



*Электростатический сепаратор, плоское решето, динамическая нагрузка, деформация, метод конечных элементов, программа SolidWorks*

*Electrostatic separator, flat screen, dynamic load, deformation, finite element method, program SolidWorks*

DOI 10.35694/YARCX.2020.52.4.012

## **АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИИ И НАПРЯЖЕНИЯ ПЛОСКИХ РЕШЁТ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО СЕПАРАТОРА В ПРОГРАММЕ SOLIDWORKS**

В.В. Шмигель (фото)  
д.т.н., профессор, профессор кафедры электрификации  
А.С. Угловский  
к.т.н., доцент кафедры электрификации  
Н.Ю. Махаева  
начальник учебно-методического управления  
ФГБОУ ВО Ярославская ГСХА, г. Ярославль

Проектирование компьютерных моделей методом конечно-элементного анализа объектов в области промышленности позволяет проводить виртуальные натурные испытания и сокращать время при разработке и изготовлении изделия в цепочке «проектирование – изготовление – испытания – исправление ошибок – конечный результат».

В статье рассмотрена проблема напряжённо-деформированного состояния решета электростатического сепаратора при ударной нагрузке с различными уровнями интенсивности импульса столкновения с применением метода конечных элементов.

### **Материалы и методы**

Была поставлена задача – изучить поперечное воздействие тела в виде точки массы или конечного тела на листовые структуры следующего типа: решето; решето, усиленное рёбрами; решето с повреждениями.

Для решения обозначенной задачи использовался метод конечных элементов (FEM) в форме смещения. Этот метод был реализован в программном комплексе SolidWorks с приложением Simulation.

Исследование проводилось в два этапа. На первом этапе была разработана подходящая трёхмерная модель решета и ударника, а на втором этапе проведён анализ напряжений ударов якорем ударника со скоростью 2,4 м/с. Ударные явления должны учитываться при определении размеров конструкций и их поперечных сечений, чтобы предотвратить их преждевременное разрушение.

Исследования были проведены для динамических нагрузок с материалами решёт: нержавеющей сталь и стеклотекстолит. Оценка результатов проводилась путём анализа эпюр напряжений и деформации модели. Эпюры имеют числовую и цветовую градацию результатов.

Представленный расчётный подход основан на сочетании численных методов и базовых принципов теории удара при расширении по модам колебаний.

Было проанализировано тонкое прямоугольное решето, центральная поверхность которого расположена на плоскости  $xOy$ , а ось  $z$  направлена вниз (рис. 1). Проведём анализ решета с жёсткой фиксацией по краям. В момент времени  $t_0$  решето находится в состоянии без напряжения и деформации, но в момент времени  $t = 0$  на решето воздействует нагрузка, которая имеет массу  $M$  и скорость  $v_0$ . Материал ударника – винипласт.

Вектор скорости  $v_0$  направлен под прямым углом к центральной поверхности плоскости решета. Другими словами, рассматривается проблема воздействия нагрузки на решето в точке с координатами  $x = a/2, y = b/2$ .

Дифференциальное уравнение индуцированных поперечных колебаний решета представлено в следующем виде [1–5]:

$$D \left( \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) + m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = q(x, y, t), \quad (1)$$

где

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)}$$

$D$  – цилиндрическая жёсткость решета;

$h$  – толщина решета;

$E$  – модуль упругости (модуль Юнга);

$\nu$  – коэффициент Пуассона;

$w$  – прогиб;

$m$  – масса решета ( $m = \gamma h/a$ );

$\gamma$  – относительная плотность материала решета;

$a$  – ускорение.

Начальные условия задачи:

$$\omega = 0 \text{ и } \frac{\delta w}{\delta t} = 0 \text{ при } t = 0. \quad (2)$$

Благодаря жёсткой фиксации пластины по её периметру, граничные условия будут иметь следующий вид:

$$\omega = 0 \text{ и } \frac{\delta w}{\delta x} = 0 \text{ при } x = 0 \text{ и } x = a. \quad (3)$$

$$\omega = 0 \text{ и } \frac{\delta w}{\delta y} = 0 \text{ при } y = 0 \text{ и } y = b.$$

Практически невозможно получить точное аналитическое решение для уравнения (1), при котором были бы соблюдены начальные условия (2) и граничное условие (3). Поэтому, на наш взгляд, целесообразно применять приближенные аналитические и численные методы.

Как уже было отмечено ранее, для изучения воздействия нагрузки на пластину был использован численный метод, основанный на методе конечных элементов (FEM) в форме смещения.

Теорема об изменении момента массы при ударе представлена в следующем виде:

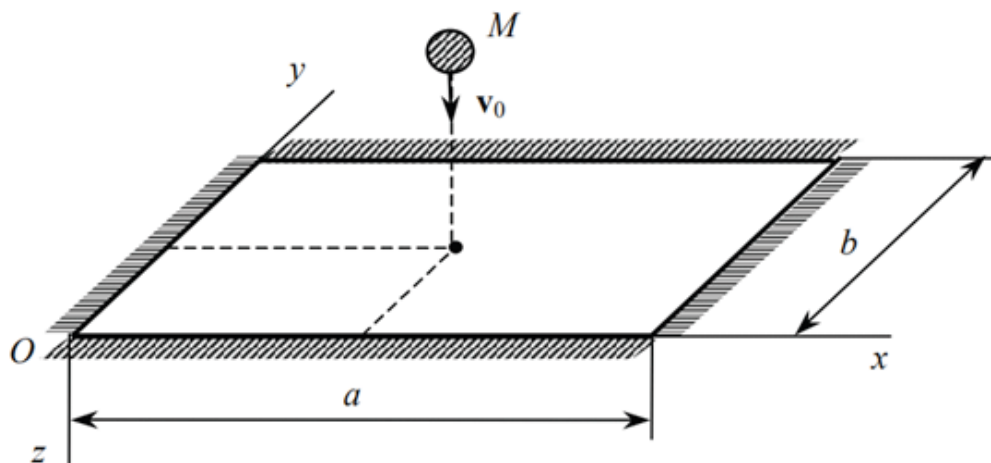


Рисунок 1 – Конструкция решета и ударника  $M$

$$M(v_i - v_0) = \Sigma S_i, \quad (4)$$

то есть изменение импульса точки массы во время удара равно сумме импульсов удара, действующих на точку массы.

$v_0, v_i$  – соответственно скорость воздействующей нагрузки в начале и конце удара.

Формула (4) может быть записана проекцией оси  $z$  в следующем виде:

$$M(1 + k)v_{0z} = \Sigma S_{jz}, \quad (5)$$

где  $k$  – коэффициент восстановления под воздействием.

Импульс воздействия:

$$S_{imp} = \int_0^{\tau} F_{imp} dt = F_{imp}^{av} \cdot \tau, \quad (6)$$

где  $F_{imp}$  – ударная сила,

$\tau$  – время импульса длительности.

Обычно считается, что:

$$\tau = 2,5T_1 = 2,5 \frac{2\pi}{\omega_1},$$

где  $\omega_1$  – первая круговая частота собственных колебаний решета.

Ударная сила, которая должна быть приложена к решету в течение времени  $\tau$ , определяется формулой:

$$F_{imp(z)}^{av} = \frac{M((1+k)v_{0z})}{\tau}. \quad (7)$$

В нашем случае интенсивность нагрузки  $q$  ( $x, y, t$ ), которая включена в уравнение (1), будет иметь следующий вид:

$$q(x, y, t) = F_{imp(z)}^{av} \delta\left(x - \frac{a}{2}\right) \delta\left(y - \frac{b}{2}\right) \varphi(t),$$

$$\varphi(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq t \leq \tau \\ 0 & \text{при } t > \tau \end{cases}$$

где  $\delta(x)$  – дельта-функция.

## Результаты и обсуждения

### Решето под воздействием точки массы

Разработанная методика иллюстрируется примером расчёта стального решета (рис. 2).

Анализ напряжённо-деформированного состояния элемента конструкции, вызванного ударной нагрузкой различной интенсивности уровня при постоянной форме импульса удара, был выполнен с использованием метода FEM.

Размеры решета: сторона  $a = 1$  м и толщина  $h = 1,25$  мм. Оно изготовлено из нержавеющей стали AISI 430 (08X17) со следующими свойствами:  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа;  $\nu = 0,28$ ;  $\gamma = 77$  кН/м<sup>3</sup>.

Решето жёстко закреплено по периметру и моделируется конечными элементами, количество которых равно 100, а количество узлов сетки составляет 121.

Воздействие нагрузки произошло в точке  $K$  с координатами  $x = y = a/2 = 0,5$  м. На стальном решете были учтены частоты собственных колебаний  $\omega_1 = 121,32$  с<sup>-1</sup>,  $\omega_2 = \omega_3 = 156,08$  с<sup>-1</sup>.

Рассматривалось время  $t = 1$  с длительности импульса удара на первой круговой частоте собственных колебаний решета.

Значение максимального прогиба в точке  $K$  для стали составляет  $w_{max} = 0,5$  мм. Поле напряжений  $\sigma_{eq}$  распределения интенсивности слоя решета представлено на рисунках 3 и 4. При анализе повреждений в стенке пластины выявлены дефекты в центре пластины размерами  $40 \times 40$  см и глубиной 2,5 мм и 5 мм.

Анализ результатов расчёта также учитывал симметричное распределение напряжённо-деформированного состояния элемента. Для исследуемого решета при массе нагрузки  $M = 0,18$  кг и начальной скорости удара  $v_{0z} = 2,4$  м/с приведены поля распределения интенсивностей деформации  $w$  для центральной поверхности решета и поля для основных эквивалентных напряжений  $\sigma_{eq}$  решета (рис. 3 и 4). Из графиков

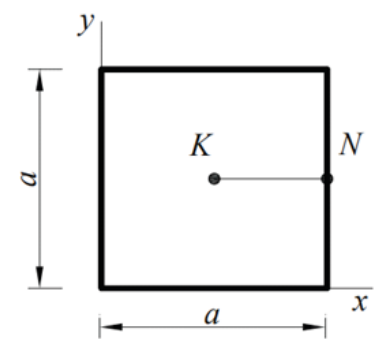


Рисунок 2 – Расчётная схема решета

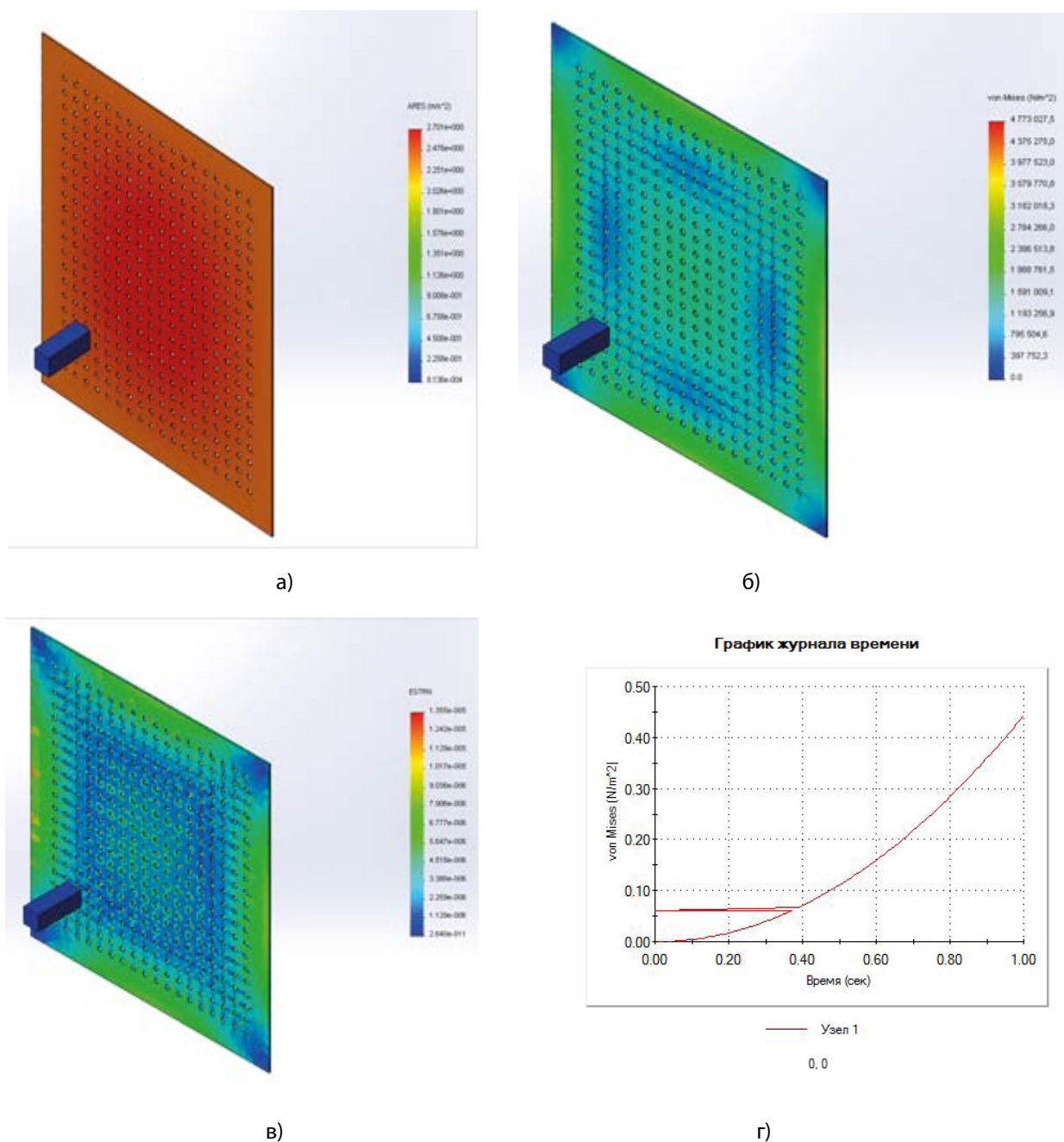


Рисунок 3 – Решето, выполненное из литой нержавеющей стали:

- а) ускорение (мин. 0,000813624 м/с<sup>2</sup>. Узел: 26, макс. 2,70091 м/с<sup>2</sup>. Узел: 47924);  
 б) узловое напряжение  $\sigma_{\text{ед}}$  решета (мин. 0,0218542 Н/м<sup>2</sup>. Узел: 86, макс. 4,77303e + 006 Н/м<sup>2</sup>. Узел: 106585);  
 в) деформация (мин. 2,63987e-011. Элемент: 70, макс. 1,35537e-005. Элемент: 41761),  
 распределение напряжения в узле 1

видно, что напряжённое состояние стеклотекстолита при ударе якорем ударника в 2 раза больше, в сравнении с литой нержавеющей сталью.

Как видно из рисунков 3 и 4, наибольшее значение деформации наблюдается при ударе ударников о поверхность стеклотекстолита. Локализация максимумов напряжений на участках решёт

стеклотекстолита и стали не носит скачкообразного характера при ударах по решету ударником, что свидетельствует о выборе рациональной конструктивной схемы и проектного решения.

### Выводы

Для анализа решёт электростатического решётного сепаратора предложена эффективная

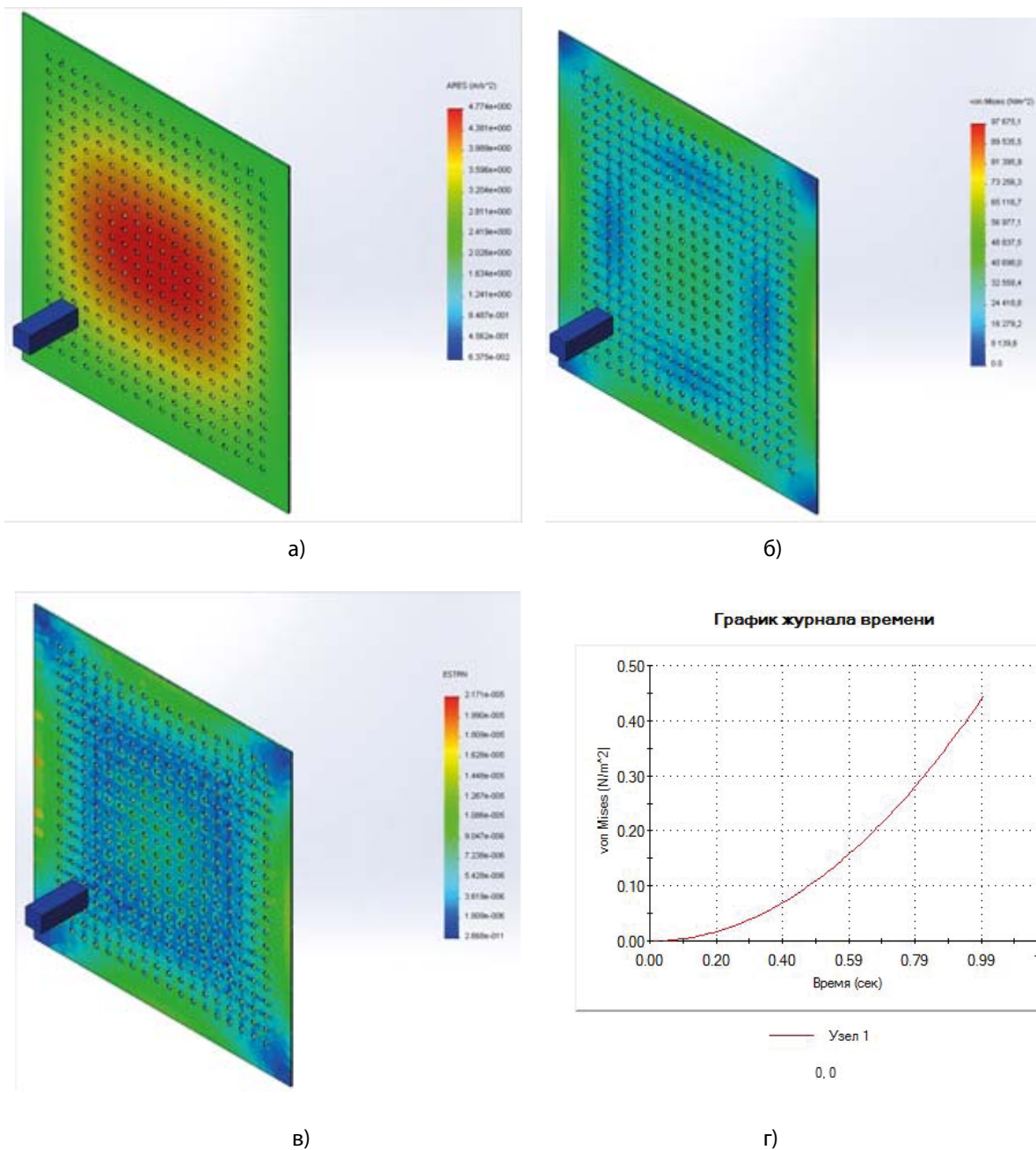


Рисунок 4 – Решето, выполненное из стеклотекстолита:

- а) ускорение (мин. 0,0637457 м/с<sup>2</sup>. Узел: 26, макс. 4,77358 м/с<sup>2</sup>. Узел: 47924);  
 б) узловое напряжение  $\sigma_{eq}$  решета (мин. 0,0222681 Н/м<sup>2</sup>. Узел: 86, макс. 97675,1 Н/м<sup>2</sup>. Узел: 106585);  
 в) деформация (мин. 2,63987e-011. Элемент: 70, макс. 2,17132e-005. Элемент: 6959),  
 распределение напряжения в узле 1

процедура, позволяющая в достаточной мере решить проблемы, связанные с ударным воздействием нагрузки, и основанная на методе конечных элементов и теории удара. Изучено влияние формы представления импульса удара.

Проведённые расчеты показали, что учёт размеров ударного тела приводит к уменьшению

значений деформации и эквивалентных напряжений.

Для повышения эффективности системы очистки плоских решёт с круглыми отверстиями в электростатических решётных сепараторах в качестве материала решета можно применить как нержавеющую сталь, так и стеклотекстолит.

### **Литература**

1. Алямовский, А.А. COSMOSWorks. Основы расчета конструкций на прочность в среде SolidWorks [Текст] / А.А. Алямовский. – М.: ДМК Пресс, 2010, – 784 с., ил. (Серия «Проектирование»).
2. Алямовский, А.А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation [Текст] / А.А. Алямовский. – М.: ДМК Пресс, 2010, – 464 с., ил. (Серия «Проектирование»).
3. Алямовский, А.А. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике [Текст] / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов, Ф.И. Харитонович, Н.Б. Пономарев. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 1040 с.: ил. + DVD – (Мастер).
4. Шмигель, В.В. Проведение и планирование многофакторного эксперимента эффективности работы сепаратора в программе STATGRAPHICS [Текст] / В.В. Шмигель, А.С. Угловский, Н.Ю. Махаева // Международный технико-экономический журнал. – 2020. – № 1. – С. 56–65.
5. Шмигель, В.В. Прогнозирование долговечности и надежности материалов плоского решета сепаратора в программе ANSYS WORKBENCH [Текст] / В.В. Шмигель, А.С. Угловский, Н.Ю. Махаева // Международный технико-экономический журнал. – 2019. – № 5. – С. 30–41.

### **References**

1. Alyamovskij, A.A. COSMOSWorks. Osnovy rascheta konstrukcij na prochnost' v srede SolidWorks [Tekst] / A.A. Alyamovskij. – M.: DMK Press, 2010, – 784 s., il. (Serija «Proektirovanie»).
2. Alyamovskij, A.A. Inzhenernye raschety v SolidWorks Simulation [Tekst] / A.A. Alyamovskij. – M.: DMK Press, 2010, – 464 s., il. (Serija «Proektirovanie»).
3. Alyamovskij, A.A. SolidWorks 2007/2008. Komp'juternoe modelirovanie v inzhenernoj praktike [Tekst] / A.A. Alyamovskij, A.A. Sobachkin, E.V. Odintsov, F.I. Kharitonovich, N.B. Ponomarev. – SPb.: BHV-Peterburg, 2011. – 1040 s.: il. + DVD – (Master).
4. Shmigel', V.V. Provedenie i planirovanie mnogofaktornogo jeksperimenta jeffektivnosti raboty separatora v programme STATGRAPHICS [Tekst] / V.V. Shmigel', A.S. Uglovskij, N.Yu. Makhaeva // Mezhdunarodnyj tehniko-jekonomicheskij zhurnal. – 2020. – № 1. – S. 56–65.
5. Shmigel', V.V. Prognozirovanie dolgovechnosti i nadezhnosti materialov ploskogo resheta separatora v programme ANSYS WORKBENCH [Tekst] / V.V. Shmigel', A.S. Uglovskij, N.Yu. Makhaeva // Mezhdunarodnyj tehniko-jekonomicheskij zhurnal. – 2019. – № 5. – S. 30–41.