

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ УСТАНОВКИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТЕРЖНЕЙ АРМИРУЮЩИХ КАРКАСОВ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Расширение области эффективного применения перспективного углерод-углеродного композиционного материала (УУКМ) на основе стержневых армирующих каркасов (АК) сдерживается длительностью технологических процессов их производства и высокой стоимостью. Снижение сроков производства и стоимости материала возможно за счет автоматизации наиболее трудоемких технологических процессов сборки стержневых АК.

В работе [1] применено разделение процесса сборки стержневых АК на две операции – установка вертикальных стержней в направляющие плиты и укладка слоев горизонтальных стержней. Проведенные исследования [1] позволили определить компоновку и принцип работы установки для укладки слоев горизонтальных стержней. Исследованию установки вертикальных стержней в направляющие плиты посвящена работа [2]. Принятый в ней только экспериментальный подход к исследованию процесса с применением дорогостоящего вибростенда ST-3000 позволил подобрать режимы вибрации, позволяющие заполнять 95% отверстий направляющей плиты стержнями в продолжение 5 минут. Но оставшиеся 5%, а это 760 стержней при сборке АК цилиндра с основанием $\varnothing 240$ мм, и 3000 стержней при сборке АК кольца с основанием $\varnothing 530$ мм и отверстием $\varnothing 240$ мм, необходимо заполнять вручную, так как более длительный процесс вибрации не изменял результата.

Целью данной работы является поиск промышленно пригодного технологического процесса установки вертикальных стержней АК и определение схемы установки для его реализации на основании теоретических исследований виброперемещения стержней в бункере и экспериментальных исследований влияния параметров вибрации на эффективность и длительность процесса.

Вибрация давно применяются в технике и технологии обработки деталей, однако процессы, происходящие при виброустановке вертикальных стержней АК, не имеют аналогов в машиностроении и не изучены [3]. Для раскрытия закономерностей движения стержней по вибрирующей поверхности и поиска рациональных параметров вибрации необходимо описание движения массива стержней в зависимости от направления и интенсивности вибрации.

Перемещение стержней под действием вибрации

После загрузки часть стержней окажется случайным образом установленной в отверстия, а часть будет опираться на поверхность

направляющей плиты (рис. 1). Вибрация воздействует на массив стержней, и на каждый стержень действуют движущие силы, силы сопротивления движению и силы инерции, от их соотношения зависят направление и величина смещения стержня.

Для стержня направления движения и действия сил, как и силу веса, будем считать положительными. Дифференциальное уравнение относительного движения стержня по поверхности направляющей плиты аналогично [3], не учитывая взаимодействие стержней и представляя стержень в виде материальной частицы, запишем в виде

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= mA\omega^2 \cos \beta \sin \omega\tau - mg \sin \alpha + F_{mp}; \\ m\ddot{y} &= mA\omega^2 \sin \beta \sin \omega\tau - mg \cos \alpha + N, \end{aligned} \quad (1)$$

где m – масса стержня;

A , ω – соответственно амплитуда и частота колебаний;

β – угол вибрации;

α – угол наклона плоскости к горизонту;

g – ускорение свободного падения;

N – реакция поверхности;

F_{mp} – сила трения.

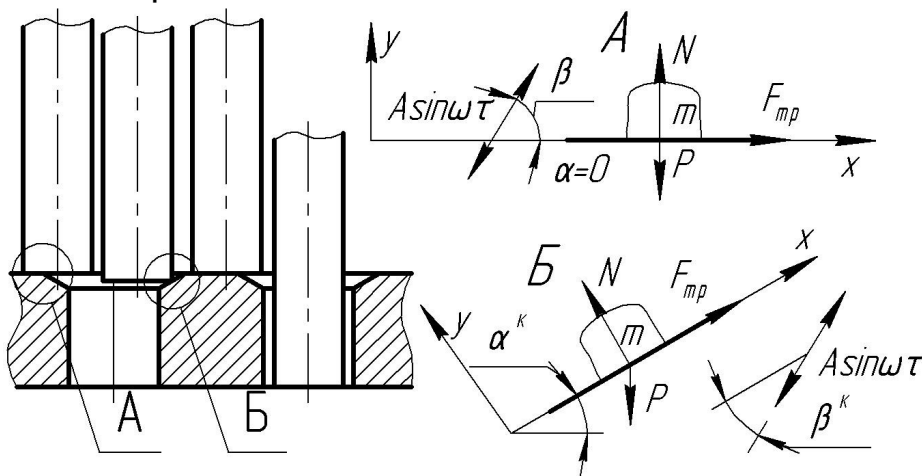


Рисунок – 1 Схема расположения стержней на вибрирующей поверхности

Минимальное повреждение стержень испытывает при движении без соударения с вибрирующей поверхностью, т.е. при $y \equiv 0$, тогда

$$F_{mp} = \begin{cases} -fN \text{ при } \dot{x} > 0; \\ fN \text{ при } \dot{x} < 0, \end{cases} \quad (2)$$

где f – коэффициент трения скольжения;

$$N = N(\tau) = mg \cos \alpha - mA\omega^2 \sin \beta \sin \omega\tau. \quad (3)$$

Стержень будет двигаться без отрыва от поверхности, если $N(\tau) > 0$. Тогда можно записать

$$\varpi = \frac{A\omega^2 \sin \beta}{g \cos \alpha} \leq 1. \quad (4)$$

Из (1), учитывая (2) и (3), получаем уравнение скольжения стержня по поверхности без отрыва ($y \equiv 0$):

$$\ddot{x} = -g \frac{\sin(\alpha \pm \zeta)}{\cos \zeta} + A\omega^2 \frac{\cos(\alpha \mp \zeta)}{\cos \zeta} \sin \omega \tau, \quad (5)$$

где $\zeta = \arctg f$ – угол трения скольжения; верхние знаки соответствуют скольжению частицы вперед ($\dot{x} > 0$), а нижние – назад ($\dot{x} < 0$).

Решаемая задача с точки зрения математики сводится к изучению решений нелинейных дифференциальных уравнений, которые в каждой из определенных частей фазового пространства являются линейными, но имеют в каждой такой части разную аналитическую запись и различный порядок. Аналитические решения подобной задачи могут быть выполнены обратным методом [4], а также методами поэтапного интегрирования, точечного отображения и др. или приближенными методами – гармонического баланса и прямого разделения баланса.

Условия существования и устойчивости всех возможных установившихся режимов движения для частицы без отрыва, выраженные через безразмерные параметры, приведены в работе [3]:

$$k'_{1\pm} = \frac{g \sin(\alpha \pm \zeta_1)}{A\omega^2 |\cos(\beta \mp \zeta_1)|};$$

$$k'_{\pm} = \frac{g \sin(\alpha \pm \zeta)}{A\omega^2 |\cos(\beta \mp \zeta)|}, \quad (6)$$

где $\zeta_1 = \arctg f_1$ – угол трения покоя.

Все регулярные движения имеют период изменения движения, совпадающий с периодом колебаний, которые разделены на четыре вида [3] с двумя подвидами для 3-го и 4-го режимов. В режиме 1 движение происходит вперед и назад с остановками, при переходе в режим 2 – попеременное движение с мгновенными остановками. В режиме 3 при движении преобладает смещение в одном из направлений, только режим 4 приводит к скольжению в одном направлении.

С учетом сложности определения коэффициентов трения контактирующих поверхностей для приближенных расчетов допустимо коэффициенты трения покоя и трения скольжения считать равными, при этом из (6) $k'_{1\pm} = k'_{\pm}$. Снижение количества безразмерных параметров

позволяет наглядно представить области установившихся режимов (рис. 4, [3]).

Анализируя возможные законы перемещения стержней на поверхности плиты ($\alpha = 0$), можно сделать заключение о том, что попаданию стержня в направляющий конус и отверстие с равномерностью их заполнения по всем направлениям будут соответствовать законы 1 и 2, приводящие к поступательному равномерному движению стержней вперед и назад. Такие законы движения на основании (6) при условии $k'_+ = -k'_-$ получим при $\beta \rightarrow 0$. В режиме 2 смещение стержня в одном направлении составит:

$$L_+ = L_- = 2A\sqrt{1 - (0,5\pi z')^2}. \quad (7)$$

Смещение стержня в режиме 1 определяется по графикам безразмерного перемещения за один этап скольжения, что существенно затрудняет получение закономерностей влияния параметров вибрации на смещение стержней.

Стержень, попавший в направляющий конус, должен перемещаться только по направлению к отверстию (рис. 2, вид Б), следовательно, реализуется закон движения 4Б (рис. 4, [3]). Параметрами движения стержня по конусу будут безразмерные параметры

$$k'_{\pm} = \frac{g \sin(\alpha - \alpha^K \pm \zeta)}{A\omega^2 |\cos(\beta - \alpha^K \mp \zeta)|}; \quad (8)$$

где α^K – угол направляющего конуса к горизонту.

Так как все стержни находятся на одной вибрирующей поверхности, условие, ограничивающее диапазон рациональных параметров вибрации, представим в виде

$$0 < -k'_- = k'_+ < 1; \quad (9)$$

$$(-k'_{-K} < 1 \text{ и } k'_{+K} > 1) \text{ или } (-k'_{-K} < 0 \text{ и } k'_{+K} > 0).$$

Экспериментальное исследование процесса установки вертикальных стержней вибрацией

При описании законов перемещения стержней по направляющей плите были сделаны допущения, которые могут влиять на реальное поведение стержней под действием вибрации. Для определения достоверности теоретических зависимостей необходимо проведение экспериментальных исследований.

Исследования операции заполнения направляющих плит

вертикальными стержнями методом вибропросеивания проводились на спроектированной лабораторной установке, схема которой показана на рис. 2. На основании 1 закреплены две направляющие плиты 2 с совмещенными отверстиями для стержней и бункер 4 для загрузки стержней 3. Величина перемещения стержней ограничена плитой 5. Возвратно-поступательные движения передаются основанию 1 от эксцентрика 8 через коромысло 7, движение основания 1 происходит по направляющим 6. Вращение эксцентрик 8 получает от привода 9.

Установка предназначена для моделирования вибрации в горизонтальной плоскости с частотой 10...50 Гц и амплитудой 0,2...1,2 мм. Частота вибрации варьировалась скоростью вращения привода, а амплитуда – набором сменных эксцентриков.

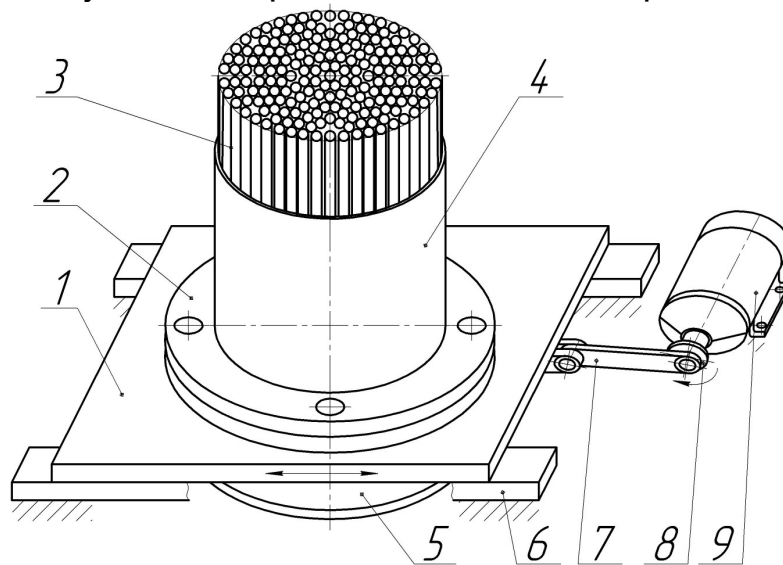


Рисунок 2 – Схема лабораторной установки для виброустановки вертикальных стержней АК

Эффективность операции определяется как отношение заполненных отверстий стержнями к общему количеству отверстий плиты и выражается в процентах (η_{yc}). В процессе экспериментальных исследований оценивалось влияние соотношения $k_d = \frac{d_{max}}{d_n}$, где d_{max} – максимальный размер сечения стержня, d_n – диаметр отверстий плиты, коэффициента загрузки бункера стержнями (k_3), технологических параметров процесса вибрации – частоты (ω) и амплитуды (A), а также времени вибрации (τ) на эффективность операции установки стержней в плиту (η_{yc}).

Стержни, поступающие на сборку, проходили выборочный контроль геометрических параметров. Эксперименты проводились на наиболее распространенном типоразмере стержней $\varnothing 1,16 \pm 0,04$

Основным фактором, влияющим на эффективность операции установки стержней в плиту, является соотношение диаметров стержней в партии и диаметра отверстия в сборочных плитах. Это соотношение усугубляется еще и тем, что стержень имеет максимальный размер у торца, где его сечение после обрезки деформируется, приближаясь по форме к эллипсу. Из анализа полученных данных [5] можно сделать вывод о том, что при обрезке стержней сечение торца приобретает форму эллипса, больший диаметр которого в среднем на 10% больше диаметра стержня.

Перед началом операции стержни помещаются в загрузочный бункер 4 (рис. 2), при этом необходимое количество стержней для заполнения отверстий по площади сечений занимает менее 20% от площади плиты. При таком коэффициенте загрузки бункера стержни невозможно равномерно распределить по площади плиты и сохранять их вертикальное положение в процессе установки. Поэтому заполнение бункера стержнями должно быть избыточное с предварительной их вертикальной ориентацией. Наличие избыточных стержней будет способствовать равномерности заполнения ими площади плиты, и одновременно они будут служить вертикальными направляющими. Коэффициент загрузки бункера определялся по соотношению площади сечения связанной партии стержней к площади направляющей плиты, заполняемой стержнями.

При проведении экспериментов в течение трех минут задавалась вибрация с плавным нарастанием частоты вибрации до $\omega = 50$ Гц и убыванием, амплитуда составляла $A = 0,8$ мм. Варьируемым параметром в данном эксперименте был диаметр отверстий в плитах, который изменялся в пределах от максимального диаметра стержня (d_{max}), в данном случае 1,2 мм, до $1.2 d_{max} - 1,5$ мм. Полученные результаты приведены на рис. 3, кривая 1.

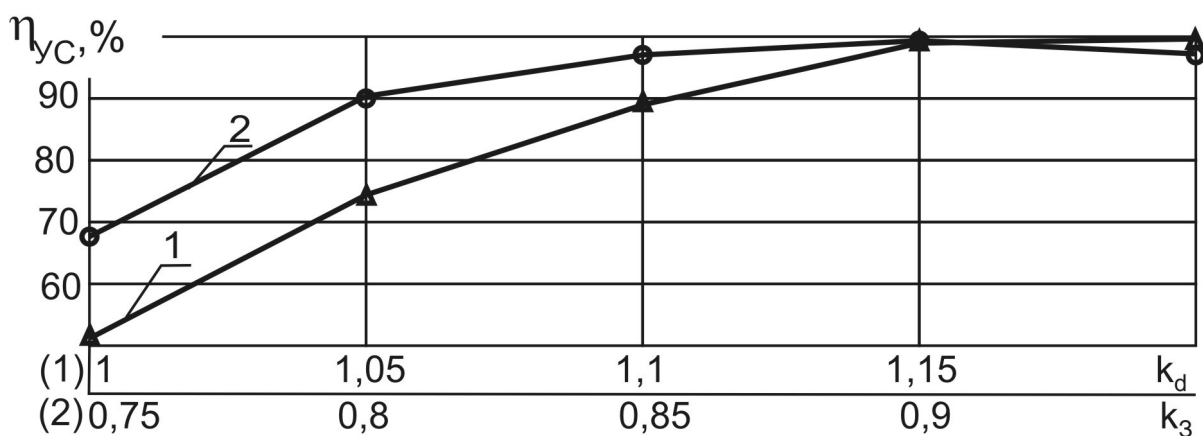


Рисунок 3 – Зависимость заполнения плит стержнями от коэффициента отношения диаметров (1) и загрузки бункера стержнями (2)

Полученные экспериментальные данные позволяют рекомендовать $d_{\text{п}} = 1.15d_{\text{max}}$, уменьшение диаметра отверстий в плитах приводит к заклиниванию стержней в направляющем конусе отверстий по причине большего диаметра торца стержня или наличия торчащих волокон. При $d_{\text{п}} = 1.15d_{\text{max}}$, в данном случае 1,4 мм, когда диаметр отверстия превышает максимальный размер сечения торца стержня в партии, незаполненными остаются менее 1% отверстий. Диаметр отверстия $1.15d_{\text{max}}$ является рациональным, поскольку его увеличение уже неэффективно и существенно ослабляет прочность направляющей плиты.

Исследования зависимости $\eta_{\text{yc}} = f(k_3)$ проводились с тем же массивом стержней, при тех же параметрах и времени вибрации, на плитах с диаметром отверстий под стержни 1,4 мм. Результаты исследования показаны на рис. 3, кривая 2. Эксперимент проводился с изменением k_3 от 0,75 до 0,95. Как следует из графика $\eta_{\text{yc}} = f(k_3)$, рациональный коэффициент загрузки бункера равен 0,9. Снижение k_3 приводит к разориентации стержней и уменьшению значений η_{yc} .

При составлении плана эксперимента по определению рациональных параметров вибрации (частоты ω и амплитуды A) были определены режимы перемещения стержней по плите в виде кривых, ограничивающих зоны перехода из одного режима в другой (рис.4), расчеты выполнялись по зависимости (6), экспериментально определенный коэффициент трения скольжения стержней по плите составил $f = 0,42$. Точками обозначены параметры вибрации, принятые для реализации в эксперименте, отмеченные параметры отвечают условиям ограничения (9).

При проведении экспериментов устанавливался эксцентрик с эксцентриситетом, равным заданной амплитуде вибрации, и изменением скорости вращения привода достигалась заданная частота колебаний. Эксперименты проводились с отобранным массивом стержней, коэффициент загрузки бункера и диаметр отверстий в плитах соответствовал ранее определенным рациональным значениям, время вибрации – 3 мин. Результаты в виде графиков показаны на рис. 5.

Как следует из результатов эксперимента, рациональные значения параметров вибрации – $A = 0,6$ мм, $\omega = 45$ Гц или $A = 0,8$ мм, $\omega = 40$ Гц. При этих значениях стержни воспринимают равное воздействие, и результат заполнения отверстий плит изменялся в равных пределах.

Снижение заполнения плит стержнями при увеличении амплитуды объясняется тем, что при больших перемещениях часть стержней, удерживаемых массивом, не успевают опуститься в направляющий

конус отверстия.

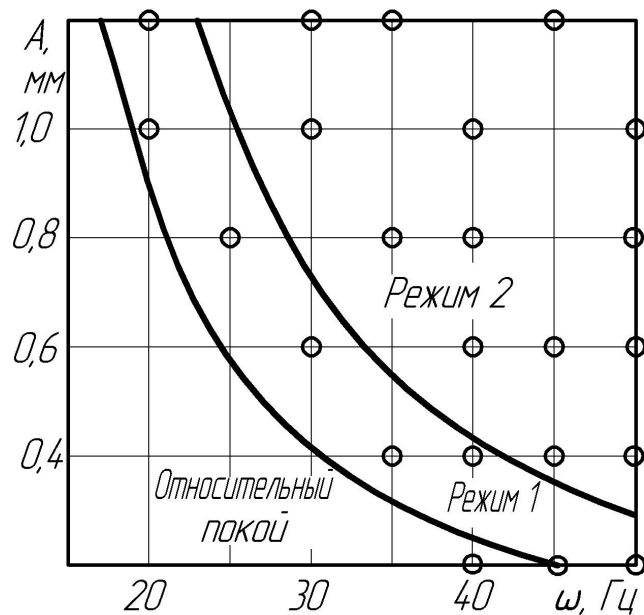


Рисунок 4 – Влияние параметров вибрации на режим движения стержней по плите

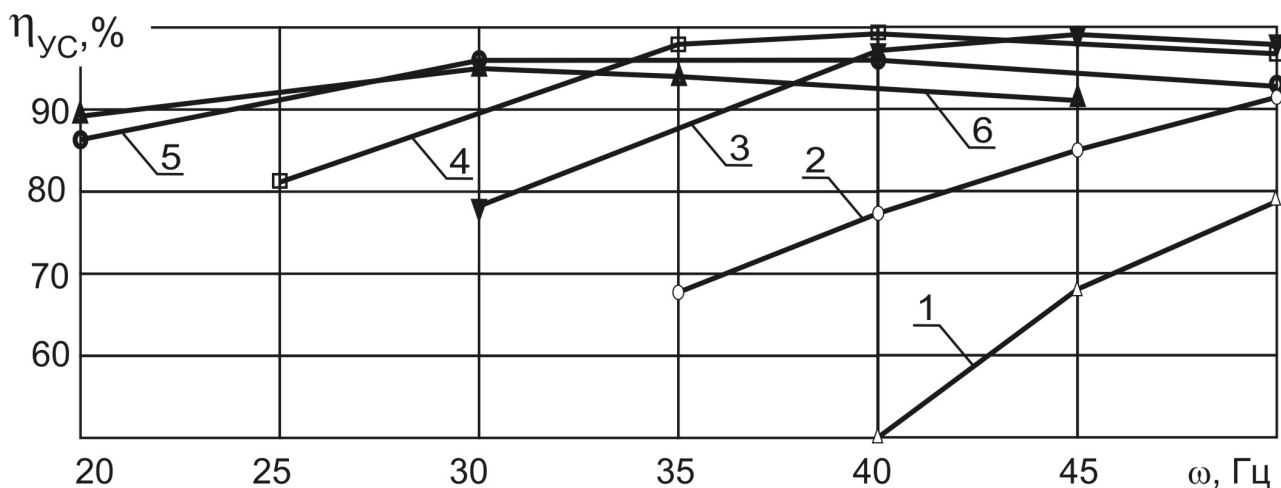


Рисунок 5 – Зависимости заполнения сборочных плит стержнями от параметров вибрации: 1 — $A = 0,2$ мм; 2 — $A = 0,4$ мм; 3 — $A = 0,6$ мм; 4 — $A = 0,8$ мм; 5 — $A = 1,0$ мм; 6 — $A = 1,2$ мм

Снижение воздействия на стержни ниже рекомендованных приводит к недостаточному перемещению стержней по плите и, как следствие, малому заполнению отверстий плиты.

Исследование динамики заполнения отверстий плиты стержнями проводили на определенных ранее параметрах. Привод включали на 20 с. после остановки подсчитывали количество заполненных отверстий стержнями, затем повторно включали на 20 с и т.д.

Результаты показали, что после загрузки бункера около 40% отверстий заполняются стержнями, до 93% — после первых 20 с, в

продолжении следующих трех включений количество заполненных отверстий приближается к 100%.

Замечено, что если имитировать изменение направления вибрации, направляющие плиты с бункером после 20 с вибрации повернуть относительно основания на 30° , существенно увеличивается динамика заполнения и достаточно следующих 20 с для полного заполнения всех отверстий плиты стержнями.

Выводы

1. Исследование закономерностей перемещения стержней по направляющей плите позволило определить принципиальную схему вибростенда и диапазон параметров вибрации, создающих необходимые законы перемещения стержней.

2. Экспериментально апробирован вибростенд для установки вертикальных стержней АК УУКМ, полученные параметры вибрации обеспечивают практически 100%-е заполнение отверстий направляющей плиты стержнями, продолжительность воздействия вибрации 40 с не вызывает повреждений торца стержня.

Список использованных источников

1. Чесноков А.В. К вопросу автоматизации сборки стержневых армирующих каркасов / А.В. Чесноков // Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – № 6 (124) Ч. 2. – Луганськ, 2008. – С. 126-130.

2. Фрегер Г.Е. Исследование процесса механизации сборки стержневых армирующих каркасов УУКМ структуры 3D и 4D-Л // Г.Е. Фрегер, А.В. Чесноков // Вопросы атомной науки и техники. – 1999. – № 4, – С. 79-84.

3. Вибрации в технике: справ.: в 6 т. / ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). – М.: Машиностроение, 1981. – Т. 4: Вибрационные процессы и машины / под ред. Э.Э. Лавендела. – 509 с.

4. Вибрации в технике: справ.: 6 т. / ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). – М.: Машиностроение, 1979. – Т. 2. Колебания нелинейных механических систем / под ред. И.И. Блехмана. – 351 с.

5. Чесноков А.В. Исследование процесса резания углепластиковых стержней на этапах изготовления армирующих каркасов / А.В. Чесноков // Проектирование и производство конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. – Вип. 1 (57).– Х. 2009. – С. 65-69.

Поступила в редакцию 01.12.2009.

Рецензент: д-р техн. наук, ст. науч. сотр.

В.Ф. Забашта, ОАО «Украинский НИИ авиационной технологии», г. Киев