Для цитирования: *Устарханов О.М., Муселемов Х.М., Абакаров М.С.**,** Алибеков М.С. Расчет стойкости трехслойной конструкции пирамидальным дискретным заполнителем к действию динамической нагрузки с применением метода конечных элементов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46 (3):167-176. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-167-176*
For citation: *O.M. Ustarkhanov, H.M. Muselemov, M.S. Abakarov, M.S. Alibekov Estimation of the Resistance of a three-layered structure with a pyramid discontinuous filler to dynamic stress using the Finite Element Method. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46(3):167-176. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-167-176*

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 624.011.1
DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-3-167-176

РАСЧЕТ СТОЙКОСТИ ТРЕХСЛОЙНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПИРАМИДАЛЬНЫМ ДИСКРЕТНЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ К ДЕЙСТВИЮ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Устарханов О.М., Муселемов Х.М. Абакаров М.С., Алибеков М.С.
Дагестанский государственный технический университет,
367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. *В данной статье рассматривается возможность повышения стойкости трехслойных панелей с пирамидальным заполнителем, наполненной волокнистым материалом, к действию сосредоточенных динамических нагрузок. Динамический удар, проникания твердого тела и пробивания сплошной преграды всегда представляли интерес, прежде всего в военном деле, но в последнее время они привлекли внимание исследователей различных промышленных проблем.* ***Метод.*** *Расчёт проводиться методом конечных элементов, который в настоящее время находит широкое применение в различных областях, в том числе в строительстве. В этой статье рассматривается возможность расчета движения твердого тела в волокнистом материале при помощи МКЭ, а именно при помощи ПК ЛИРА-САПР.* ***Результат.*** *На построенных моделях видно как ударник перемещается внутри волокнистого материала, т.е. использование ПК ЛИРА-САПР позволяет оценить работу наполнителя при движении в нем твердого тела. Результаты расчета перемещения ударника в волокнистом материале в зависимости от скорости тела (ударника), плотности наполнителя (волокна) показаны на рисунках.*

Вывод. *Проведённые численные исследования показали, что расхождение между результатами расчета трехслойной конструкции при действии динамических нагрузок с помощи МКЭ и с помощи аналитических зависимостей составил около 10%.*

**Работа выполнена при финансовой поддержке грантом Президента Российской Федерации (МК-6112.2018.8).*

Ключевые слова*: метод конечных элементов, динамический удар, проникание, волокнистый материал, пробивание*

BUILDING AND ARCHITECTURE

ESTIMATION OF THE RESISTANCE OF A THREE-LAYERED STRUCTURE WITH A PYRAMID DISCONTINUOUS FILLER TO DYNAMIC STRESS USING THE FINITE ELEMENT METHOD

O.M. Ustarkhanov, H.M. Muselemov, M.S. Abakarov, M.S. Alibekov
Daghestan State Technical University,
70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract Objectives. *In this research, we set out to explore the possibility of increasing the resistance of three-layered panels with a pyramid filler filled with fibrous material to dynamic loads. Although issues associated with dynamic impact, penetration of solid bodies and breaking of solid barriers have always been of interest, particularly in military affairs, they are increasingly attracting the attention of researchers investigating various industrial problems.* ***Method.*** *A calculation was performed using the finite element method (FEM), which is widely used in various areas including construction. The possibility of calculating the movement of a solid body in fibrous material using the FEM, namely using the LIRA-SAPR software, was considered.* ***Results.*** *From the constructed models, it can be seen how the striker moves inside the fibrous material. Therefore, using the SC LIRA-SAPR allows the work of the filler to be assessed while a solid body moves inside it. The results of the calculation of striker movement in fibrous material depending on the speed of the body (striker) and the density of the filler (fibre) are shown in figures.* ***Conclusion.*** *The conducted numerical studies showed that a discrepancy between the calculation results for a three-layered structure under dynamic loads using the FEM and analytical dependencies was about 10%.*

Acknowledgments *The work was carried out with financial support from the President of the Russian Federation (Grant MK-6112.2018.8).*

Keywords*: finite element method, dynamic impact, penetration, fibrous material, breaking*

Введение. Настоящее время в строительстве и других областях находят широкое применение многослойные конструкции, в том числе трехслойные [12]. Обладая рядом несомненных преимуществ, как: высокая жесткость, прочность, легкость и др. трехслойные конструкции (ТК) слабо сопротивляются при действии сосредоточенных сил, как динамических, так и статических.

Постановка задачи. В процессе эксплуатации на несущие и ограждающие конструкций, применяемые в различных зданиях, сооружениях, на судостроительную и машиностроительную технику, на космические аппараты и др. могут воздействовать различные тела, летящие с высокой скоростью. В этом случае эти конструкции (в том числе трехслойные конструкции) должны обладать определенной стойкостью к действию динамических сил. В то же время, сохраняя высокие требования к жесткости, прочности, легкости и при действии статических сил. В статье рассматривается возможность применения метода конечных элементов (МКЭ) при расчете трехслойных конструкций (ТК) на действие динамических сосредоточенных сил.

Динамический удар, проникания твердого тела и пробивания сплошной преграды всегда представляли интерес, прежде всего в военном деле, но в последнее время они привлекли внимание исследователей различных проблем.

Проникание может быть определено как перемещение тела в преграде без выхода его из последней; это явление связано либо с вдавливанием ударника, либо с его отскоком и образованием кратера. С другой стороны, пробивание обозначает полный проход ударника через преграду. До сих пор еще не найдено полное описание сложного механизма, связанного с этим процессом, хотя за многие годы было накоплено большое число эмпирических сведений в области баллистики. Эта информация, в первую очередь, полученная в связи с опытным изучением проникания снарядов может быть найдена в ряде источников [4,9-11,13-18]. Если рассматри-

вать процесс динамического воздействия ударника с многослойной конструкцией то полное исследование, включающее все другие явления, связанные с пробиванием, практически почти неосуществимо и необходимы существенные упрощения, для того чтобы создать удовлетворительную аналитическую модель. В этом случае движению ударника сопротивляются несколько слоев с различными физико-механическими характеристиками.

Для повышения стойкости трехслойных панелей, к действию сосредоточенных динамических нагрузок нами была принята ТК с пирамидальным заполнителем, наполненной волокнистым материалом (рис.1). Работ, посвященных расчету трехслойных конструкций на действие динамических сосредоточенных нагрузок немного, так как эта область еще не полностью изучена. Сейчас эта область, как было отмечено выше, считается перспективной и весьма актуальной.

Методы исследования. Решение трехмерных уравнений движения тела в многослойных оболочек сопряжены со значительными трудностями и получены для ряда частных случаев [1,2,6,7], поэтому важным для решения практических задач являются разработка и решения равнений движения многослойных оболочек, построенных на основе приближенных подходов.

Одним из таких методов является метод конечных элементов, который в настоящее время находит широкое применение в различных областях, в том числе строительстве [3,5,8]. В этой статье рассматривается возможность расчета движения твердого тела в волокнистом материале при помощи МКЭ, а именно при помощи ПК ЛИРА. В качестве многослойной оболочки в статье принят трехслойный элемент с пирамидальным заполнителем, наполненный волокнистым материалом.

Геометрическая форма пирамидальной ячейки и фрагмент трехслойной конструкции показаны на рис. 1.

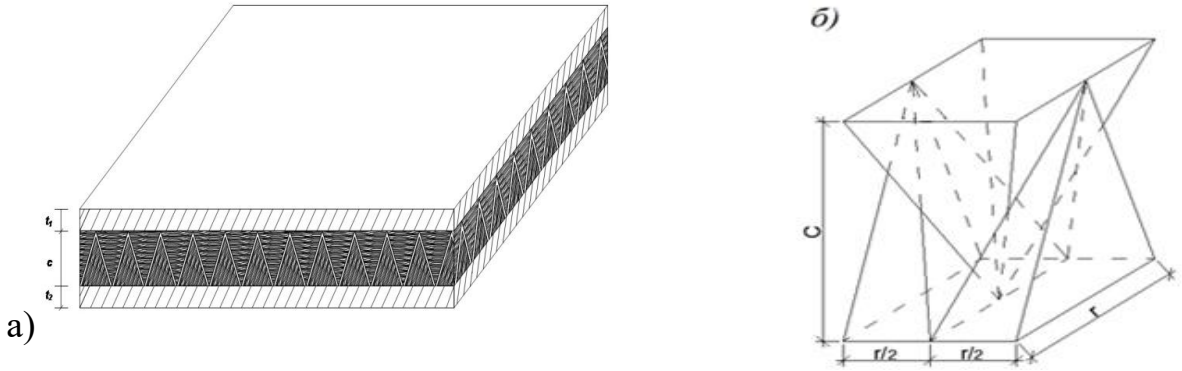

Рис.1. Фрагмент трехслойной конструкции (а) и геометрическая форма (б) пирамидальной ячейки

Fig. 1. Fragment of a three-layer structure (a) and geometric shape (b) of a pyramidal cell

Расчетная схема пирамидальной ячейки, для расчета по МКЭ, показана на рис. 2. На рис.1 элементарная ячейка разбита на вертикальные и горизонтальные элементы. Внешняя нагрузка через несущие слои действует на ячейку. В примере, несущие слои (горизонтальные пластины) имеют толщину 1мм, материал - алюминий АМГ2-Н (E=69000МПа, ν=0,35, ρ=26,8кН/м3).

Сотовый пирамидальный заполнитель (вертикальные пластины) изготовлен из сплава алюминия Д16-АТ (E=69000МПа, ν=0,35, ρ=26,8кН/м3). Толщина листов сплава алюминия равна 0,24мм. Размеры грани пирамидальной ячейки $r = 1{,}25$ см, $c = 6{,}00$ см;

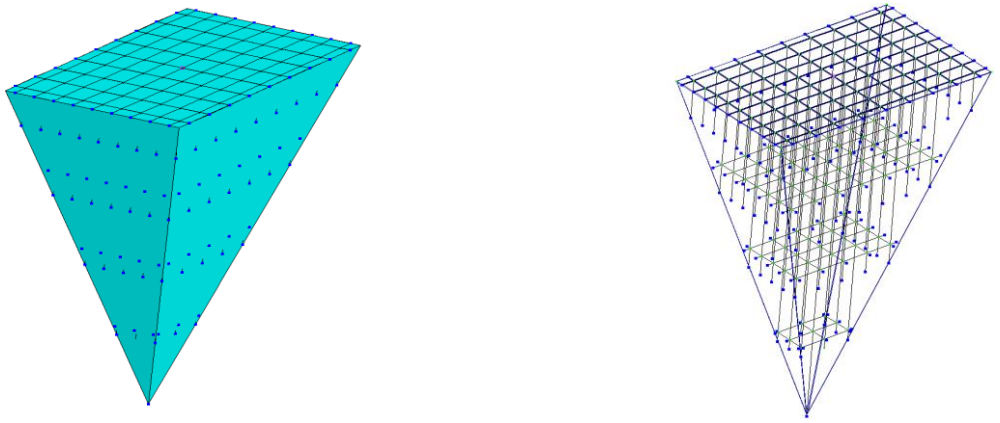

Рис. 2. Расчетная схема пирамидального заполнителя с волокном
Fig. 2. The design scheme of the pyramidal filler with fiber

Расчет движения твердого тела в заполнителе наполненного волокном был произведен с помощью МКЭ 10 с численным описанием (рис.3.)

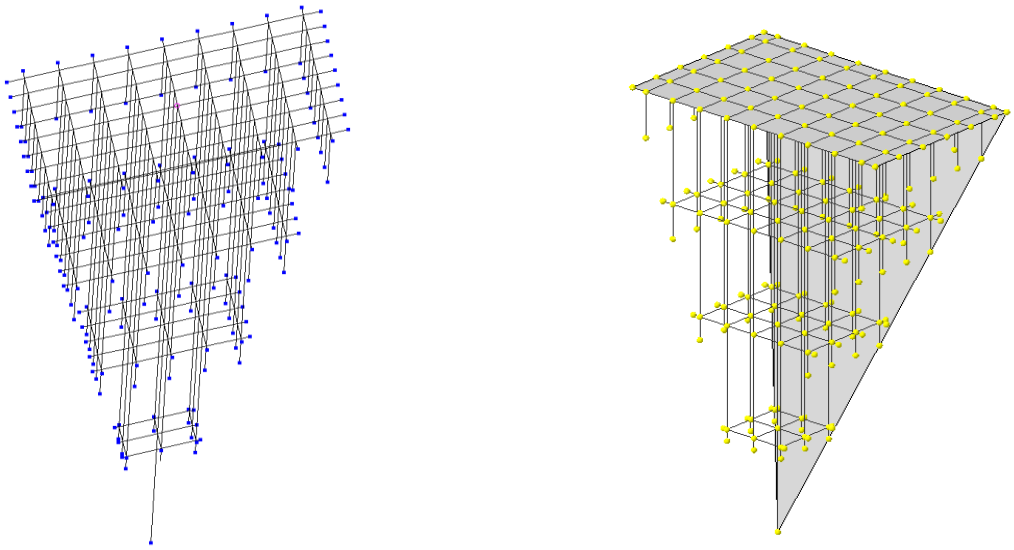

Рис.3. Модель волокна и сечение пирамидального заполнителя
Fig. 3. Fiber Model and Pyramidal Aggregate Cross Section

Усредненная величина силы импульса/удара и продолжительность воздействия определялись по методике, изложенной в справочной системе ПК ЛИРА-САПР (рис.4).

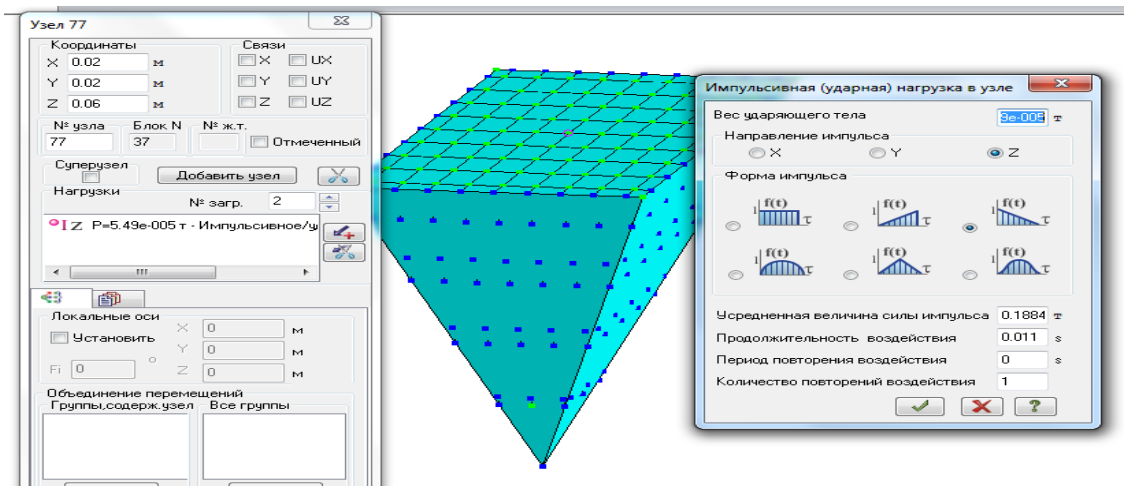

Рис.4. Схема приложения динамической нагрузки
Fig. 4.Dynamic Load Application Scheme

Обсуждение результатов. По результатам расчета видно, как волокно деформируется (рис.5). На рисунках в шкале по цветам показаны величины перемещений (см).

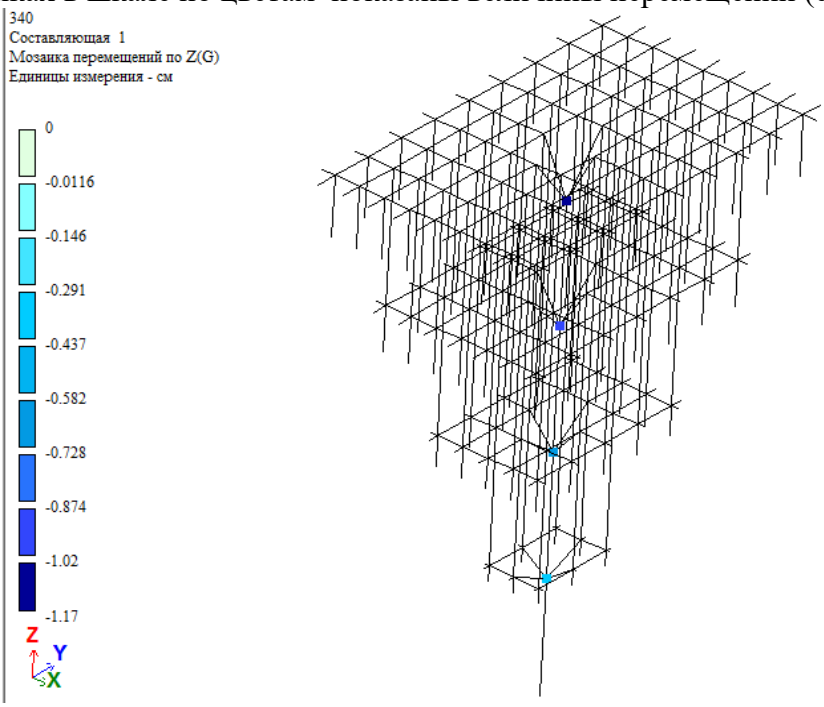

Рис. 5. Деформирование наполнителя (волокна)
Fig.5. Deformation of the filler (fiber)

На рис. 6-9 показаны усилия в наполнителе при скорости движущегося телаV=340м/с. На рисунке в вертикальной шкале по цветам показаны величины усилий (тс). На полученных рисунках видно как ударник перемещается внутри волокнистого материала, т.е. использование ПК ЛИРА-САПР позволяет оценить работу наполнителя при движение в нем твердого тела.

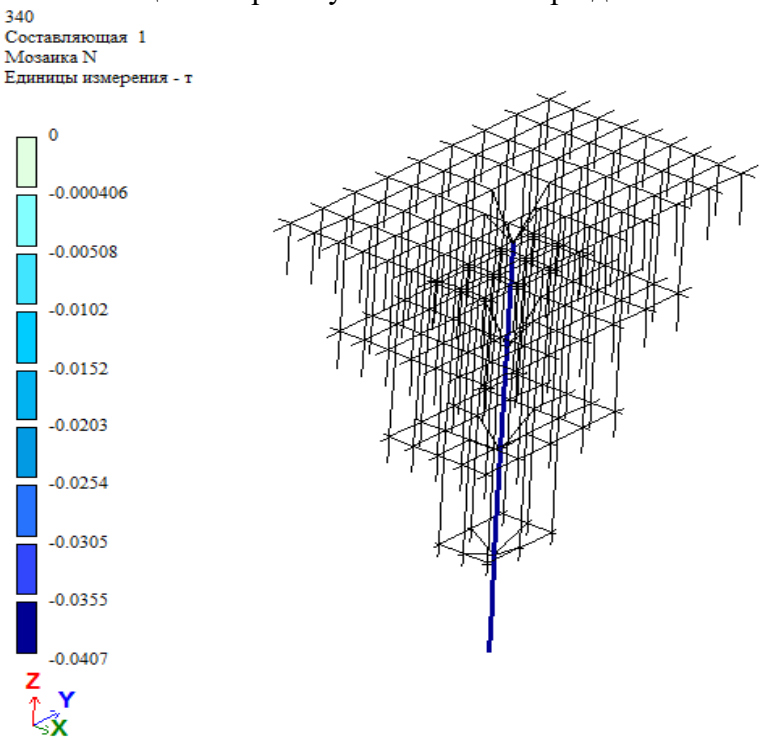

Рис.6. Продольные усилия N в волокне при скорости движения твердого тела V=340м/с
Fig. 6. Longitudinal forces N in the fiber at a speed of movement of a solid body V = 340m / s

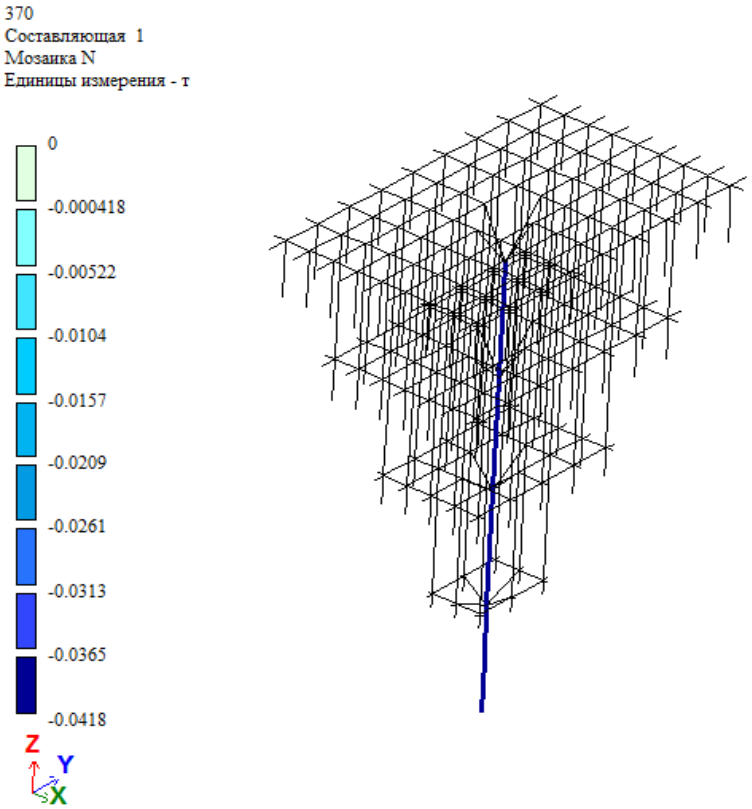

Рис. 7. Продольные усилия N в волокне при V=370м/с
Fig. 7. Longitudinal forces N in the fiber at V = 370m / s

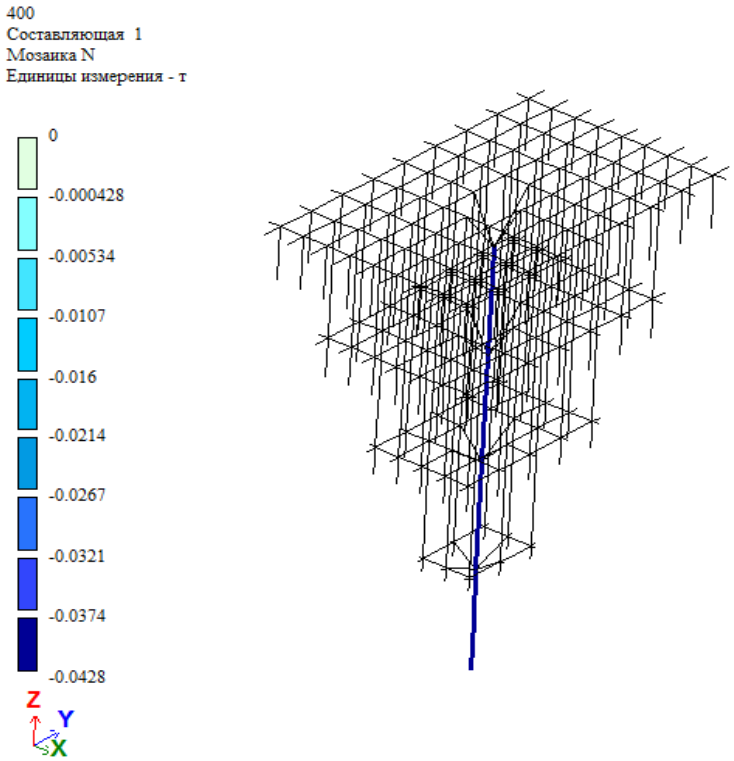

Рис. 8. Продольные усилия N в волокне при V=400м/с
Fig. 8. The longitudinal forces N in the fiber at V = 400m / s

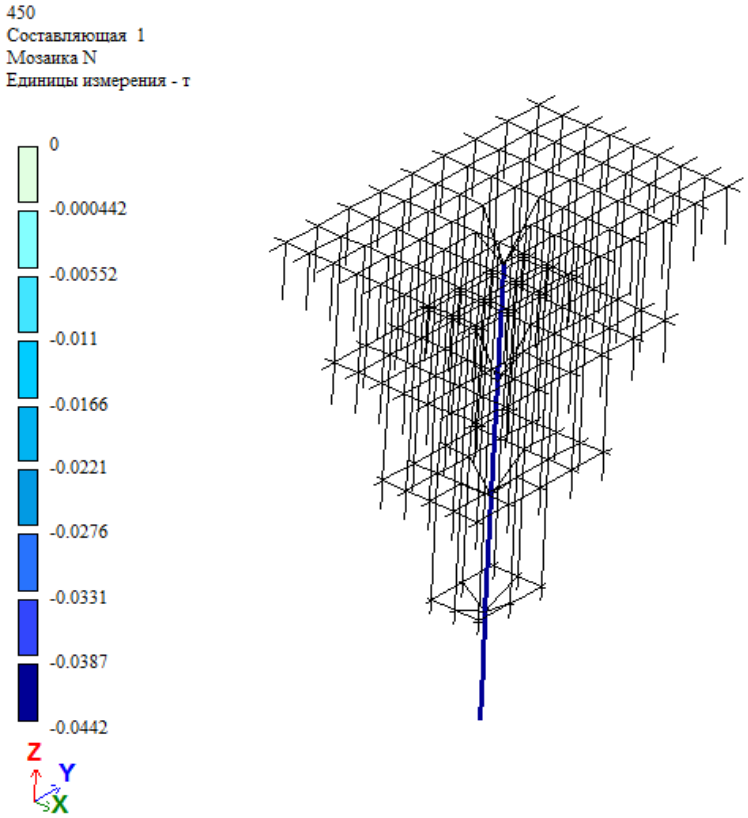

Рис. 9. Продольные усилия N в волокне при V=450м/с
Fig. 9. The longitudinal forces N in the fiber at V = 450 m / s

Результаты расчета перемещения ударника в волокнистом материале в зависимости от скорости тела (ударника), плотности наполнителя (волокна) показаны на рис. 10.

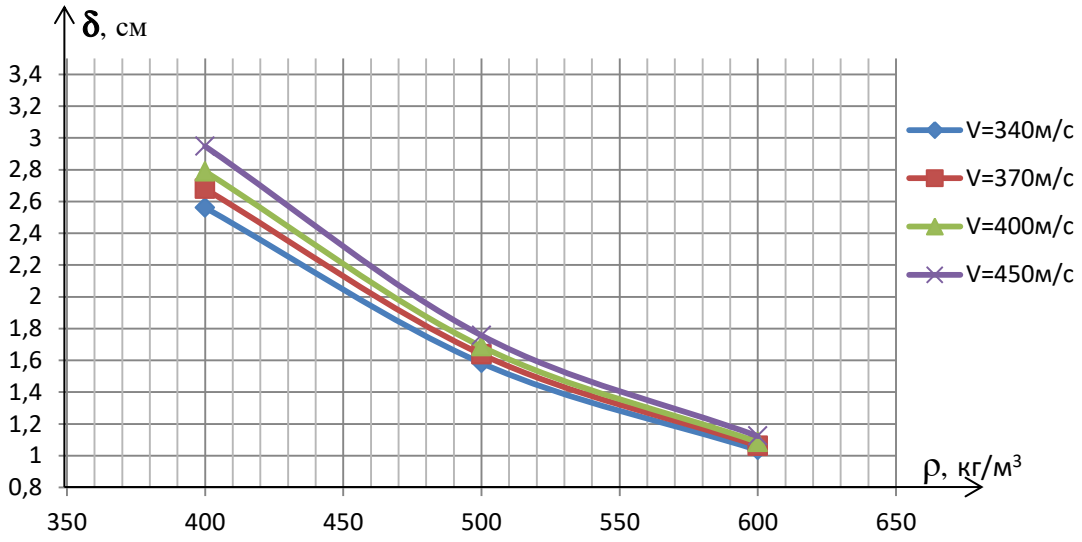

Рис.10. Графики перемещения ударника в волокне, в зависимости от плотности наполнителя, при различных скоростях движения тела (ударника)
Fig. 10. Graphs of the movement of the striker in the fiber, depending on the density of the filler, at various speeds of movement of the body (striker)

Полученные графики говорят, о том, что перемещение ударника в наполнителе зависит от ее скорости и плотности волокон. Это говорить о том, что при проектировании трехслойных конструкций, для определенного сооружения, можно оптимизировать вес с учетом предполагаемой скорости ударника.

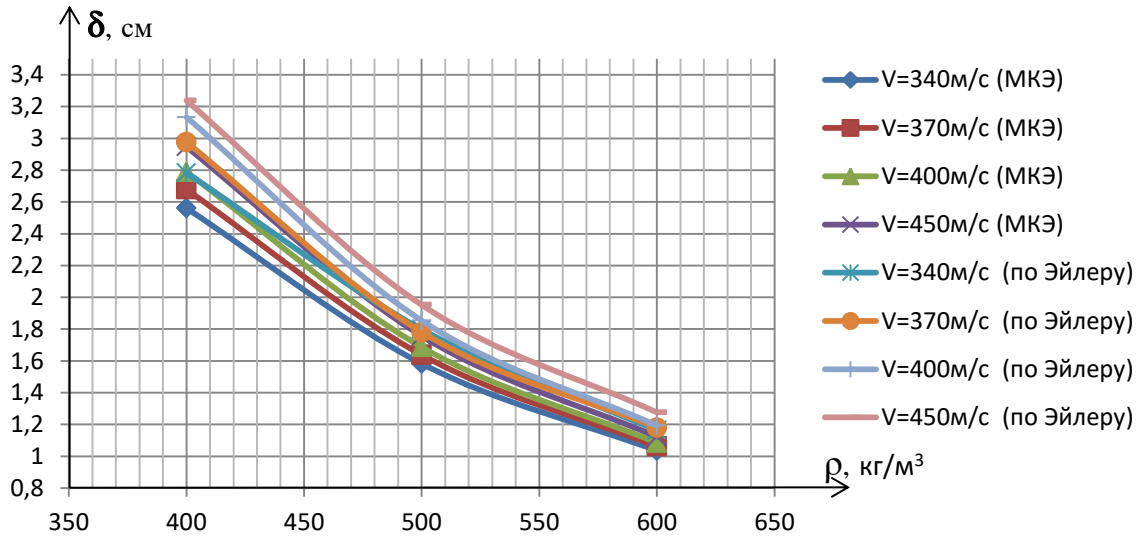

Рис.11. Графики перемещения ударника в волокне, в зависимости от плотности наполнителя, при различных скоростях движения тела (ударника) по МКЭ и с помощи уравнений (1)
Fig. 11. Graphs of the movement of the striker in the fiber, depending on the density of the filler, at various speeds of the body (striker) according to the FEM and using equations (1)

Для проверки правильности расчетов, проведенных при помощи МКЭ, авторы произвели расчет движения твердого тела в волокнистом материале при помощи уравнений полученных авторами ранее [10]: $\Delta N_{xz} + \Delta N_z = \Delta l \cdot \rho \cdot s \cdot \dfrac{\Delta^2 W}{\Delta t^2}$ (10)

здесь $\Delta l \cdot s \cdot \rho = m$ - масса элемента;

ΔN_{xz} -усилия сдвига между элементами на которые разбит волокнистый материал (рис.2.):

ΔN_z - усилие в элементе волокна под движущимся телом (рис.5);

$\dfrac{\Delta^2 W}{\Delta t^2}$ - ускорение движущегося тела.

Уравнение решалось методом Эйлера с пересчётом. Сравнительные результаты расчета по обоим методам приведены на рис. 11.

Вывод. Анализ полученных результатов показал, что расхождение между результатами расчета трехслойной конструкции при действии динамических нагрузок с помощи МКЭ и с помощи аналитических зависимостей составил около 10%. Это говорит о возможности использования метода конечных элементов при расчете трехслойных конструкций на действие динамических сосредоточенных сил.

Библиографический список:

1. Вольмир А.С., Терских В.Н. Исследование динамики конструкций из композитных материалов на основе метода суперэлементов// Механика композитных материалов. 1979. №4. С. 652-655.
2. Витман Ф.Ф., Златин Н.А. О процессе соударения деформируемых тел и его моделирование// ЖТФ, 1963. 982с.
3. Галлагер Р. Метод конечных элементов. М.: 1984г., 424с.
4. Гольдсмит В. Удар. Литературы по строительству. М.:1965. 448 с.
5. Городецкий А.С., Евзеров И.Д. Компьютерные модели конструкций. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов. 2009г, 360стр.
6. Колесник И.А., Иманходжаев Ц.У. Исследование нелинейных колебаний трехслойной оболочки, несущей подвижную инерциальную нагрузку// Прикладная механика. М., т.16(1). 1981. С. 16-40.
7. Новичков Ю.Н., Арутюнян Г.В. Исследование собственных колебаний многослойных плит// Динамика и прочность машин: Тр. МЭИ. Вып. 164. М., 1973. С. 30-37.

8. Рикардс Р.Б. Метод конечных элементов в теории оболочек и пластин. Рига: Зинатне, 1988, 284с.
9. Зукас Дж. А., Николас Т., Свифт Х.Ф., Грещук Л.Б., Курран Д.Р. Динамика Удара: Пер. с англ. М.: «Мир», 1985. 296с.
10. Керимов Р.М., Муселемов Х.М., Устарханов О.М. Расчёт трёхслойных конструкций при динамическом нагружении сосредоточенной нагрузкой. Вестник ДГТУ, Технические науки. 2015. №38. С.110-118.
11. Устарханов О.М. Напряженно-деформированное состояние волокнистого материала при динамическом ударе. Научно-тематический сборник. Махачкала. 1995. С. 135-140.
12. Устарханов О.М. «Вопросы прочности трехслойных конструкций с регулярным дискретным заполнителем»: Дисс. д–ра техн наук. Ростов-на-Дону. 2000.
13. Chang J-S and Chen H-C Free vibrations of sandwich plates of variable thickness// J. Sound Vib. 155(2), 1992. pp.195-208.
14. Gautham BP and Gancsan N. Vibration and damping characteristics of spherical shells wilh a viscoelaslic core// J. Sound Vib. 170(3), 1994. pp.289-301.
15. Hwu C and Hu JS Buckling and postbuckling of delaminated composite sandwich beams// AIAA J 30(7), 1992, pp.1901-1909.
16. Granz C. Lehrbuch der Ballistik. 1: Aussere Ballistik. Berlin, J. Springer, 1925, 457.
17. Helie F. Traite de balistique experimentale. Paris, Dumaine, 1884.
18. Robertson H.P. Terminal Ballistics. Washington, National Research Council, 1941.

References:

1. Vol'mir A.S., Terskikh V.N. Issledovaniye dinamiki konstruktsiy iz kompozitnykh materialov na osnove metoda superelementov// Mekhanika kompozitnykh materialov. 1979. №4. S. 652-655. [Volmir A.S., Terskikh V.N. The study of the dynamics of structures made of composite materials based on the method of superelements // Mechanics of composite materials. 1979. No. 4. pp. 652-655. (In Russ)]
2. Vitman F.F., Zlatin N.A. O protsesse soudareniya deformiruyemykh tel i yego modelirovaniye// ZHTF, 1963. 982s. [Vitman F.F., Zlatin N.A. On the process of collision of deformable bodies and its modeling // ZhTF, 1963. 982c. (In Russ)]
3. Gallager R. Metod konechnykh elementov. M.: 1984g, 424s. [Gallager R. The finite element method. M .: 1984, 424p. (In Russ)]
4. Gol'dsmit V. Udar. Literatury po stroitel'stvu. M.:1965. 448 s. [Goldsmith W. Impact. Literature on construction. M.: 1965. 448 p. (In Russ)]
5. Gorodetskiy A.S., Yevzerov I.D. Komp'yuternyye modeli konstruktsiy. M.: Izdatel'stvo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov. 2009g, 360str. [Gorodetsky A.S., Evzerov I.D. Computer models of structures. M .: Publishing house of the Association of construction universities. 2009, 360 p. (In Russ)]
6. Kolesnik I.A., Imankhodzhayev TS.U. Issledovaniye nelineynykh kolebaniy trekhsloynoy obolochki, nesushchey podvizhnuyu inertsial'nuyu nagruzku// Prikladnaya mekhanika. M., t.16(1). 1981. S. 16-40. [Kolesnik I.A., Imankhodzhaev Ts.U. Investigation of nonlinear vibrations of a three-layer shell that does not carry a mobile inertial load // Applied Mechanics. M., T. 16 (1). 1981. pp. 16-40. (In Russ)]
7. Novichkov YU.N., Arutyunyan G.V. Issledovaniye sobstvennykh kolebaniy mnogosloynykh plit// Dinami-ka i prochnost' mashin: Tr. MEI. Vyp. 164. M., 1973. S. 30-37. [Novichkov Yu.N., Harutyunyan G.V. Study of natural vibrations of multilayer plates // Dynamics and machine strength: Tr. MPEI. Vol. 164.M., 1973. pp. 30-37. (In Russ)]
8. Rikards R.B. Metod konechnykh elementov v teorii obolochek i plastin. Riga: Zinatne, 1988, 284s. [Rickards R.B. The finite element method in the theory of shells and plates. Riga: Zinatne, 1988, 284p.
9. Zukas Dzh. A., Nikolas T., Svift KH.F., Greshchuk L.B., Kurran D.R. Dinamika Udara: Per. s angl. M.: «Mir», 1985. 296s. [Zukas J. A., Nicholas T., Swift H.F., Greshchuk LB, Kurran D.R. Impact Dynamics: Per. from English M .: "World", 1985. 296 p. (In Russ)]
10. Kerimov R.M., Muselemov KH.M., Ustarkhanov O.M. Raschot trokhsloynykh konstruktsiy pri dinamicheskom nagruzhenii sosredotochennoy nagruzkoy. Vestnik DGTU, Tekhnicheskiye nauki. 2015. №38. S.110-118. [Kerimov R.M., Muselemov H.M., Ustarkhanov O.M. Calculation of three-layer structures under dynamic loading with concentrated load. Bulletin of DSTU, Engineering. 2015. №38. pp. 110-118. (In Russ)]
11. Ustarkhanov O.M. Napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye voloknistogo materiala pri dinamiche-skom udare. Nauchno-tematicheskiy sbornik. Makhachkala. 1995. S. 135-140. [Ustarkhanov O.M. Stress-strain state of a fibrous material under dynamic impact. Scientific and thematic collection. Makhachkala. 1995.pp 135-140. (In Russ)]
12. Ustarkhanov O.M. «Voprosy prochnosti trekhsloynykh konstruktsiy s regulyarnym diskretnym zapolni-telem»: Diss. d–ra tekhn nauk. Rostov-na-Donu. 2000. [Ustarkhanov O.M. “Strength issues of three-layer structures with a regular discrete filler”: Diss. Doctor of technical sciences. Rostov-on-Don. 2000. (In Russ)]
13. Chang J-S and Chen H-C Free vibrations of sandwich plates of variable thickness // J. Sound Vib. 155 (2), 1992. pp.195-208.

14. Gautham BP and Gancsan N. Vibration and damping charac¬teristics of spherical shells wilh a viscoelaslic core // J. Sound Vib. 170 (3), 1994. pp.289-301.
15. Hwu C and Hu JS Buckling and postbuckling of delaminated composite sandwich beams // AIAA J 30 (7), 1992, pp.1901-1909.
16. Granz C. Lehrbuch der Ballistik. 1: Aussere Ballistik. Berlin, J. Springer, 1925, 457.
17. Helie F. Traite de balistique experimentale. Paris, Dumaine, 1884.
18. Robertson H.P. Terminal Ballistics. Washington, National Research Council, 1941.

Сведения об авторах:

Устарханов Осман Магомедович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительных конструкций и гидротехнических сооружений; e-mail:**dgtu.pgs@mail.ru**

Муселемов Хайрулла Магомедмурадович, кандидат технических наук, доцент, кафедра строительных конструкций и гидротехнических сооружений; e-mail: **hairulla213@mail.ru**

Абакаров Марат Саидович, заместитель руководителя Управления Росреестра по Республике Дагестан; e-mail: **05_upr@rosreestr.ru**

Алибеков Митхат Султанмахмудович, ассистент, кафедра строительных конструкций и гидротехнических сооружений; e-mail:**mithat@yandex.ru**

Information about the authors:

Osman M. Ustarkhanov, Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Construction Structures and Hydraulic Engineering Structures; e-mail:**dgtu.pgs@mail.ru**

Hayrulla M. Muselemov, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Construction Structures and Hydraulic Engineering Structures; e-mail**: hairulla213@mail.ru**

Marat S. Abakarov, Deputy Head of the Office of the Federal Register for the Republic of Daghestan; -mail: **05_upr@rosreestr.ru**

Mithat S. Alibekov, Assistant, Department of Construction Structures and Hydraulic Engineering Structures; e-mail:**mithat@yandex.ru**

Конфликт интересов
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Поступила в редакцию 15.07.2019.
Принята в печать 10.09. 2019.

Conflict of interest.
The authors declare no conflict of interest.
Received 15.07.2019.
Accepted for publication 10.09. 2019.