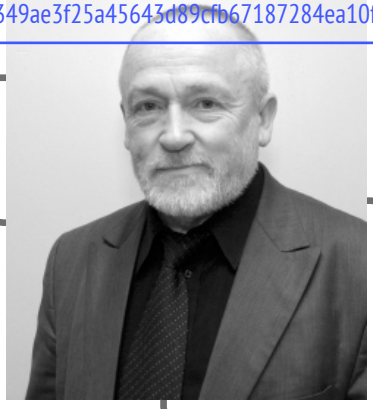
Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Махаева Наталья Юрьевна
Должность: Проректор по учебной и воспитательной работе, молодежной политике ФГБОУ ВО "Ярославский ГАУ"
Дата подписания: 02.02.2024 11:01:58
Уникальный программный ключ:
fa349ae3f25a45643d89cfb67187284ea10f48e8



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

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

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

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: нержавеющая сталь и стеклотекстолит. Оценка результатов проводилась путём анализа эпюр напряжений и деформации модели. Эпюры имеют числовую и цветовую градации 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

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

D – цилиндрическая жёсткость решета;
h – толщина решета;
E – модуль упругости (модуль Юнга);
v – коэффициент Пуассона;
w – прогиб;
m – масса решета (m = γh/a);
γ – относительная плотность материала решета;
a – ускорение.

Начальные условия задачи:

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

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

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

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

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:

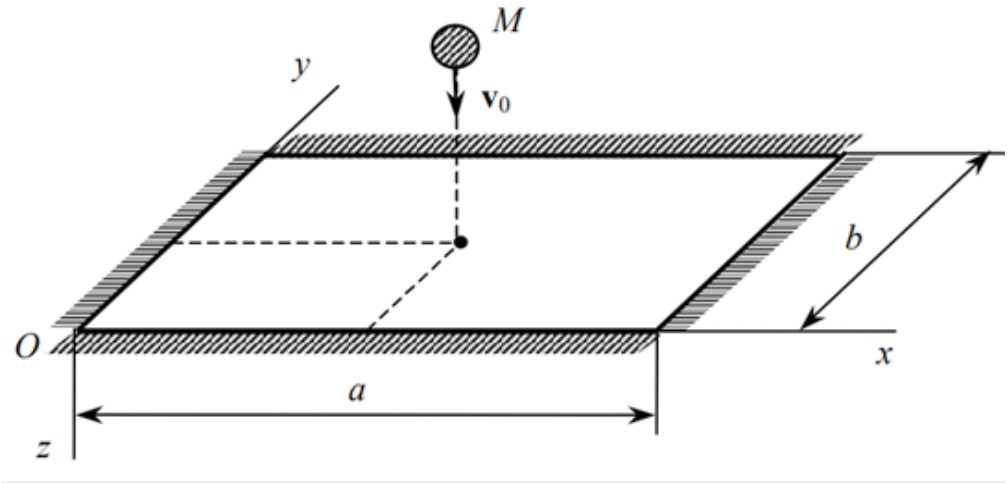


Рисунок 1 – Конструкция решета и ударника M

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

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:

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

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,
τ – время импульса длительности.

Обычно считается, что:

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

где ω_1 – первая круговая частота собственных колебаний решета.

Ударная сила, которая должна быть приложена к решету в течение времени τ, 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:

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

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

где δ(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 мкм. Оно изготовлено из нержавеющей стали AISI 430 (08Х17) со следующими свойствами: $E = 2{,}1 \cdot 10^5$ МПа; ν = 0,28; γ = 77 кН/м³.

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

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

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

Значение максимального прогиба в точке К для стали составляет w_{max} = 0,5 мм. Поле напряжений σ_{eq} распределения интенсивности слоя решета представлено на рисунках 3 и 4. При анализе повреждений в стенке пластины выявлены дефекты в центре пластины размерами 40 × 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 σ_{eq} решета (рис. 3 и 4). Из графиков

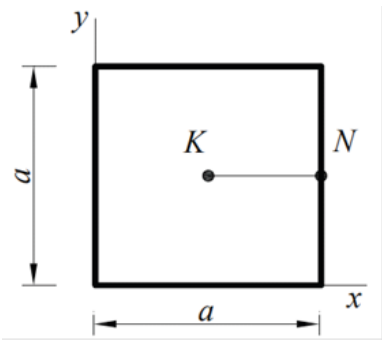
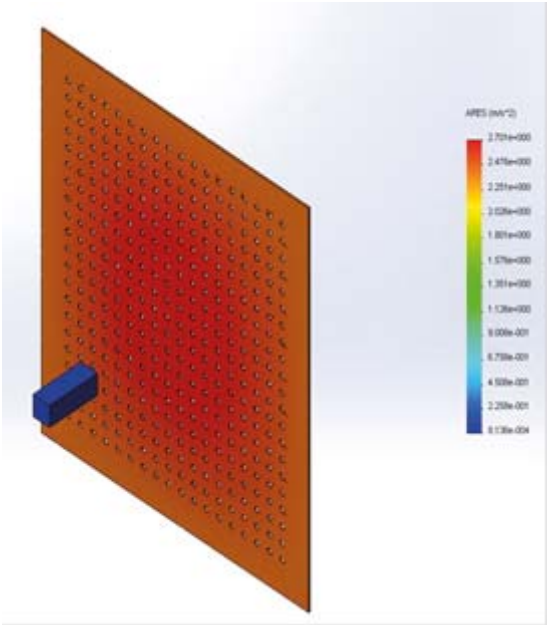
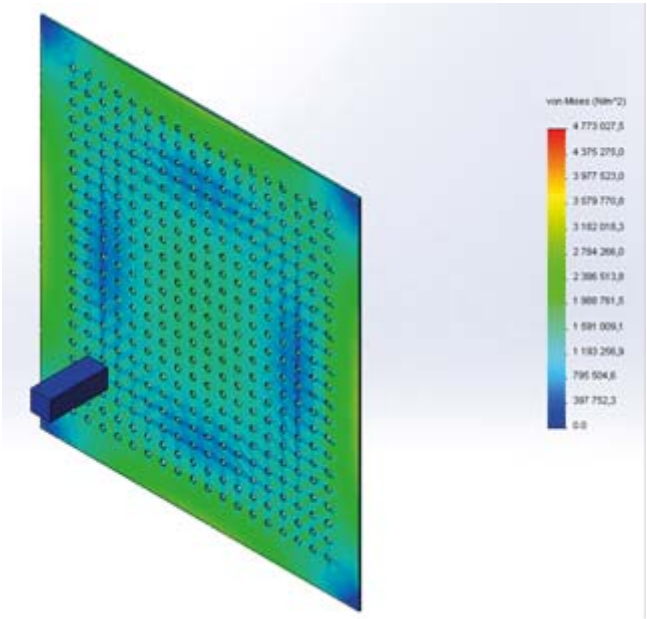


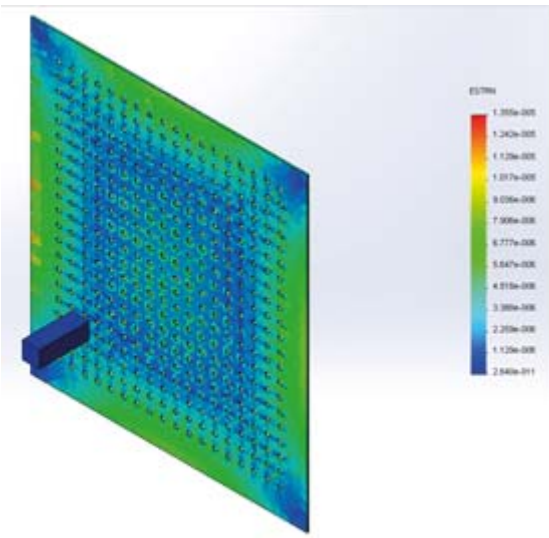
Рисунок 2 – Расчётная схема решета



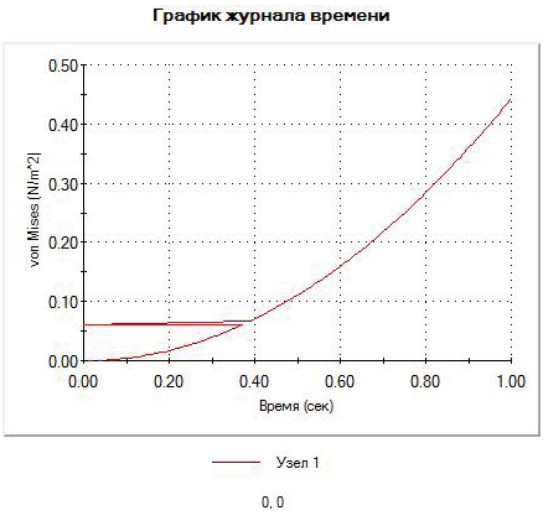
а)



б)



в)



г)

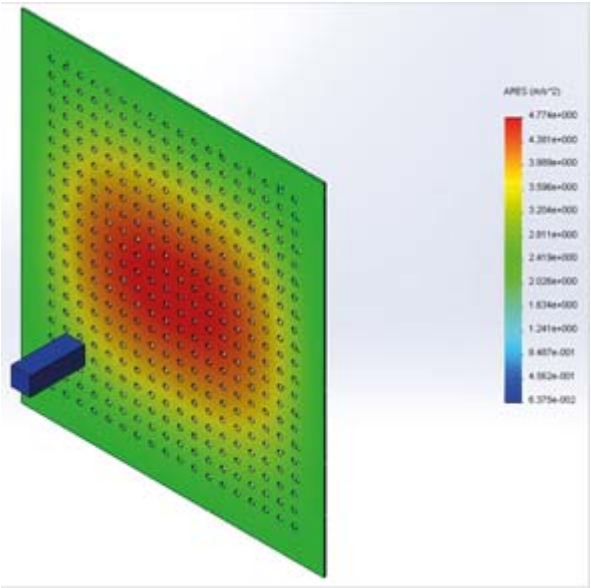
Рисунок 3 – Решето, выполненное из литой нержавеющей стали:
а) ускорение (мин. 0,000813624 м/с^2. Узел: 26, макс. 2,70091 м/с^2. Узел: 47924);
б) узловое напряжение σ_{eq} решета (мин. 0,0218542 Н/м^2. Узел: 86, макс. 4,77303e + 006 Н/м^2. Узел: 106585);
в) деформация (мин. 2,63987e-011. Элемент: 70, 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.

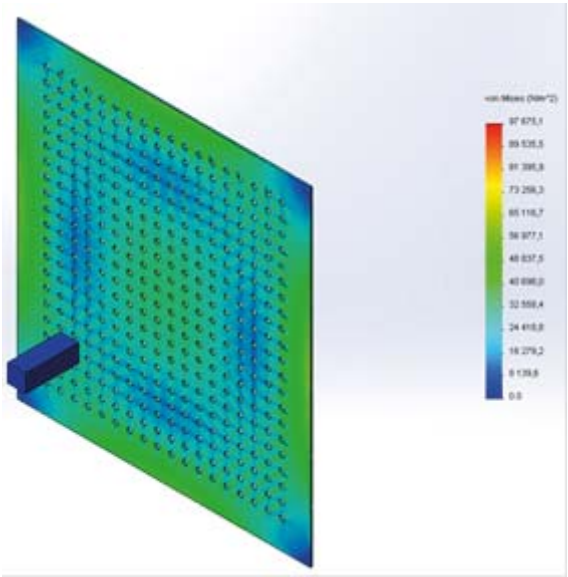
Как видно из рисунков 3 и 4, наибольшее значение деформации наблюдается при ударе ударников о поверхность стеклотекстолита. Локализация максимумов напряжений на участках решёт стеклотекстолита и стали не носит скачкообразного характера при ударах по решету ударником, что свидетельствует о выборе рациональной конструктивной схемы и проектного решения.

Выводы

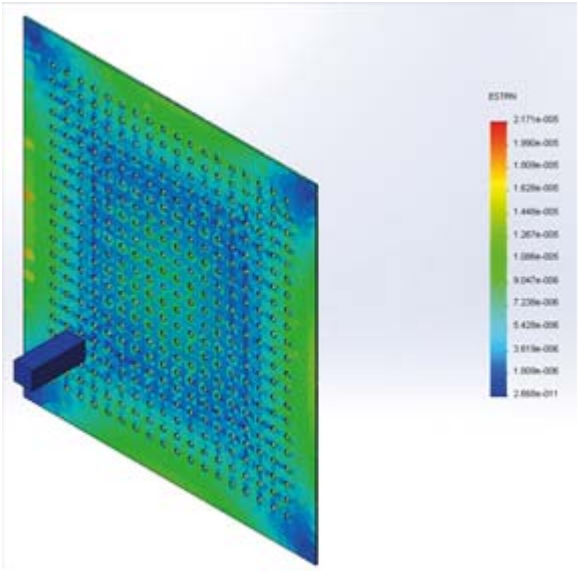
Для анализа решёт электростатического решётного сепаратора предложена эффективная



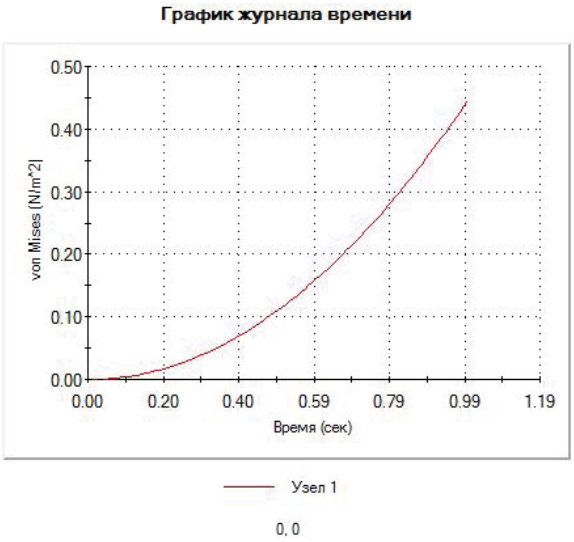
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4 – Решето, выполненное из стеклотекстолита:
а) ускорение (мин. 0,0637457 м/с^2. Узел: 26, макс. 4,77358 м/с^2. Узел: 47924);
б) узловое напряжение σ_{eq} решета (мин. 0,0222681 Н/м^2. Узел: 86, макс. 97675,1 Н/м^2. 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.