

Анализ трещиностойкости клеевых соединений с использованием метода конечных элементов и модели когезионной зоны

А. А. Устинов,^{*} П. Г. Бабаевский,[†] Н. А. Козлов,[‡] Н. В. Салиенко[§]

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (МАИ),
Институт № 11, кафедра технологии композиционных материалов,

конструкций и микросистем

Россия, 121552, Москва, ул. Оршанская, д. 3

(Статья поступила 11.03.2019)

Методика когезионных зон позволяет оценивать устойчивость материала, как к началу роста существующей трещины, так и к возникновению и развитию дефектов в местах концентрации напряжений. Возможность достоверно определять параметры разрушения клеевых соединений (КС) и предсказывать поведение элементов конструкций с их использованием при нагружении является актуальной задачей для авиастроения. Предложено использовать в конечно-элементной 3D модели расслоения по моде I образца КС в виде двухконсольной балки длину когезионной зоны (l_{cz}), рассчитанную по экспериментально определенным параметрам — локальной межслоевой когезионной прочности материала (σ_{IC}) и интенсивности высвобождения упругой энергии (G_{IC}). Рассчитанная длина когезионной зоны применена в модели для расчёта минимального числа конечных элементов при оптимальном их размере, что обеспечивает более высокую точность вычислений основных параметров трещиностойкости образцов КС при минимизации объема вычислений. В качестве объектов исследования использовали КС листов алюминиевого сплава Д-16, склеиваемые дисперсно-наполненными клеями промышленных марок ЭПК-1, ВК-9 и К-300-61, которые широко применяются в качестве конструкционных клеев в производстве аэрокосмических конструкций. В результате проведенных исследований определены основные параметры трещиностойкости и выбрана оптимальная длина конечного когезионного элемента, и полученная модель точно описывает процесс роста трещины. Полученные результаты хорошо коррелируют с результатами экспериментов.

PACS: 88.20.rg

УДК: 620.22

Ключевые слова: клеевое соединение, двухконсольная балка, параметры когезионной зоны, экспериментальные методики, конечно-элементная 3D модель.

1. ИМПЛАНТАЦИЯ МОДЕЛИ КОГЕЗИОННОЙ ЗОНЫ В МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНИЦИИРОВАНИЯ И РОСТА ТРЕЩИН

ВВЕДЕНИЕ

Использование конструкционных клеевых соединений (КС) металлических и композитных аэрокосмических конструкций при сравнении их с механическими соединениями и сваркой имеет как ряд существенных так преимуществ, так и недостатков. К преимуществам КС следует отнести выигрыш в весе и технологичности при больших площадях поверхности соединяемых элементов и герметизацию швов, а к основным их недостаткам — трудности оценки и прогнозирования несущей способности и долговечности при низкой устойчивости конструкционных КС к образованию и росту дефектов (трещин) и высокой чувствительности клеевых слоев к воздействию факторов космического пространства и наземных условий.

В рамках глобальной и локальной линейной упругой механики разрушения (ЛУМР) [1,2] разработаны физические (микромеханические) модели, позволяющие аналитически определять локальные деформационные критерии трещиностойкости хрупких и псевдохрупких конструкционных материалов, связанные с необратимыми процессами хрупкого предразрушения в небольшой, так называемой процессной, зоне впереди кончика трещины (модель Баренблатта). Развитие локальной процессной зоны, названной Баренблаттом когезионной зоной (КЗ). К основным материальным константам этой зоны относятся затраты энергии на ее деформирование и разрушение, а также локальные деформационно-прочностные свойства материала, определяющие, с учетом глобального параметра трещиностойкости, ее длину и предельную деформацию (раскрытие КЗ).

Аналитические методы ЛУМР позволяют теоретически рассчитывать и экспериментально определять параметры трещиностойкости и критерии разрушения хрупких и псевдохрупких материалов как материальных констант только в случаях простых конфигураций образцов с заданной краевой или центральной трещи-

^{*}E-mail: ustinershovskiy@yandex.ru

[†]E-mail: babaevskiy@mat.i.ru

[‡]E-mail: mail-kna@mail.ru

[§]E-mail: intdep@mat.i.ru

ной. Однако, при сложной конфигурации конструкций и дефектов аналитическая оценка их трещиностойкости в рамках ЛУМР затруднена или невозможна. В настоящее время эти проблемы решаются разработкой численных методов моделирования зарождения и роста трещин на основе подходов как глобальной, так и локальной ЛУМР, в частности, с использованием модели когезионной зоны (МКЗ), предложенной Баренблаттом [3] и имплантированной в метод конечных элементов (МКЭ) с использованием пакетов прикладных программ ANSYS® и ABAQUS®.

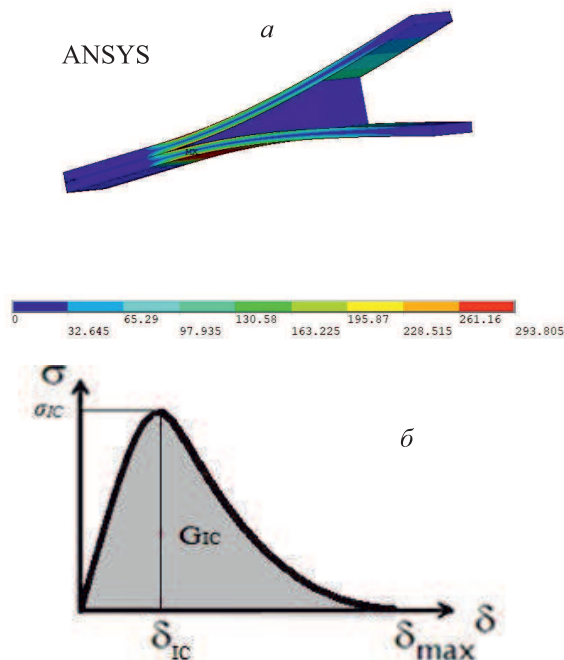


Рис. 1: Модель образца КС при испытании на растяжение по моде I (а) и экспоненциальный ЗКЗ (б): σ_{IC} — локальная адгезионная прочность; G_{IC} — интенсивность высвобождения упругой энергии при распространении трещины (трещиностойкость), δ_{IC} — раскрытие КЗ при максимальном напряжении (локальная деформация материала при разрыве, δ_{max} — предельная деформация или максимальное раскрытие КЗ

В МКЗ, имплантированной в МКЭ в пакете прикладных программ ANSYS®, когезионная зона (КЗ) рассматривается как зона действия сдерживающих (когезионных) сил сцепления впереди кончика трещины или в любом другом месте концентрации напряжения (рис. 1,а). Поведение КЗ описывается заданным законом когезионной зоны (ЗКЗ) — зависимостью локального напряжения σ от ее деформации (раскрытия) δ . ЗКЗ как функция $\sigma(\delta)$ определяется характером нагружения и механизмом локального предразрушения или упруго-пластичности материала и может иметь различный вид — экспоненциальный, билинейный, трапецидальный и др. При нагружении по моде I ЗКЗ соответствует диаграмме локального растяжения материала $\sigma_I(\delta)$, которая при численном моделировании чаще

всего используется в экспоненциальной форме, впервые предложенной Баренблаттом (рис. 1,б).

2. КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОГЕЗИОННОЙ ЗОНЫ КС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО ОПРЕДЕЛЁННЫХ ПАРАМЕТРОВ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ

В рамках применимости глобальной и локальной ЛУМР общая площадь под кривой ЗКЗ равна критическому значению интенсивности высвобождения упругой энергии и определяется по формуле (1):

$$G_{IC} = \int_0^{\delta_{max}} \sigma(\delta) d\delta. \quad (1)$$

С другой стороны, производная параметра трещиностойкости по раскрытию КЗ позволяет определять ЗКЗ по формуле (2) [3]:

$$\sigma(\delta) = \frac{dG_{IC}}{d\delta}, \quad (2)$$

а локальная деформация материала δ_{IC} при предельной нагрузке σ_{IC} определяется формулой (3):

$$\delta_{IC} = \frac{kG_{IC}}{\sigma_{IC}}, \quad (3)$$

где k — коэффициент, зависящий от типа ЗКЗ: для экспоненциального закона $k = 1/e$, где $e = 2.71$ — основание натурального логарифма.

Таким образом, использование МКЗ, имплантированной в МКЭ, дает возможность, при известном ЗКЗ, оценивать трещиностойкость материала по уравнению (1), а по зависимости параметра трещиностойкости от раскрытия когезионной зоны и от локальной прочности материала рассчитывать, соответственно, ЗКЗ по уравнению (2) и его параметр δ_{IC} — по уравнению (3) при различных конфигурациях образов и модах нагружения [4].

Рассмотренные выше подходы и методы ЛУМР с имплантацией МКЗ в МКЭ широко и эффективно используются для анализа межслоевой трещиностойкости армированных конструктивных ПКМ на основе псевдохрупких матриц. Их использование для анализа трещиностойкости КС встречает некоторые ограничения, связанные с вязко-упругостью, работой адгезии и толщиной клеевого слоя, а также с возможностью двух типов разрушения КС — адгезионного (по межфазной границе склеиваемых поверхностей и клеевого слоя) и когезионного (по клеевому слою).

Очевидно, что подходы и методы ЛУМР с имплантацией МКЗ в МКЭ для анализа трещиностойкости конструктивных КС жестких склеиваемых материалов (субстратов с высоким модулем упругости) с помощью как хрупкого, так и нехрупкого

(вязко-упругого) клеевого слоя могут быть применены при обоих типах разрушения только при малой толщине клеевого слоя (порядка 200 мкм), когда он не вносит существенного вклада в общую жесткость КС и допускает применение подходов глобальной ЛУМР к определению нагрузок на трещину и, соответственно, к оценке глобальных параметров трещиностойкости КС.

В рамках применимости глобальной и локальной ЛУМР с использованием пакета ANSYS, нами разработана конечно-элементная 3D модель образца КС с заданной трещиной, нагружаемой по моде I, воспроизводящая условия стандартного испытания на трещиностойкость по моде I с использованием образца КС жестких пластин (алюминиевого сплава или слоистого ПКМ) с тонким, порядка 100 мкм клеевым слоем. Образец КС представляет собой двухконсольную балку (ДКБ) с заданной концевой трещиной, нагружаемой по моде I за ее концы (рис. 2).

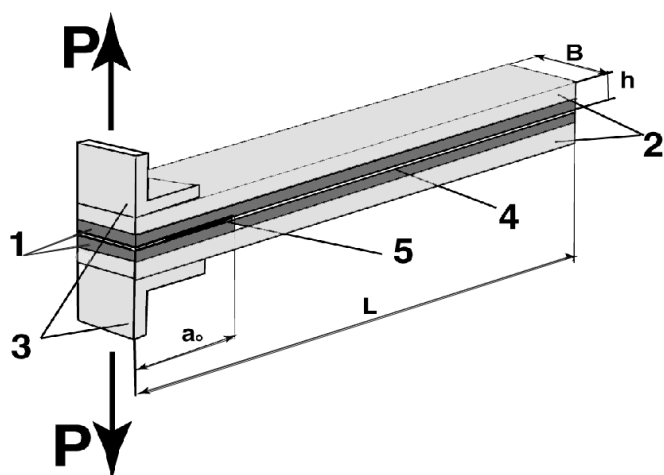


Рис. 2: Схематическое изображение образца КС в виде ДКБ: 1 — место задания начальной трещины, 2 — склеенные жесткие пластины, 3 — уголки для приложения нагрузки P , 4 — клеевой слой, 5 — начальная трещина длиной a_0 , h — полутолщина, L — длина и B — ширина образца соответственно

В разработанной модели когезионная зона представляет собой напряженный тонкий слой между пластинами субстрата впереди кончика трещины, поведение которого при нагружении образца описывается экспоненциальным ЗКЗ. Для получения достоверных численных результатов с использованием МКЗ, напряжения в КЗ должны быть точно представлены сеткой конечных элементов в этой зоне, т.е. сетка КЭ должна быть достаточно мелкой, чтобы по длине КЗ располагались необходимое число специальных интерфейсных элементов (ИЭ). В большинстве случаев для моделирования с приемлемой точностью достаточно использовать 3–4 ИЭ для покрытия всей длины КЗ [4,5]. При этом l_{cz} может быть определена по классической фор-

муле Баренблатта (4):

$$l_{cz} = \frac{\pi}{8} \frac{EG_{IC}}{\sigma_{IC}^2} \quad (4)$$

с использованием значений эффективного модуля упругости склеиваемых пластин (E) и экспериментально определенных значений локальной адгезионной прочности КС (σ_{IC}) и интенсивности высвобождения упругой энергии при росте трещины (G_{IC}), а количество ИЭ принимается $N_e = 4$.

Таким образом, целью данной работы является определение длины КЗ по экспериментально определенным свойствам образцов КС и формуле (4) и ее использование для определения длины ИЭ при заданном (рекомендованном) числе ИЭ, обеспечивающем достаточную точность оценки условий зарождения и развития межслоевой трещины при допустимом объеме вычислений при 3D численном моделировании данного образца КС.

В экспериментах по определению G_{IC} и σ_{IC} применяли промышленные наполненные клеи, используемые в качестве конструкционных в производстве аэрокосмических конструкций (марок ЭПК-1, ВК-9, К-300-61), а в качестве склеиваемых пластин (субстратов) — листы алюминиевого сплава Д-16 толщиной 2 мм.

Образцы КС в виде ДКБ (рис. 2) для определения G_{IC} по стандартной методике получали склеиванием пластин субстрата размером 110×20 мм с очищенной и обезжиренной поверхностью. Отверждение клеев после их нанесения на склеиваемые пластины и закрепления последних в струбцинах под давлением примерно 0.5 кгс/см² проводили при комнатной температуре в течение 24 часов. Образцы на основе клея К-300-61 дополнительно термообработывали в течение 3 часов при 110°C. Толщину клеевой прослойки между пластинами задавали с помощью закладных фторопластовых пленок толщиной 200 мкм, которые использовали также для задания искусственной трещины в клеевом соединении. Испытание образцов проводили при растяжении (по моде I) при скорости движения траверсы разрывной машины 0.5 мм/мин, получая ступенчатую кривую в координатах «усилие P — раскрытие трещины Δ » в месте приложения нагрузки, которую определяли по перемещению захватов разрывной машины. Длину трещины a определяли с помощью катетометра. По максимальной нагрузке, соответствующей началу критического роста трещины, с учетом ее начальной длины и геометрических параметров образца ДКБ определяли энергетический параметр трещиностойкости G_{IC} .

Для экспериментального определения локальной адгезионной прочности КС (σ_{IC}) использовали метод нормального отрыва склеиваемых пластин аналогично определению локальной межслоевой прочности слоистых ПКМ [5]. Для этого склеивались две пластины алюминиевого сплава размером 40×20, с алюминиевым уголком для закрепления в захватах разрывной машины. После нанесения клеевого слоя в зоне скле-

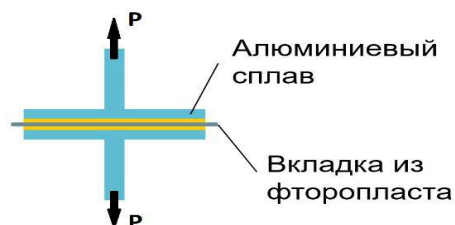


Рис. 3: Модель образца КС при испытании на растяжение по моде I

Таблица I: Экспериментально определенные значения G_{IC} и σ_{IC} КС на основе трех клеев и рассчитанные по ним размерные параметры КЗ

Клей	G_{IC} , Дж/м ²	σ_{IC} , МПа	δ_{IC} , мкм	l_{cz} , мм
ЭПК-1	214	9	10.8	0.91
ВК-9	323	6	19.9	1.69
К-300-61	183	13	8.9	0.76

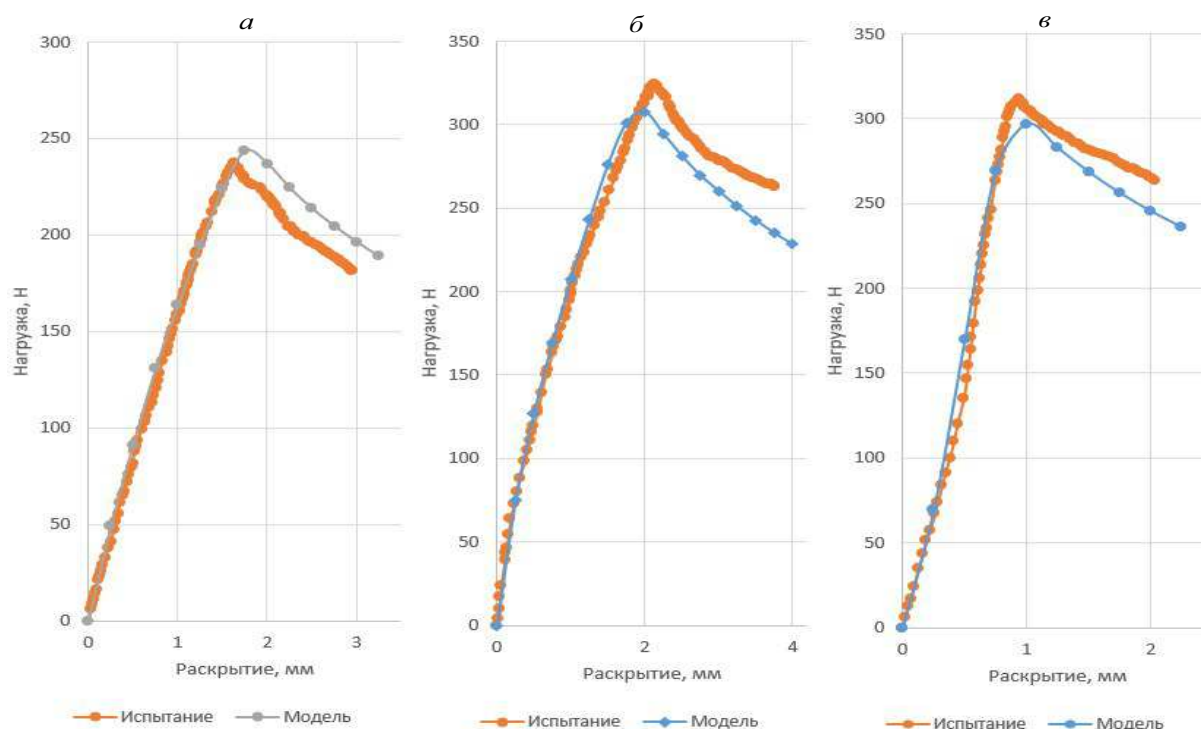


Рис. 4: Сравнение кривых нагрузка–раскрытие трещины, полученных в результате эксперимента и моделирования для КС на основе клеев К-300 (а), ВК-9 (б) и ЭПК-1 (в)

ивания прокладывали фторопластовую пленку толщиной 10 мкм с вырезанным посередине квадратом 10×10 мм (рис. 3, а, б).

Отверждение клеев после закрепления пластин осуществляли по тем же режимам, что и при получении образцов в виде ДКБ. Образцы разрывали при заданной скорости движения траверсы разрывной машины

(0.5 мм/мин), и по максимальному значению усилия и площади склейки рассчитывали σ_{IC} .

Полученные средние значения G_{IC} и σ_{IC} и рассчитанные с их помощью по формулам (3) и (4) значения деформации раскрытия КЗ (δ_{IC}) при предельном напряжении в ней, а также длины когезионной зоны l_{cz} для КС на основе трех клеев обобщены в таблице.

Полученные данные использовали в 3D модели ДКБ образца клеевого соединения алюминиевых пластин, нагружаемого по моде I с экспоненциальной формой ЗКЗ. Размеры модельного аналогичны размерам физического образца. Из предложенных в пакете прикладных программ ANSYS® типов конечных элементов в модели использовались Solid 185 и Inter 205.

Численное моделирование производилось следующим образом:

- Командой APDL задавали экспоненциальный ЗКЗ и вводили необходимые экспериментально определённые параметры σ_{IC} и δ_{IC} для каждого типа клея, а также значения модуля упругости Юнга, модуля сдвига и коэффициента Пуассона для алюминиевого сплава Д-16.
- Программными средствами задавали граничные условия для напряженного тонкого слоя между пластинами субстрата впереди кончика трещины и производили разбиение этого слоя на четыре конечные интерфейсные элементы (формирование сетки) по длине КЗ для каждого клеевого соединения.
- Задавали нагрузку и направление движения элементов КС, вводили параметры расчёта.

После запуска программы виртуальный образец расслаивается под действием нагрузок, что фиксируется в виде кривых «нагрузка–раскрытие трещины» у ее концов. Далее, с использованием постпроцессора программного комплекса результаты численного моделирования анализируются и сопоставляются с результатами физических экспериментов (рис. 4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты экспериментальных и численных исследований показывают возможность использования ЗКЗ в моделях разрушения КС в результате возникновения и роста трещины.

Предложенный подход, использования в конечно-элементной 3D модели экспериментально полученных параметров когезионной зоны с заданным экспоненциальным ЗКЗ поведения материала, позволил определить нагрузку начала расслоения.

Результаты численного моделирования хорошо согласуются с результатами экспериментов, при количестве ИЭ по длине когезионной зоны равно 4-м, погрешность определения нагрузки приводящей к началу роста трещины не превышает для ЭПК-1 — 5%, ВК-9 — 7%, К-300-61 — 4%.

-
- [1] Кинлок Э. Адгезия и адгезивы. Наука и технология. М.: Мир, 1991.
- [2] Бабаевский П. Г., Кулик С. Г. Трещиностойкость отвержденных полимерных композиций. М.: «Химия», 1991.
- [3] Barenblatt G. I. *Advances in Applied Mechanics*. 1962. 7. P. 55.
- [4] Hillerborg A., Modöer M., Petersson P.-E. *Cement and Concrete Research*. 1976. 6, N 6. P. 773.

- [5] Бабаевский П. Г., Салиенко Н. В., Новиков Г. В. Экспериментальное определение параметров когезионной зоны для слоистых композитов. / Материалы XVIII Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации–2017». Пермь: ПНИПУ, 2017, С. 20.

Analysis of the crack resistance of adhesive joints using the finite element method and the cohesive zone model

A. A. Ustinov^a, P. G. Babaevsky^b, N. A. Kozlov^c, N. V. Salienko^d

Moscow Aviation Institute (National Research University) (MAI), the Institute of number 11, Department of Technology of composite materials, structures and microsystems. Moscow, 121552, Russia

E-mail: ^austinershovskiy@yandex.ru, ^bbabaevskiy@matr.ru, ^cmail-kna@mail.ru, ^dintdep@matr.ru

The method of cohesive zones allows us to evaluate the stability of the material, both to the beginning of the growth of an existing crack, and to the occurrence and development of defects in places of stress concentration. The ability to reliably determine the destruction parameters of adhesive joints (AJ) and predict the behavior of structural elements with their use under loading is an important task for the aircraft industry. It is proposed to use in the finite-element 3D model of stratification according to mode I of the AJ sample in the form of a two-console beam, the length of the cohesive zone (l_{cz}) calculated from the experimentally determined parameters — the local interlayer cohesive strength of the material (σ_{IC}) and the intensity of release of elastic energy (G_{IC}). The calculated length of the cohesive zone is applied in the model to calculate the minimum number of finite elements at their optimal size, which ensures higher accuracy of calculations of the main parameters of crack resistance of samples of laminated carbon fiber while minimizing the amount of calculations. The objects of study were AJ sheets of aluminum alloy D-16, which were glued together with dispersion-filled adhesives of industrial grades EPK-1, VK-9, and K-300-61, which are widely used as

structural adhesives in the production of aerospace structures. As a result of the research, the main parameters of crack resistance were determined and the optimal length of the final cohesive element was selected, and the resulting model accurately describes the process of crack growth. The results obtained correlate well with the results of experiments.

PACS: 88.20.rg

Keywords: adhesive joints, dual console beam, parameters of the cohesive zone, experimental techniques, finite element 3D model.

Received 11 March 2019.

Сведения об авторах

1. Бабаевский Петр Гордеевич — доктор техн. наук, профессор, зав. кафедрой тел.: (499) 141-94-24, e-mail: babaevskiyg@mati.ru.
 2. Козлов Николай Алексеевич — доктор техн. наук, доцент, тел.: (499) 141-94-24, e-mail: mail-kna@mail.ru..
 3. Салиенко Николай Викторович — канд. техн. наук, доцент, тел.: (499) 141-94-24, e-mail: intdep@mati.ru.
 4. Устинов Андрей Анатольевич — магистр, инженер; e-mail: ustinershovskiy@yandex.ru.
-