таким образом, апробация методики выявления монопольных цен не позволяет сделать однозначный вывод о наличии либо отсутствии ценового сговора товаропроизводителей, в том числе и по той причине, что методика не адаптирована для случаев выявления монопольных цен, являющихся следствием ценовых соглашений или согласованных действий производителей. Так, она не учитывает тот факт, что в условиях ценового сговора цены производителей будут отличаться незначительно. По этой причине сопоставление их со среднеотраслевыми является некорректным. Кроме того, часть методики (сравнение цен и рентабельности продукции исследуемых предприятий с базовыми или конкурентными) апробирована быть не может по причине невозможности получения информации о значениях баз сравнения.

3. Установление способности кого-либо из участников соглашения в отдельности или всех вместе путем согласованных действий ограничивать конкуренцию. Исследование влияния ценового сговора на конкуренцию авторами не осуществлялось, во-первых, по причине отсутствия в нормативных документах количественных показателей оценки; во-вторых, в связи с тем, что в антимонопольном законодательстве це-

новые соглашения являются запрещенными «per se».

### **Заключение**

Таким образом, проведенная авторами апробация действующей методической базы антимонопольного законодательства Беларуси в области выявления, пресечения и предотвращения горизонтального ценового сговора товаропроизводителей позволяет сделать следующие выводы.

1. Установлено, что представленные в нормативных документах методики выявления антиконкурентных соглашений (согласованных действий) о ценах не дают возможности сделать однозначный вывод о наличии либо отсутствии ценового сговора товаропроизводителей.

2. Определены основные причины недостаточной эффективности действующей методической базы антимонопольного законодательства Беларуси в области выявления и предупреждения ценового сговора товаропроизводителей, заключающиеся в:

– сосредоточенности антимонопольного законодательства на субъектах хозяйствования, занимающих доминирующее положение на товарных рынках, и неадаптированности применяемых методик для случаев выявления монопольных цен, являющихся следствием ценовых соглашений или согласованных действий товаропроизводителей;

– трудоемкости (а часто и невозможности) сбора исходных данных (необходимость при выявлении монопольных цен сопоставлять цену исследуемого субъекта хозяйствования с ценой, которая сложилась бы на конкурентном рынке и т. п.);

– определении факта наличия ценового сговора на основе анализа уровня цен и их структуры (выявление монопольных цен, установление пределов их изменения и др.);

– отсутствии количественных показателей экономической неэф-

фактивности ценового сговора товаро-производителей для общества и государства;

– неполном перечне, а также в отсутствии количественных показателей оценки величины оговоренных в законодательстве факторов, позволяющих определить предрасположенность товарных рынков к возникновению ценового сговора.

3. Определены основные направления совершенствования методической базы антимонопольного законодательства Беларуси в области выявления и предупреждения ценового сговора товаропроизводителей, состоящие в:

– инициации выявления ценового сговора не на основе анализа рыночных долей субъектов хозяйствования, а по результатам определения величины их рыночной власти (способности устанавливать цену, существенно превышающую предельные издержки), наличие которой может быть следствием существования на товарном рынке явного или молчаливого сговора субъектов хозяйствования на основе, например, расчета индекса Лернера [8];

– выявлении сговора на основе анализа не уровня отпускных цен субъектов хозяйствования, а динамики и синхронности их изменения во времени всеми участниками на исследуемом товарном рынке. Новизна предлагаемого подхода заключается в установлении синхронности изменения цен товаропроизводителями путем определения статистического совпадения дат принятия ими ценовых решений, оценки статистического равенства частот изменения цен, установления ценового лидерства на рынке;

– пресечении ценового сговора не по факту его наличия, а на основе количественного определения соотношения величины потерь общест-

венного благосостояния в краткосрочном периоде (вследствие аллокативной и технологической неэффективности отрасли) и выигрыша общества в долгосрочном периоде (вследствие роста динамической эффективности отрасли) с учетом затрат на антимонопольное администрирование [9]. Это позволит антимонопольным органам обоснованно принимать решения о необходимости пресечения ценовых соглашений (согласованных действий) на товарных рынках, а также повысить инновационную активность (а следовательно, и динамическую эффективность) отраслей национальной экономики;

– разработке методики определения предрасположенности товарных рынков к возникновению ценового сговора, заключающейся в установлении исчерпывающего перечня факторов возникновения и устойчивости ценовых соглашений, а также показателей оценки их величины; разработке формул расчета пороговых значений ставки дисконтирования как функций количества участников ценового соглашения, наименьшей доли рынка в отрасли, вероятности входа на рынок нового производителя, длительности периода ожидания согласования действий участников соглашения и частоты корректировки ими отпускных цен, вероятности появления в отрасли продуктовой инновации и обнаружения факта нарушения соглашения его участниками, отношения индексов Лернера для участников соглашения, коэффициента использования ими располагаемых производственных мощностей, коэффициента избыточности производственных мощностей в отрасли, ценового дифференциала между продукцией участников соглашения, темпа роста и величины колебаний спроса [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Об утверждении Инструкции по выявлению и пресечению антиконкурентных соглашений (согласованных действий) о ценах: Постановление М-ва предпринимательства и инвестиций Респ. Беларусь, 28 апр. 2000 г., № 9 // Нац. правовой интернет-портал Респ. Беларусь [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа : <http://www.pravo.by/main.aspx?guid=3871&p0=W20003470&p2={NRPA}>. – Дата доступа : 22.08.2011.
2. Tacit vs Explicit : почему производители выбирают явный стговор? / В. И. Тарасов [и др.] // Вестн. Белорус. гос. ун-та. Сер. 3. История. Экономика. Право. – 2012. – № 2. – С. 61–67.
3. Об утверждении Инструкции по определению доминирующего положения хозяйствующих субъектов на товарных рынках Республики Беларусь : Постановление М-ва предпринимательства и инвестиций Респ. Беларусь, 17 окт. 2002 г., № 229 // Нац. правовой интернет-портал Респ. Беларусь [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа : <http://www.pravo.by/main.aspx?guid=3871&p0=W20208695&p2={NRPA}>. – Дата доступа : 22.08.2011.
4. Промышленность Республики Беларусь : стат. сб. – Минск : Нац. стат. ком. Респ. Беларусь, 2011. – 273 с.
5. Таможенная статистика внешней торговли Республики Беларусь : бюл. за январь–декабрь 2010 г. – Минск: Гос. таможенный ком. Респ. Беларусь, 2011. – 235 с.
6. **Ивановская, И. В.** Специфика отрасли и ценовые соглашения (моделирование их вероятности и устойчивости) / И. В. Ивановская, Н. П. Драгун // Общество и экономика. – 2011. – № 8–9. – С. 194–215.
7. Об утверждении Инструкции по выявлению монопольных цен : Постановление М-ва предпринимательства и инвестиций Респ. Беларусь, 28 апр. 2000 г., № 10 // Нац. правовой интернет-портал Респ. Беларусь [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа : <http://www.pravo.by/main.aspx?guid=3871&p0=20003471&p2={NRPA}>. – Дата доступа : 22.08.2011.
8. **Ивановская, И. В.** Определение согласованности действий предприятий в процессе установления отпускных цен / И. В. Ивановская, Н. П. Драгун // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. D. Экономические и юридические науки. – 2012. – № 6. – С. 7–16.
9. **Ивановская, И. В.** Возникновение и предупреждение ценовых соглашений товаропроизводителей на рынке / И. В. Ивановская, Н. П. Драгун // Белорус. экон. журнал. – 2012. – № 2. – С. 107–121.

*Статья сдана в редакцию 1 октября 2012 года*

**Ирина Викторовна Ивановская**, аспирант, Белорусский государственный экономический университет. Тел.: +375-445-45-91-45. E-mail: [ivanovskayaiv@gmail.com](mailto:ivanovskayaiv@gmail.com).

**Николай Петрович Драгун**, канд. экон. наук, доц., Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого. Тел.: 8-0232-42-38-26. E-mail: [DragunNP@gmail.com](mailto:DragunNP@gmail.com).

**Irina Viktorovna Ivanovskaya**, PhD student, Belarusian State University of Economics. Tel.: +375-445-45-91-45. E-mail: [ivanovskayaiv@gmail.com](mailto:ivanovskayaiv@gmail.com).

**Nikolai Petrovich Dragun**, PhD (Economics), Associate Prof., P. O. Sukhoi Gomel State Technical University. Tel.: 8-0232-42-38-26. E-mail: [DragunNP@gmail.com](mailto:DragunNP@gmail.com).

---

---

УДК 338.48-31:338.27+005.52

*М. С. Шмарков, Л. И. Шмаркова*

**АНАЛИЗ ЭВОЛЮЦИИ СЕЗОННЫХ КОЛЕБАНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ТУРИСТСКИХ ФИРМ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИХ РАЗВИТИЯ**

---

UDC 338.48-31:338.27+005.52

*M. S. Shmarkov, L. I. Shmarkova*

**THE ANALYSIS OF EVOLUTION OF SEASONAL FLUCTUATIONS OF CHARACTERISTICS OF TOURISM COMPANIES ACTIVITY AND FORECASTING OF THEIR DEVELOPMENT**

---

**Аннотация**

Предлагается методика анализа и прогнозирования тенденций развития показателей деятельности туристских фирм с ярко выраженной сезонной компонентой. Разработанная методика апробирована при анализе показателя прибыли ООО «ТурЭксперт», г. Орел, и принятии управленческих решений.

**Ключевые слова:**

сезонность, анализ, прогнозирование, конкурентоспособность, тренд.

**Abstract**

The technique of analysing and forecasting the tendencies of the development of tourist firms activities with a strongly pronounced seasonal component is offered. The developed procedure has been tested while analysing the profit of ООО «Tour Expert», based in Orel, and making managerial decisions.

**Key words:**

seasonal prevalence, analysis, forecasting, competitiveness, trend.

---

***Введение***

Конкурентоспособность туристского предприятия обеспечивается тщательностью формирования туристского продукта, потребление которого имеет ярко выраженный сезонный характер, что влечет необходимость дифференциации маркетинговых мероприятий соответственно тенденциям сезонного изменения спроса на туристские услуги. Основными элементами проектирования конкурентной стратегии предприятия туризма являются постоянный мониторинг и анализ тенденций развития показателей деятельности туристского рынка и самого предприятия, важной и отличительной характеристикой которых является сезонный характер их изме-

нений.

***Основная часть***

Сезонность в туристской деятельности связана со сменой природно-климатических условий, занятостью населения, экономическими особенностями предоставления и потребления турпродукта, иными нюансами сферы деятельности.

Главным туристским сезоном принято считать период максимальной интенсивности в турпотоке. Сезон – период времени, в течение которого совершается основная масса туристских путешествий [1]. В частности, могут наблюдаться один или несколько туристских сезонов, а для отдельных характеристик деятельности в сфере туризма – различные сезонные

колебания по времени. Известно, например, что в большинстве стран на период сезона приходится 70 % всех поездок за границу.

Под сезонными колебаниями следует понимать регулярные, периодические наступления внутригодовых подъемов и спадов характеристик деятельности турфирмы, а под сезонностью – ограниченность периода работ.

В каких бы формах ни проявлялась сезонность, в любом случае ее действие отрицательно сказывается на результатах деятельности туристского предприятия и отрасли в целом. Влияние сезонности обуславливает неравномерность использования ресурсов, и это проявляется в аритмии производственных и других процессов.

Не во всех случаях сезонность является следствием действия неуправляемых факторов. Значительные сезонные колебания характерны для невысокого уровня развития туристского предложения. Внедрение инновационных форм обслуживания способствует сглаживанию, а в некоторых случаях и преодолению сезонной неравномерности в разработке и реализации турпродукта. Даже в тех случаях, когда прямое воздействие на процессы, вызывающие сезонные колебания, невозможно, необходимо учитывать их действие при совершенствовании технологических, организационно-экономических процессов, процессов управления организационными изменениями.

Актуальность проблемы удлинения главного туристского сезона и выравнивания сезонных колебаний конкретных показателей туристской деятельности очевидна. Решение этой проблемы обеспечит более полную занятость населения, повышение уровня использования основных фондов отрасли, рациональное использование природных ресурсов, уменьшение зависимости спроса на туруслуги от сезонных колебаний и, как результат, повышение прибыли туристских предприятий.

Объективная необходимость анализа и учета сезонных колебаний существенно усложняет решение конкретных экономических задач. Чтобы управлять эволюцией тенденций сезонных экономических процессов, необходимо уметь измерять, анализировать и предвидеть их развитие.

Если процесс подвержен периодическим колебаниям, имеющим постоянный период, например, равный годовому промежутку, то речь идет о тренд-сезонном временном ряде [2], показатели которого формируются под влиянием трех составляющих: тренда  $U_t$ , сезонной  $S_t$  и остаточной (случайной)  $\varepsilon_t$  компонент. От вида их взаимосвязи временной ряд может быть описан аддитивной моделью, т. е. представлен в виде суммы указанных компонент

$$Y_t = U_t + S_t + \varepsilon_t \quad (t = \overline{1, T}), \quad (1)$$

или мультипликативной моделью, т. е. представлен в виде произведения указанных компонент

$$Y_t = U_t \cdot S_t \cdot \varepsilon_t \quad (t = \overline{1, T}),$$

где  $Y_t$  – уровни временного ряда;  $T$  – число уровней наблюдения.

При построении аддитивной модели составляющие сезонноизменяющегося экономического показателя измеряются в абсолютных величинах, при построении мультипликативной модели – в относительных величинах.

Изучение тренд-сезонных временных рядов представляет собой сложное исследование, требующее использования современных методов статистического анализа и формирования на его основе квалифицированного обоснованного прогноза. При этом необходимо:

- выявить наличие тренда во временном ряду;
- выявить наличие во временном ряду сезонных колебаний;
- отфильтровать составляющие временного ряда;

- провести анализ динамики сезонной волны;
- исследовать факторы, определяющие сезонные колебания;
- при необходимости построить прогноз.

Часто полагают, что сезонная волна не изменяется год от года. Для большинства характеристик деятельности турфирм, подверженным сезонным колебаниям, это предположение неверно, т. к. со временем изменяется как форма, так и размах их волны. Возникает необходимость анализа эволюции сезонной волны, который должен включать решение трех взаимосвязанных задач:

- 1) анализ динамики амплитуды сезонной волны в каждом периоде;
- 2) анализ динамики точек экстремума сезонной волны;
- 3) исследование изменений формы сезонной волны.

Большинство методов фильтрации построено таким образом, что предварительно выделяют тренд, а затем – сезонную компоненту. Тренд в чистом виде необходим и для анализа динамики сезонной волны.

Традиционные достаточно простые способы измерения сезонных колебаний: метод абсолютных разностей; метод относительных разностей; построение индексов сезонности. Первые два способа предполагают нахождение разностей фактических уровней ряда и уровней, найденных при выявлении основной тенденции развития. Метод абсолютных разностей оперирует непосредственно размерами этих разностей, а метод относительных разностей – отношением абсолютных разностей к уровню ряда. Метод относительных разностей является развитием метода абсолютных разностей.

В реализации метода абсолютных или относительных разностей следует учитывать, что сезонные колебания конкретного экономического показателя могут отличаться для отдельных соот-

ветствующих периодов и смешиваться со случайными колебаниями. Чтобы элиминировать случайные колебания, необходимо рассматривать средние отклонения за несколько лет.

Поиск оптимального выражения трендовой составляющей и ее математическое описание являются наиболее ответственными моментами изучения тренд-сезонного процесса. При выявлении основной тенденции используют либо метод скользящей средней, либо метод аналитического выравнивания [3]. Для определения скользящей средней формируют укрупненные интервалы, состоящие из одинакового числа уровней. Каждый последующий интервал получают, постепенно сдвигаясь от начального уровня предыдущего интервала на один уровень, т. е. интервал сглаживания как бы скользит по динамическому ряду с единичным шагом. По сформированным укрупненным интервалам рассчитывают сумму значений уровней, а на ее основе – скользящую среднюю, которая относится к середине указанного интервала. Чем продолжительнее интервал сглаживания, тем сильнее усреднение, и выявляемая тенденция становится более гладкой.

Достоинство скользящих средних в том, что они легко вычисляются, интерпретируются, позволяют сглаживать как случайные, так и периодические колебания и выявлять имеющуюся тенденцию в развитии исследуемого процесса. Существенным недостатком этого метода является то, что он не позволяет выразить общую тенденцию изменения показателя в виде математической модели и поэтому не может быть использован для прогнозирования. Изучение тенденции развития методом скользящей средней – лишь эмпирический прием предварительного анализа временного ряда.

С целью получения количественной модели, описывающей общую тенденцию изменений уровней ряда во времени, необходимо использовать аналитическое

выравнивание ряда. В этом случае фактические уровни ряда заменяются уровнями, рассчитанными по аналитической модели, выбор оптимальной формы которой во многом определяет результат экстраполяции тренда.

При выборе формы аналитической модели следует учитывать содержательный анализ сущности изучаемого экономического показателя. Для этого нужно обратиться к анализу графического изображения эмпирических данных уровней динамического ряда. Однако и в этом случае не всегда удается однозначно определиться с выбором вида модели, поэтому целесообразно воспользоваться анализом графического изображения сглаженных уровней ряда, в которых случайные колебания в определенной степени погашены.

Индексы сезонности могут быть рассчитаны как отношение конкретного фактического уровня ряда к уровню, рассчитанному по методу скользящей средней или же определенному уровню тренда. Очевидно, что они имеют различные значения для разных уровней ряда и зависят от способа выравнивания. Сопоставление значений индексов сезонности позволяет проанализировать тенденцию изменчивости сезонных колебаний показателя.

Таким образом, при изучении временных рядов показателей характеристик деятельности турфирм оптимальным представляется подход, состоящий в аналитическом выравнивании предварительно сглаженного с помощью

скользящих средних временного ряда и последующей оценке влияния сезонной и остаточной компонент.

В работе предложенная методика апробирована при анализе сезонных колебаний показателя прибыли ООО «ТурЭксперт» (г. Орел), в качестве которого взято отношение ежемесячной прибыли к ее среднегодовому значению.

Имеются временные ряды показателя прибыли в период с апреля 2009 г. по март 2012 г. (табл. 1).

На рис. 1 приведены зависимости показателя прибыли времени соответственно по годам (2009...2011 гг.). Длительная развертка протяженностью в трехлетний период (2009...2011 гг.) представлена на рис. 2.

На графике отчетливо прослеживаются сезонные колебания показателя прибыли с периодом, равным одному году. Устойчивые сезонные пики максимального спроса отмечаются в июле, а уменьшение прибыли – в период с ноября по март. Помесячное сравнение показателя прибыли за трехлетний период выявило факт роста показателя от года к году.

Таким образом, предполагается наличие тренд-сезонного временного ряда, характер которого отражает аддитивная модель (1).

Ставится задача выделения компонент временного ряда  $Y_t$  показателя прибыли.

Табл. 1. Временные ряды показателя прибыли

Год	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
2009	0	0	0	0,36	0,95	1,97	2,52	2,23	1,53	1,21	0,9	0,35
2010	0,19	0,29	1,97	2,46	3,66	5,08	5,65	4,98	4,37	2,66	2,32	1,04
2011	2,42	3,36	3,7	4,16	5,03	6,09	7,3	7,09	6,1	5,91	3,73	2,74

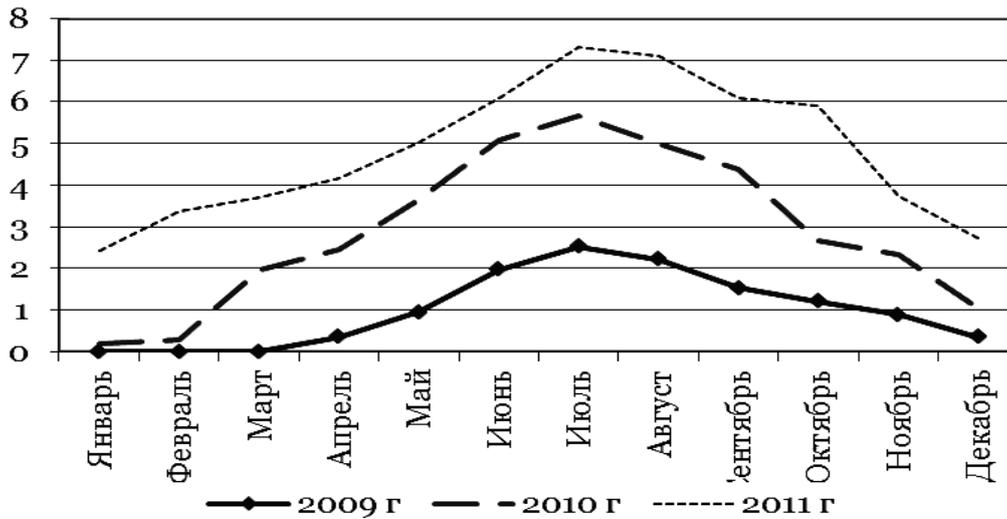


Рис. 1. Распределение показателя прибыли в течение года

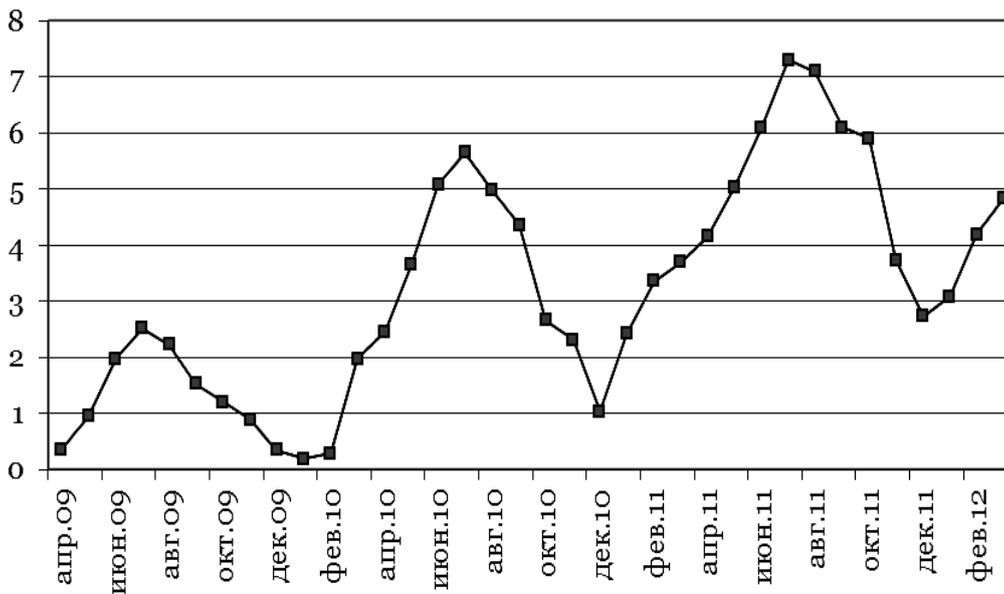


Рис 2. Распределение прибыли за трехлетний период (2009...2011 гг.)

Предварительное исследование характера общей тенденции проводится методом скользящих средних [4] на основе 12-численной скользящей средней, рассчитываемой по формуле

$$p_t = \frac{p_{t-6} + p_{t-5} + \dots + p_t + \dots + p_{t+5} + \frac{p_{t+6}}{2}}{12}, \quad (2)$$

т. к. длина интервала сглаживания должна быть кратна периоду колебаний, который для исследуемого показателя прибыли равен 12 месяцам.

Формула (2) позволяет рассчитать сглаженные уровни ряда за исключением шести первых и шести последних уровней. Для восстановления крайних уровней ряда используется следующая процедура [4]: предварительно рассчитаем

средний абсолютный прирост на первом (последнем) активном участке, затем определим шесть сглаженных значений в начале (конце) временного ряда путем последовательного вычитания (прибав-

ления) среднего абсолютного прироста от первого (к последнему) сглаженного значения. Аналитические расчеты приведены в табл. 2 и проиллюстрированы на рис. 3.

Табл. 2. Расчетная таблица

Год	Месяц	Временной параметр $t$	Фактический уровень ряда $Y_t$	Скользящая средняя $P_t$	Трендовая компонента $U_{tmp}$	Отклонение фактических уровней ряда от уровня тренда $Y_t - U_t$	Предварительная оценка сезонной компоненты $SE_t$	Сезонная компонента $S_t$	Остаточная компонента $\epsilon_t$
2009	Апрель	1	0,36	0,41	0,21	0,15	-0,05	-0,04	0,19
	Май	2	0,95	0,56	0,43	0,52	0,66	0,68	-0,15
	Июнь	3	1,97	0,70	0,64	1,33	1,67	1,68	-0,35
	Июль	4	2,52	0,85	0,85	1,66	2,28	2,29	-0,62
	Август	5	2,23	1,00	1,06	1,17	1,73	1,74	-0,57
	Сентябрь	6	1,53	1,14	1,26	0,26	0,81	0,82	-0,55
	Октябрь	7	1,21	1,29	1,46	-0,25	-0,08	-0,07	-0,18
	Ноябрь	8	0,90	1,49	1,66	-0,76	-1,18	-1,16	0,40
2010	Декабрь	9	0,35	1,73	1,85	-1,50	-2,26	-2,25	0,75
	Январь	10	0,19	1,99	2,03	-1,85	-1,88	-1,87	0,02
	Февраль	11	0,29	2,24	2,22	-1,93	-1,29	-1,28	-0,65
	Март	12	1,97	2,47	2,40	-0,42	-0,54	-0,53	0,10
	Апрель	13	2,46	2,65	2,57	-0,11	-0,05	-0,04	-0,07
	Май	14	3,66	2,77	2,74	0,92	0,66	0,68	0,24
	Июнь	15	5,08	2,86	2,91	2,17	1,67	1,68	0,50
	Июль	16	5,65	2,98	3,07	2,58	2,28	2,29	0,29
	Август	17	4,98	3,20	3,23	1,75	1,73	1,74	0,01
	Сентябрь	18	4,37	3,40	3,38	0,98	0,81	0,82	0,16
	Октябрь	19	2,66	3,55	3,54	-0,87	-0,08	-0,07	-0,80
	Ноябрь	20	2,32	3,67	3,68	-1,36	-1,18	-1,16	-0,20
2011	Декабрь	21	1,04	3,77	3,82	-2,78	-2,26	-2,25	-0,54
	Январь	22	2,42	3,88	3,96	-1,55	-1,88	-1,87	0,32
	Февраль	23	3,36	4,04	4,10	-0,74	-1,29	-1,28	0,55
	Март	24	3,70	4,20	4,23	-0,53	-0,54	-0,53	-0,01
	Апрель	25	4,16	4,41	4,36	-0,20	-0,05	-0,04	-0,16
	Май	26	5,03	4,60	4,48	0,55	0,66	0,68	-0,12
	Июнь	27	6,09	4,73	4,60	1,50	1,67	1,68	-0,18
	Июль	28	7,30	4,83	4,71	2,59	2,28	2,29	0,30
	Август	29	7,09	4,89	4,82	2,27	1,73	1,74	0,53
	Сентябрь	30	6,10	4,97	4,93	1,17	0,81	0,82	0,36
	Октябрь	31	5,91	5,04	5,03	0,88	-0,08	-0,07	0,95
	Ноябрь	32	3,73	5,10	5,13	-1,40	-1,18	-1,16	-0,24
2012	Декабрь	33	2,74	5,16	5,23	-2,49	-2,26	-2,25	-0,24
	Январь	34	3,08	5,22	5,32	-2,23	-1,88	-1,87	-0,37
	Февраль	35	4,19	5,28	5,40	-1,21	-1,29	-1,28	0,07
	Март	36	4,83	5,34	5,49	-0,66	-0,54	-0,53	-0,13

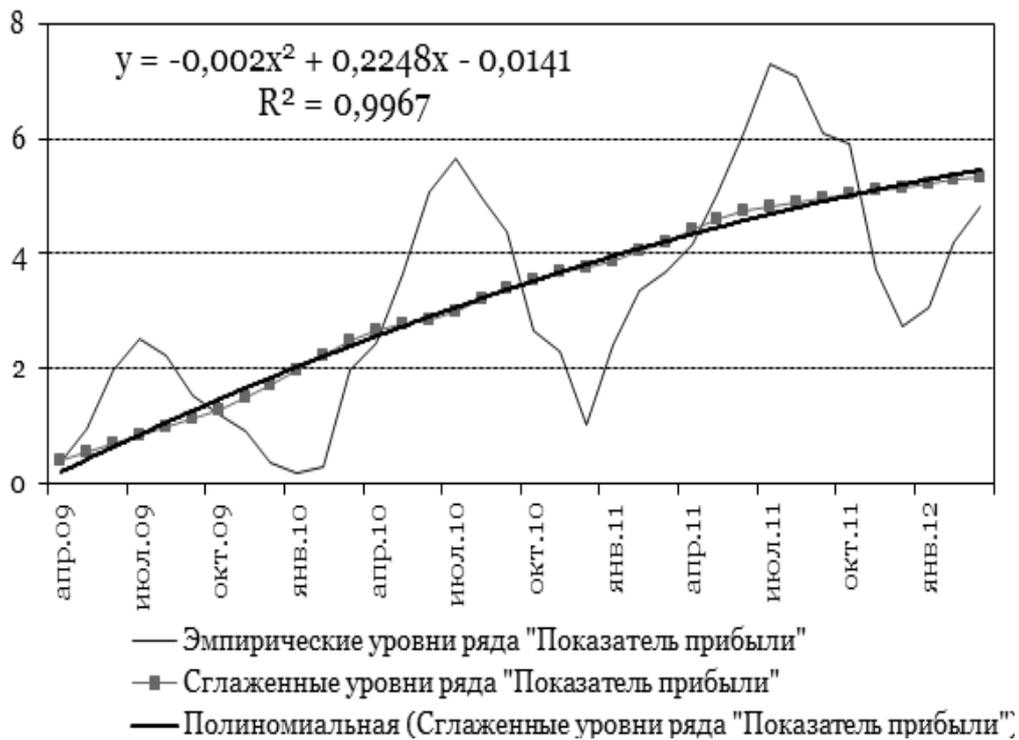


Рис. 3. Уровни ряда показателя прибыли

Трендовая модель сглаженного ряда получена в среде Excel и описывается уравнением

$$U_t = -0,002x^2 + 0,2248x - 0,0141.$$

Полиномиальная модель второго порядка (см. рис. 3) достаточно достоверно описывает сглаженный ряд показателя, о чем свидетельствует высокое значение коэффициента детерминации  $R^2 = 0,9967$ .

Наличие аналитической модели тренда  $U_t$  позволяет отфильтровать сезонную составляющую исследуемого ряда. Расчет сезонной компоненты  $S_t$  проводится на основе алгоритма. Для оценки совокупного влияния эффекта сезонности и случайности вычисляются отклонения фактически сложившихся уровней ряда показателя прибыли  $Y_t$  от уровней трендовой модели  $U_t$ .

Для элиминирования влияния случайных факторов находят предварительные оценки сезонной составляющей  $SE_t$  путем усреднения значений отклонений  $(Y_t - U_t)$  для одноименных месяцев.

Далее необходимо произвести корректировку первоначальных значений сезонной составляющей, т. к. суммарное воздействие сезонности на динамику показателей исследуемого ряда должно быть нейтральным. Для аддитивной модели сумма значений сезонной составляющей для полного сезонного цикла должна быть равна нулю. Скорректированные оценки сезонной компоненты рассчитываются по формуле

$$S_t = SE_t - \bar{S},$$

где  $\bar{S} = \frac{\sum_{t=1}^{12} SE_t}{12}$ ; в рассматриваемом случае  $\bar{S} = -0,011$ .

Полученные оценки сезонной составляющей  $S_t$  графически представлены на рис. 4.

Построенная модель тренда ряда показателя прибыли позволяет сделать вывод о наличии возрастающей тенденции с монотонно убывающей скоростью, что свидетельствует о том, что

фирма ООО «ТурЭксперт» устойчиво развивается и выходит на стабильный уровень указанного показателя прибыли при наличии свойства сезонности этого показателя. Тренд ряда показателя прибыли является монотонно возрастающим.

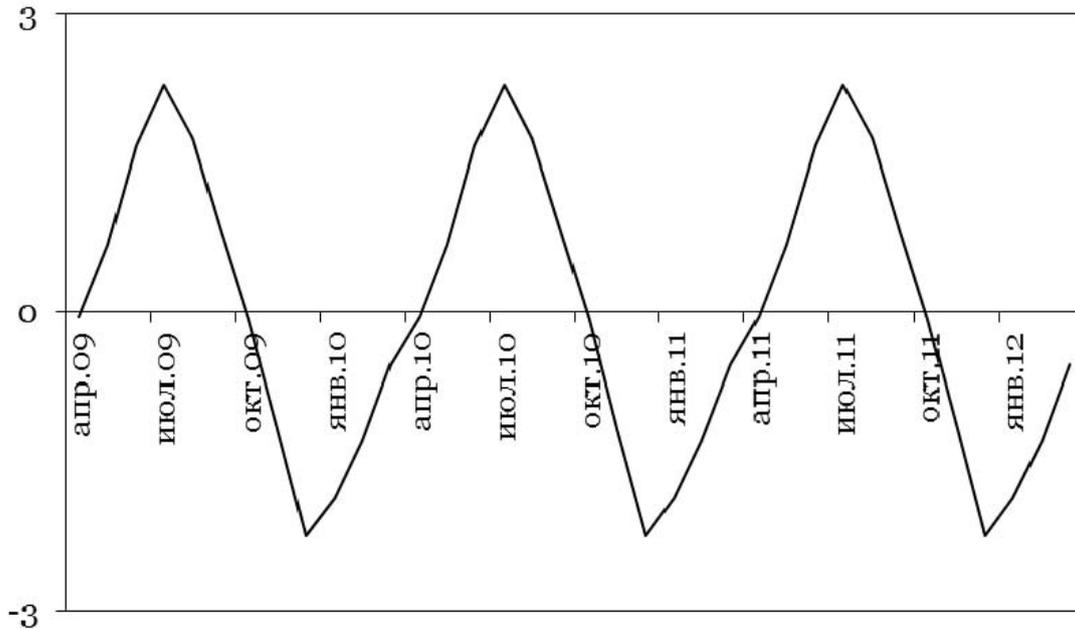


Рис. 4. Сезонная составляющая  $S_t$  ряда показателя прибыли

### Выводы

Анализ эволюции сезонной волны показателя прибыли позволяет сделать вывод о наличии устойчивых пиков с центром в июле. В то же время наблюдается недопустимо длительный устойчивый «мертвый сезон», практически занимающий три четверти годового цикла. Очевидно, этот факт обусловлен влиянием объективных обстоятельств, характерных для туристского рынка, в частности, влиянием сложившихся временных стереотипов, связанных с предпочтениями туристов проводить отпуск в летнее время года.

Исследование эволюции формы сезонной волны на основе построенной модели позволяет разработать целенаправленные меры по ликвидации или смягчению сезонных колебаний, грамотно скоординировать стратегическую деятельность турфирмы по привлечению новых клиентов с учетом новых тенденций развития мировой индустрии туризма.

Аналогичным образом по предложенной методике могут быть изучены тенденции развития и других важных показателей деятельности туристской фирмы, которые имеют сезонный характер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Глинский, В. В.** Статистический анализ / В. В. Глинский, В. Г. Ионин. – М. : Филинь, 1998.
2. **Дуброва, Т. А.** Статистические методы прогнозирования / Т. А. Дуброва. – М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2003.
3. **Чудновский, А. Д.** Управление индустрией туризма : учеб. пособие / А. Д. Чудновский, М. А. Жукова, В. С. Сенин. – М. : КНОРУС, 2004.
4. **Экономико-математические методы и прикладные модели** : учеб. пособие / В. В. Федосеев [и др.] ; под ред. В. В. Федосеева. – М. : ЮНИТИ, 2001.

*Статья сдана в редакцию 8 октября 2012 года*

**Михаил Сергеевич Шмарков**, аспирант, Орловский государственный институт экономики и торговли.  
**Лариса Ивановна Шмаркова**, доц., Орловский государственный институт экономики и торговли.  
Тел.: +375-107-90-38-80-02-88. E-mail: [turexpert888@mail.ru](mailto:turexpert888@mail.ru).

**Mikhail Sergeevich Shmarkov**, PhD student, Orel State Institute of Economics and Trade.  
**Larisa Ivanovna Shmarkova**, Associate Prof., Orel State Institute of Economics and Trade.  
Tel.: +375-107-90-38-80-02-88. E-mail: [turexpert888@mail.ru](mailto:turexpert888@mail.ru).

# **ВЕСТНИК БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**№ 4 – 2012**

Ответственный за выпуск	В. И. Кошелева
Художественное оформление обложки	И. А. Алексеюс
Дизайн и компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать 20.11.2012. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл.-печ. л. 17,9. Уч.-изд. л. 15,0. Тираж 100 экз. Заказ № 776.

Издатель и полиграфическое исполнение  
Государственное учреждение высшего профессионального образования  
«Белорусско-Российский университет»  
ЛИ № 02330/0548519 от 16.06.2009.  
Пр. Мира, 43, 212000, Могилев.