

УДК 539.4.01:004.42

## РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММ ДЛЯ УПРОЩЁННОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЁТА НА ПРОЧНОСТЬ ДВУТАВРОВЫХ БАЛОК

Ю.С. Холодняк<sup>1</sup>, А.А. Костиков<sup>2</sup>, С.В. Капорович<sup>3</sup>

<sup>1</sup> к.т.н., доцент, зав. кафедрой технической механики, e-mail: [holodhjak.yuri@gmail.com](mailto:holodhjak.yuri@gmail.com)

<sup>2</sup>к.ф.-м.н., доцент кафедры автоматизации производственных процессов, e-mail: [alexkst63@gmail.com](mailto:alexkst63@gmail.com)

<sup>3</sup> к.т.н., ст.преподаватель кафедры технической механики, e-mail: [kaporovych@gmail.com](mailto:kaporovych@gmail.com)

<sup>1, 2, 3</sup> Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск, Украина

**Аннотация.** Созданы в системе Mathcad программы расчётов на прочность статически определимых двутавровых балок. Компьютер изображает эпюры внутренних усилий, устанавливает минимальный номер двутавра, удовлетворяющий условиям прочности. Выполненные разработки рекомендованы студентам и производственным специалистам для использования в учебных целях и инженерной практике.

*Ключевые слова:* двутавровые балки, расчёты на прочность, упрощённая методика, сквозные компьютерные программы, примеры расчетов.

## SOFTWARE DEVELOPMENT FOR SIMPLIFIED METHODS OF CALCULATING THE STRENGTH OF I-BEAMS

Yuri Kholodniak<sup>1</sup>, Alexander Kostikov<sup>2</sup>, Svitlana Kaporovych<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ph.D., Associate Professor, Head of Technical Mechanics Department, e-mail: [holodhjak.juri@gmail.com](mailto:holodhjak.juri@gmail.com)

<sup>2</sup>Ph.D., Associate Professor of Manufacturing Processes and Automation Engineering Department, e-mail: [alexkst63@gmail.com](mailto:alexkst63@gmail.com)

<sup>3</sup>Ph.D., Senior Lecturer of Technical Mechanics Department, e-mail: [kaporovych@gmail.com](mailto:kaporovych@gmail.com)

<sup>1,2,3</sup> Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, Ukraine

**Abstract.** Programs for calculating the strength of statically definable I-beams were created in the Mathcad system. The computer plots internal forces and sets the minimum I-beam number that meets the strength conditions. The completed developments are recommended to students and production specialists for use in educational purposes and engineering practice.

*Keywords:* plane trusses, forced oscillations, mathematical model, resonant frequencies, power calculations.

**Введение.** В нынешнюю эпоху стремительного развития техники особое значение приобретает подготовка ВУЗами высокообразованных специ-

алистов, владеющих солидным комплексом теоретических знаний и практических навыков, которые необходимы для создания всё более сложных образцов новой техники. Важную роль в этом призвано сыграть совершенствование базовых дисциплин инженерной подготовки, наполнение их новыми знаниями, углубляющими существующие теоретические представления.

Одними из основных в курсе сопротивления материалов, который закладывает фундамент инженерных расчётов, являются вопросы прочности массово используемых в машиностроении, строительстве и ряде других отраслей промышленности конструктивных элементов стержневой формы, работающих в условиях плоского изгиба и именующихся балками.

Балки могут иметь различные формы поперечных сечений, однако наиболее распространёнными среди них являются балки двутаврового профиля (рис. 1), так как они сочетают в себе экономические преимущества с удобствами монтажа и эксплуатации.

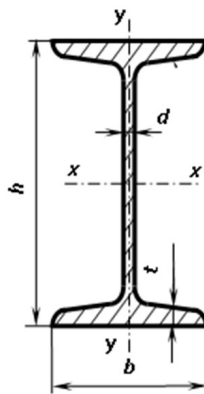


Рисунок 1 – Двутавровый профиль (по ГОСТ 8239-89)

Считается общепризнанным [1-5 и др.], что для обеспечения надёжной эксплуатации балки должны соблюдаться условия её прочности по нормальным (1), касательным (2) и эквивалентным (3) напряжениям:

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma]; \quad (1)$$

$$\tau_{\max} \leq [\tau]; \quad (2)$$

$$\sigma_{\max}^{\text{ЭКВ.}} \leq [\sigma], \quad (3)$$

где  $[\sigma]$  и  $[\tau]$  – соответственно допускаемые нормальные и касательные напряжения.

При традиционном ("ручном") расчёте полная проверка прочности балки по условиям (1)-(3) достаточно сложна и малопродуктивна, так как

предполагает выполнение ряда графических построений и вычислений, требующих соответствующей квалификации и немалых затрат времени [6,7]. Что же касается большого количества изложенных в сети Интернет компьютерных средств для такого расчета (ABAGUS, ANSUS, COSMOSWorks и др.), то они, как правило, являются достаточно сложными для применения и слишком дорогими, а потому недоступны широкому кругу пользователей.

В ранее опубликованных работах [8,9] на основе фундаментальных теоретических исследований предложена упрощённая (графическая) методика комплексной оценки прочности двутавровых балок, основанная на так называемых безопасных факторных пространствах двутавров (рис. 2).

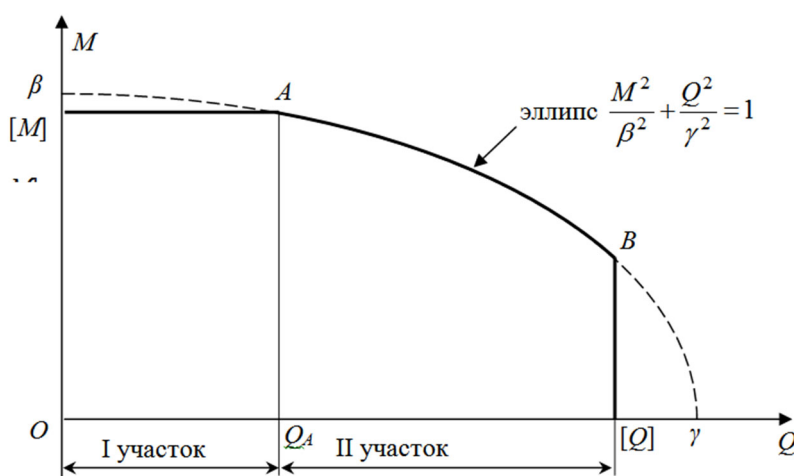


Рисунок 2 – Вид безопасного факторного пространства двутавров

Параметры этого пространства –  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $[M]$ ,  $[Q]$  зависят от размеров (номера) двутавра, его материала и принятой теории прочности [8,9].

Полная прочность балки в новой методике является обеспеченной, если все точки, имеющие координаты  $Q$  (поперечная сила) и  $M$  (изгибающий момент) в сечениях балки, расположены внутри указанного факторного пространства. Таким образом, для полной проверки прочности конкретной балки по этой методике достаточно иметь построенные для неё эпюры  $Q$  и  $M$  и чертежи её безопасного факторного пространства.

Использование указанной методики возможно в двух режимах: диалоговом и автоматическом.

В диалоговом режиме расчётчик строит эпюры  $Q$  и  $M$  “вручную” или с использованием имеющихся у него соответствующих компьютерных программ, вводит в компьютер исходные данные из этих эпюр о величинах  $Q$  и  $M$  в сечениях балки и запускает специальную программу для определения номера двутавра, который удовлетворяет условия прочности (1)-(3).

В автоматическом режиме расчётчик только вводит исходные данные о размерах и нагрузке балки, а все необходимые вычисления и построения выполняет компьютер по специальной сквозной программе.

Диалоговый режим не в полной мере лишен вышеуказанных недостатков традиционного расчёта балок на прочность и поэтому является мало-пригодным для широкого практического применения.

**Цель работы.** Целью данной работы является разработка сквозных компьютерных программ полного расчета на прочность статически определимых двухопорных и консольных двутавровых балок по упрощенной (графической) методике.

#### Материал и результаты исследований.

Обе указанные программы созданы на платформе Mathcad. Они существенно отличаются друг от друга лишь на стадии ввода исходных данных.

Для задания исходных данных двухопорных балок предложено их унифицированную схему, изображенную на рисунке 3. На её основе можно воспроизвести любые конкретные размеры и нагрузки.

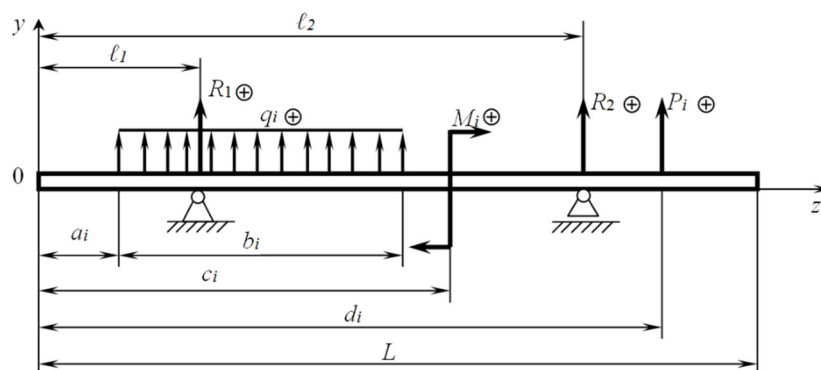


Рисунок 3 – Унифицированная схема двухопорных балок

Вариантов унифицированных схем консольных балок два: один – для опоры (жёсткого крепления) справа (рис. 4), второй – для опоры слева (рис. 5).

На всех унифицированных схемах положительные направления нагрузок и реакций обозначены знаками "плюс".

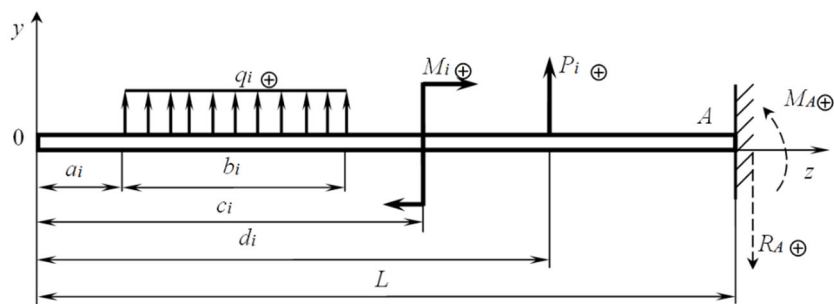


Рисунок 4 – Унифицированная схема консольных балок с опорой справа

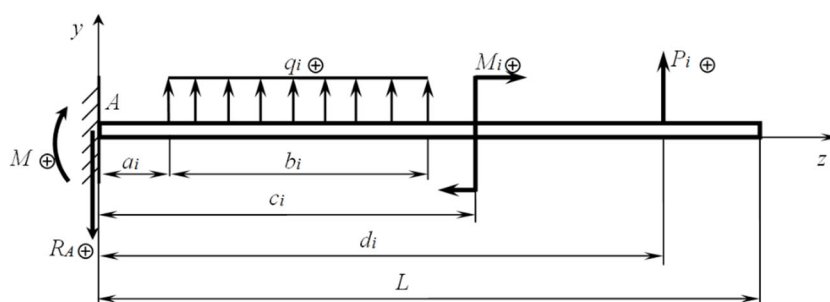


Рисунок 5 – Унифицированная схема консольных балок с опорой слева

Каждый из видов нагрузок может повторяться несколько раз ( $i = 1, 2, \dots$ ). В рабочих версиях программ, использованных в приведенных ниже примерах,  $i = 1, 2$ .

Обе разработанные программы определяют опорные реакции, строят эпюры поперечных сил и изгибающих моментов, изображают безопасные факторные пространства с нанесенными на них точками, подбирают требуемые номера двутавров, приводят свидетельства того, что подобранный номер двутавра – наименьший из тех, которые удовлетворяют все условия прочности.

Для функционирования программ в них заложены в общем виде формулы для определения опорных реакций, зависимости величин  $Q$  и  $M$  от координаты  $z$ , параметры безопасных факторных пространств для всех номеров двутавров по ГОСТ 8239-89 (табл.1). Эти параметры вычислены по формулам, приведенным в работах [8,9], применительно к наиболее распространенному материалу двутавров – стали Ст.3 и третьей теории прочности, которая надёжнее четвертой, потому что даёт меньшие размеры безопасных факторных пространств.

Работу одной из созданных программ проиллюстрируем следующим примером.

Таблица 1 – Параметры безопасных факторных пространств двутавров  
(сталь Ст.3,  $[\sigma] = 160 \text{ МПа}$ , третья теория прочности)

Номера двутавров	$\beta$ , кН·м	$\gamma$ , кН	$[M]$ , кН·м	$[Q]$ , кН
10	7,402	37,758	6,352	30,991
12	10,626	49,714	9,344	39,881
14	14,643	60,227	13,072	47,911
16	19,346	70,878	17,440	56,051
18	25,201	81,860	22,880	64,658
18a	28,005	80,166	25,440	64,971
20	32,140	93,137	29,440	73,600
20a	35,536	91,513	32,480	74,077
22	40,276	106,648	37,120	84,091
22a	44,154	104,441	40,640	84,285
24	50,100	120,338	46,240	95,097
24a	55,172	118,225	50,720	95,640
27	64,026	147,557	59,360	114,515
27a	70,513	144,836	65,110	115,284
30	81,030	180,046	75,520	137,373
30a	89,361	176,713	82,880	138,548
33	102,367	215,074	95,520	162,549
36	127,657	252,820	118,880	189,787
40	163,097	316,526	152,480	232,241
45	210,216	392,515	196,960	281,236
50	270,712	494,005	254,240	345,828
55	346,380	605,383	325,600	416,990
60	435,470	727,747	409,600	494,526

**Пример.** Для заданной двухопорной балки (рис.6) определить номер двутавра, достаточный для обеспечения её полной прочности.

**Решение.**

1. Введение сосредоточенных сил, моментов пар сил и их расположения:

Введите сосредоточенные силы  $P$ , их расположение  $d$ , моменты пар сил  $M$  и их расположение  $c$

$$P := \begin{pmatrix} -55 \\ 0 \end{pmatrix} \text{кН} \quad d := \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \end{pmatrix} \text{м} \quad M := \begin{pmatrix} 45 \\ 0 \end{pmatrix} \text{кН}\cdot\text{м} \quad c := \begin{pmatrix} 2.8 \\ 0 \end{pmatrix} \text{м}$$

2. Введение длины балки, расположения опор на ней, распределённых нагрузок, их расположения и протяжённости:

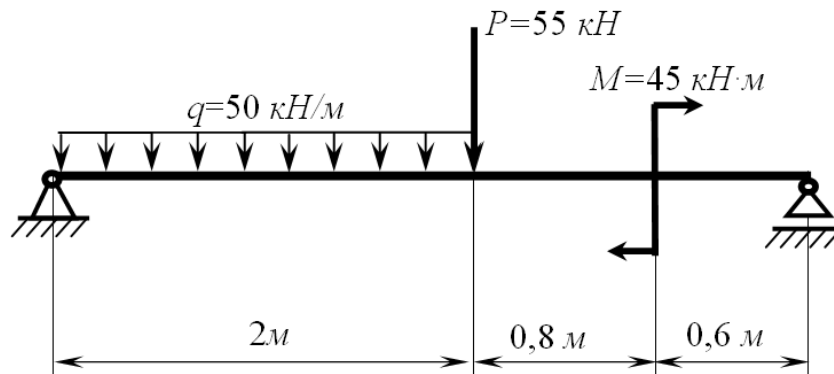


Рисунок 6 – Схема балки к примеру 1

Введите распределенные нагрузки  $q$ , их расположение  $a$ , протяженность  $b$ , длину балки  $L$  и расположение опор на балке  $l_1$  и  $l_2$

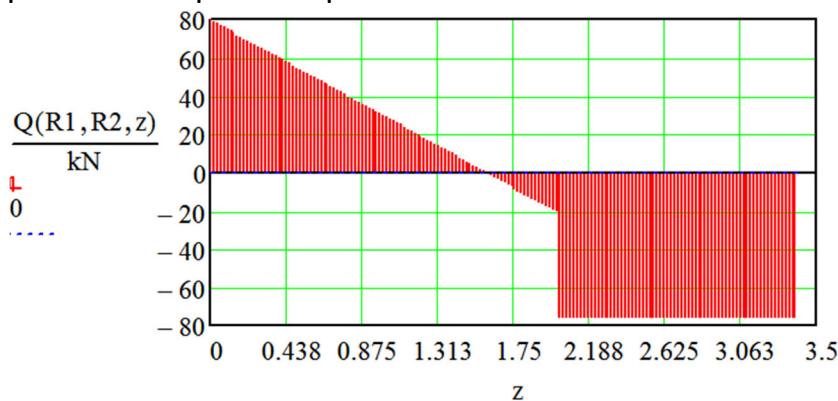
$$q := \begin{pmatrix} -50 \\ 0 \end{pmatrix} \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad a := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \text{m} \quad b := \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \end{pmatrix} \text{m} \quad L := 3.4 \text{m} \quad l_1 := 0 \text{m} \quad l_2 := 3.4 \text{m}$$

### 3. Нахождение опорных реакций балки:

$$R2 := \frac{1}{(l_2 - l_1)} \left[ \sum_{i=1}^{\text{rows}(M)} M_i - \sum_{i=1}^{\text{rows}(P)} [P_i \cdot (d_i - l_1)] - \sum_{i=1}^{\text{rows}(q)} \left[ q_i \cdot b_i \cdot \left( a_i + \frac{b_i}{2} - l_1 \right) \right] \right] = 7.5 \times 10^4 \text{N}$$

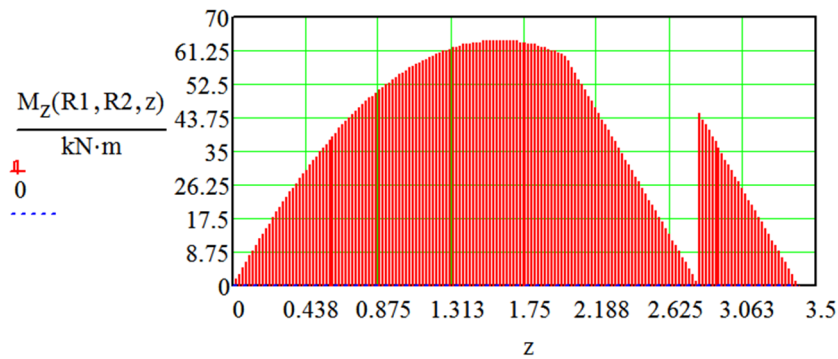
$$R1 := \frac{1}{(l_2 - l_1)} \left[ - \sum_{i=1}^{\text{rows}(M)} M_i + \sum_{i=1}^{\text{rows}(P)} [P_i \cdot (d_i - l_2)] - \sum_{i=1}^{\text{rows}(q)} \left[ q_i \cdot b_i \cdot \left( l_2 - a_i - \frac{b_i}{2} \right) \right] \right] = 8 \times 10^4 \text{N}$$

### 4. Построение эпюры поперечных сил:

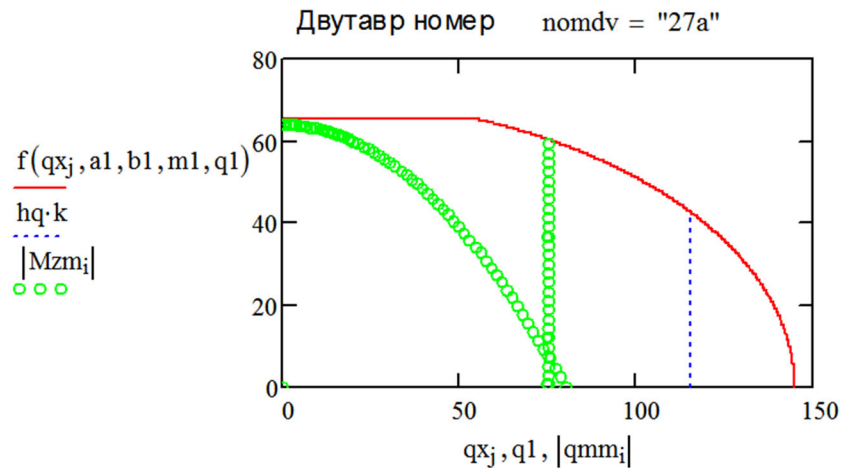


### 5. Построение эпюры изгибающих моментов:

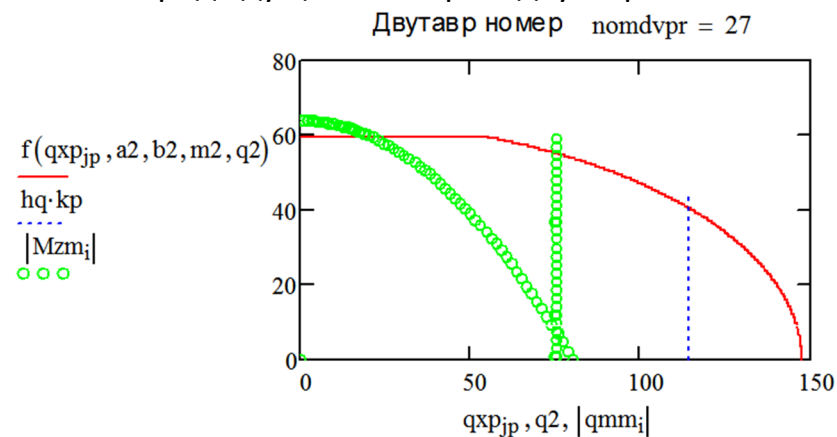




### 6. Нахождение номера двутавра:



### 7. Сравнение с предыдущим номером двутавра:



Аналогичные расчёты проводились и применительно к консольным балкам. Их результаты, как и результаты приведенного примера, полностью подтверждены соответствующими традиционными ("ручными") расчётами.

**Вывод.** Разработаны в системе Mathcad и проиллюстрированы рядом примеров сквозные компьютерные программы расчётов на прочность статически определимых двухопорных и консольных двутавровых балок. Эти программы базируются на ранее предложенной концепции использования безопасных факторных пространств двутавров, которая существенно упрощает и ускоряет процесс вычислений.



Выполненные разработки могут быть рекомендованы студентам и производственным специалистам для использования в учебных целях и инженерной практике.

Разработанные программы целесообразно дополнить возможностями определять деформации балок – прогибы и углы поворота сечений, что существенно расширит круг решаемых задач.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Писаренко Г.С. Опір матеріалів: Підр. для техн. ВНЗ / Г.С. Писаренко, О.Л. Квітка, Е.С. Уманський. – К.: Вища шк., 2004. – 655 с.
2. Калиновская Т.Г. Сопротивление материалов: Учеб. пособие / Т.Г. Калиновская, Н.А. Дроздова, А.Т. Рябова-Найдан. – Красноярск: Сиб. федер. ун., 2016. – 164 с.
3. Chakarbarti M. Strength Of Materials / M. Chakarbarti. S.K. Kataria&Sons, 2009. 1000 p.
4. Bansal R. K. A Textbook of Strength of Materials / R. K. Bansal. – Laxmi Publications, 2010. 1106 p.
5. Purushothama Rai. P. Strength of Materials / P. Rai. Purushothama, V. Ramasamy. Pearson India, 2012. 1039 p.
6. Кутовий Л. В. Збірник розрахунково-графічних завдань з курсу "Опір матеріалів" (для студентів всіх механічних спеціальностей денної форми навчання) / Л. В. Кутовий [та ін.]. – Краматорськ: ДДМА, 2007. – 220 с.
7. Каюмов Р.А. Расчёт балки на прочность и жёсткость при прямом поперечном изгибе: Методические указания для выполнения расчётно-графического задания / Р.А. Каюмов, И.З. Мухамедова, Д.Е. Страхов. – Казань: КГАСУ, 2009. – 24 с.
8. Холодняк Ю.С. Совершенствование методики прочностного расчёта двутавровой балки и её изложения в курсах технических дисциплин / Ю.С. Холодняк, А.В. Периг, И.А. Матвеев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. – Пермь: ПНИПУ, 2012. – С. 77-90.
9. Холодняк Ю. С. Развитие методологии прочностных расчетов двутавровых балок / Ю. С. Холодняк, А. В. Периг, С. В. Капорович // Научный Вестник ДГМА : Сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2015. – № 2 (17Е). – С. 103 –114.