

Влияние толщины несущего слоя на напряженно-деформированное состояние в слоях трехслойных цилиндрических отсеков с прямоугольными в плане вырезами

Рассмотрена модель послойного конечно-элементного анализа напряженно-деформированного состояния трехслойных цилиндрических нерегулярных оболочек вращения. Исследовано влияние толщины внутреннего несущего слоя на напряженно-деформированное состояние в слоях трехслойных цилиндрических отсеков, ослабленных прямоугольными в плане вырезами.

В.Н. БАКУЛИН,
канд. техн. наук
(ИИПРИМ РАН, Москва)
vbak@yandex.ru

Трехслойные цилиндрические оболочки вращения, прямоугольные в плане вырезы, напряженно-деформированное состояние, блочная модель, послойный конечно-элементный анализ

Применение трехслойных конструкций в летательных аппаратах рассматривалось в работах [1–5]. Эффективность такого применения обусловлена высокими показателями изгибной жесткости, весовой эффективности, тепловой защиты, а также возможностью добиться более высокого качества внешней и внутренней поверхностей трехслойных конструкций [6–8].

При создании конструкций нередко приходится нарушать их сплошность различного рода вырезами конструктивного, технологического или другого назначения, что ослабляет несущую способность изделий.

Для проведения расчетов элементов конструкций, ослабленных прямоугольными в плане вырезами, при различных условиях закрепления и нагружения приходится разрабатывать модели на основе метода конечных элементов [9–14] и других численных методов [15, 16].

Часто конечно-элементные модели для расчета слоистых и трехслойных конструкций строятся на основе гипотез для пакета слоев [10, 17–20]. Однако такие модели не всегда удовлетворяют современным требованиям точности и степени детализации при расчете напряженно-деформированного состояния применяемых на практике трехслойных оболочек. В связи с этим актуально построение моделей на основе подхода послойного анализа [21–23]. Послойный анализ трехслойных оболочек заключается в том, что стенка конструкции разбивается по толщине на слои, которые затем стыкуются.

В настоящей работе кратко рассмотрена методология построения блочной конечно-элементной модели естественной кривизны (имеющей цилиндрическую форму) на основе подхода послойного анализа для исследования напряженно-деформированного состояния трехслойных нерегулярных оболочек.

С помощью рассмотренной блочной конечно-элементной модели естественной кривизны прямоугольной в плане формы, построенной на основе подхода послойного анализа, проведено исследование влияния толщины внутреннего несущего слоя на напряженно-деформированное состояние трехслойных цилиндрических композитных оболочек с прямоугольными в плане вырезами.

Блочная модель послойного анализа строится из двумерных конечных элементов тонких моментных несущих слоев (при этом используется классическая теория оболочек [24]) и трехмерного конечного элемента слоя заполнителя, при получении функций аппроксимаций перемещений которого применяются аппроксимации конечных элементов несущих слоев [25]. Такой подход позволяет избежать погрешностей, вызванных разрывом обобщенных перемещений на поверхностях стыковки конечных элементов несущих слоев и конечных элементов заполнителя.

С помощью блочной конечно-элементной модели послойного анализа можно проводить расчет напряженно-деформированного состояния трехслойных цилиндрических нерегулярных оболочек с несимметричной структурой трехслойного пакета по толщине, моментными несущими слоями, которые могут быть выполнены из разных материалов, и трехмерным заполнителем.

Будем рассматривать трехслойные оболочки с тонкими и жесткими несущими слоями и толстым промежуточным слоем заполнителя.

Конечные элементы несущих слоев и слоя заполнителя образованы сечением оболочки двумя плоскостями, перпендикулярными оси вращения, и двумя плоскостями, проходящими через ось оболочки. Узлы расположены в угловых точках конечных элементов.

Конечный элемент для исследования напряженно-деформированного состояния в несущих слоях имеет четыре узла с пятью степенями свободы в узле – три перемещения точек срединной поверхности и углы поворота нормали к срединной поверхности относительно осевой и окружной осей координат, при этом конечные элементы заполнителя имеют по четыре узла на внутренней и внешней цилиндрических поверхностях. Будем считать справедливыми для несущих слоев гипотезы Кирхгофа – Лява [24, 26, 27].

Отметим, что модели, построенные на основе подхода послойного анализа [28], отличаются большей размерностью, зависящей от числа слоев, на которые разбиваются оболочки по толщине, числа конечных элементов, которыми моделируются слои, и числа степеней свободы конечных элементов. Большая размерность значительно затрудняет и ограничивает разработку и применение таких моделей. Кроме того, из-за наличия вырезов возникает необходимость измельчения сетки разбиений возле вырезов, т. е. увеличение количества конечных элементов, что дополнительно повышает число степеней свободы конечно-элементных моделей.

Уменьшить число степеней свободы конечно-элементных моделей можно выбором эффективных аппроксимаций для конечных элементов [29], с помощью которых моделируются слои. От эффективности применяемых аппроксимаций конечных элементов зависит скорость сходимости численных решений, т. е. то, как быстро численные результаты будут приближаться к точным решениям при увеличении числа разбиений на конечные элементы [29].

Для повышения скорости сходимости конечно-элементных решений в аппроксимирующие функции перемещений конечных элементов введены перемещения как твердого тела, определяемые интегрированием геометрических соотношений, связывающих обобщенные деформации с перемещениями [24], при нулевых значениях деформаций [29–31]. Запись этих полученных функций перемещений конечного элемента несущих слоев осуществляется с помощью шести неопределенных коэффициентов, являющихся константами интегрирования $\alpha_1, \dots, \alpha_6$ [29, 30].

Аппроксимирующие функции перемещений конечных элементов несущих слоев состоят из перемещений как твердых тел и перемещений, вызванных деформированием конечного элемента.

Число неопределенных коэффициентов для записи аппроксимирующих функций полных перемещений конечного элемента несущих слоев равно числу степеней свободы конечных элементов, т. е. двадцати.

Как было показано в работах [29, 30, 32–34], аппроксимация функций деформаций, удовлетворяющих уравнениям неразрывности деформаций [24], а затем переход к аппроксимациям функций перемещений конечных элементов значительно повышает скорость сходимости конечно-элементных решений, а следовательно, позволяет уменьшить число конечных элементов и размерность решаемых задач.

С помощью оставшихся после записи функций перемещений как жесткого целого четырнадцати неопределенных коэффициентов записываем аппроксимирующие функции обобщенных деформаций конечных элементов несущих слоев, учитывая характер изменения параметров напряженно-деформированного состояния в несущих слоях [29, 30, 34, 35].

Параметры изменения кривизны \varkappa_1, \varkappa_2 представим полиномами более высоких порядков по сравнению с другими обобщенными деформациями $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \gamma, \chi$ [29, 30, 34, 35], при этом аппроксимирующие функции обобщенных деформаций конечных элементов несущих слоев [29, 30, 34, 35] удовлетворяют уравнениям совместности деформаций [24].

Функции, аппроксимирующие перемещения, определяемые деформированием конечных элементов несущих слоев, получаются интегрированием геометрических соотношений, связывающих обобщенные деформации с перемещениями [24], при найденных аппроксимациях функций деформаций [29, 30, 34, 35].

Полученные эффективные аппроксимирующие функции перемещений конечных элементов несущих слоев применены для построения трехмерного конечного элемента слоя заполнителя трехслойных нерегулярных цилиндрических оболочек. Для этого аппроксимирующие функции перемещений конечных элементов несущих слоев приведены к соответствующим поверхностям стыковки со слоем заполнителя аналогично тому, как это описано в работах [10, 17].

Для построения трехмерного конечного элемента слоя заполнителя выбраны в качестве узловых обе цилиндрические поверхности этого конечного элемента, который будет иметь восемь узлов.

Как уже отмечалось, применение аппроксимирующих функций перемещений конечных элементов несущих слоев при построении трехмерного конечного элемента слоя заполнителя позволило избежать разрыва обобщенных перемещений на поверхностях контакта конечных элементов слоев трехслойной оболочки.

Используя геометрические соотношения, связывающие обобщенные деформации с перемещениями для трехмерного тела [1], физические соотношения, связывающие деформации с напряжениями [36], и применив процедуру и алгоритмы, подобные приведенным в работах [37, 38], построим матрицу жесткости конечного элемента слоя заполнителя для анализа напряженно-деформированного состояния трехслойных нерегулярных цилиндрических оболочек.

Решение задачи проводится с помощью процедур метода перемещений метода конечных элементов [39–42].

Параметры напряженно-деформированного состояния трехслойных оболочек можно регулировать изменением физико-механических характеристик [43, 44] и толщины слоев, поэтому актуальной научной проблемой, имеющей важное прикладное значение, является исследование влияния толщины слоев на напряженное состояние трехслойных оболочек, ослабленных прямоугольными вырезами.

В качестве примера приводится исследование напряженно-деформированного состояния в слоях трехслойных цилиндрических оболочек с заполнителем из пенопласта и стеклопластиковыми несущими слоями разной толщины при нагружении внутренним давлением $p = 0,1 \text{ кг/см}^2$. Оболочка с жестко заделанными торцами несущих слоев (для них разрешено осевое перемещение аналогично рис. 1 [45]) имеет три одинаковых симметрично расположенных выреза, которые находятся на равном расстоянии от торцов оболочки.

Исследование влияния толщины внутреннего несущего слоя на параметры напряженно-деформированного состояния трехслойных цилиндрических оболочек с прямоугольными в плане вырезами проводится для несущих слоев со следующими физико-механическими характеристиками: $E_1 = 2,1 \cdot 10^5 \text{ кг/см}^2$; $E_2 = 1,9 \cdot 10^5 \text{ кг/см}^2$; $G_{12} = 0,35 \cdot 10^5 \text{ кг/см}^2$; $\mu_1 = 0,1$.

Заполнитель имел следующие физико-механические характеристики: $E_{11} = E_{22} = E_{33} = 240 \text{ кг/см}^2$; $G_{13} = G_{23} = G_{12} = 100 \text{ кг/см}^2$.

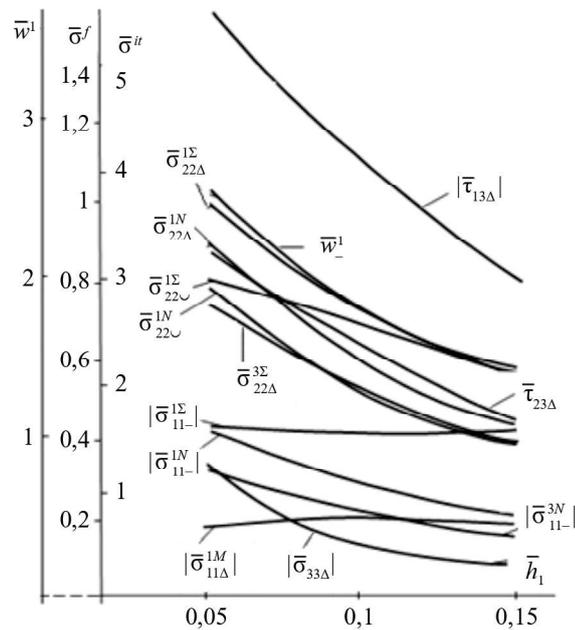
Приведем геометрические параметры трехслойных оболочек с прямоугольными вырезами: $L/R_0 = 2$; $H/R_0 = 0,0667$; $\bar{l}_B = l_B/R_0 = 0,267$; $\bar{b}_B = b_B/R_0 = 0,1335$, где L , R_0 , H – длина, внутренний радиус и толщина оболочки; \bar{l}_B , \bar{b}_B – размеры выреза.

При исследовании изменялась толщина внутреннего несущего слоя $\bar{h}_1 = h_1/H = 0,05 \div 0,15$ при толщине слоя заполнителя $\bar{h}_f = h_f/H = 0,85$ и толщине внешнего несущего слоя $\bar{h}_3 = h_3/H = 0,05$.

Вследствие симметрии в осевом и окружном направлениях рассматривалась 1/12 симметричная часть трехслойной цилиндрической оболочки. Использовалась неравномерная сетка разбиения на блоки, состоящие из конечных элементов несущих слоев и слоя заполнителя трехслойных цилиндрических оболочек, со сгущением линий разбиения в окрестности выреза (шестнадцать блоков в осевом направлении и восемнадцать в окружном). Если принять линейные размеры сторон рассматриваемой симметричной части трехслойной цилиндрической оболочки за единицу, сетка разбиения, считая от середины выреза, будет следующей: в осевом направлении восемь блоков с относительными размерами по 0,03125, затем

четыре блока по 0,065 и четыре блока по 0,125 и в окружном направлении десять блоков по 0,015625, два блока по 0,065, шесть блоков по 0,125.

Результаты исследований приведены на рисунке.



На рисунке приведены следующие обозначения: $\bar{w}^1 = w_1/w_0$; $\bar{\sigma}^{it} = \sigma_{mn}^{it}/\sigma_{22}^{1N}$; $\bar{\sigma}^f = \sigma_{mn}^f/\sigma_{33}^f$ (где w_0 – прогибы при $\bar{h}_1 = 0,05$, $\bar{h}_3 = 0,05$, $\bar{h}_f = 0,85$ вдали от выреза; σ_{22}^{1N} – окружные мембранные напряжения во внутреннем несущем слое; σ_{33}^f – поперечные нормальные напряжения в слое заполнителя при $\bar{h}_1 = 0,1$, $\bar{h}_3 = 0,05$, $\bar{h}_f = 0,85$ вдали от выреза); $i = 1,3$; $m = 1,2$; $n = 1,2$; t соответствует N-мембранным, M-моментным, Σ -суммарным напряжениям в несущих слоях; Δ , $-$, \cup означают место в районе угла, середины прямолинейного и криволинейного краев выреза.

Максимальные прогибы в трехслойной цилиндрической оболочке с прямоугольными в плане вырезами отмечаются на середине прямолинейного края выреза внутреннего несущего слоя \bar{w}_-^1 . Эти прогибы \bar{w}_-^1 в 2,68 раза выше прогибов трехслойной цилиндрической оболочки вдали от вырезов при $\bar{h}_1 = 0,05$. При увеличении толщины внутреннего несущего слоя \bar{h}_1 в два и три раза максимальные прогибы уменьшаются в 1,5 и 1,845 раза. С увеличением толщины внутреннего несущего слоя \bar{h}_1 разница между прогибами внутреннего и внешнего несущих слоев уменьшается.

Наибольшими напряжениями в несущих слоях являются мембранные окружные напряжения внутреннего несущего слоя $\bar{\sigma}_{22}^{1N}$. Эти напряжения достигают максимального значения в районе угловой точки выреза ($\bar{\sigma}_{22\Delta}^{1N} = 3,34$ при $\bar{h}_1 = 0,05$). С увеличением \bar{h}_1 наибольшие значения напряжений $\bar{\sigma}_{22\Delta}^{1N}$ уменьшаются для $\bar{h}_1 = 0,1$ в 1,5 раза, а для $\bar{h}_1 = 0,15$ – в два раза (см. рисунок).

С увеличением толщины внутреннего несущего слоя \bar{h}_1 разница между наибольшими значениями напряжений $\bar{\sigma}_{22\Delta}^{1N}$ внутреннего и внешнего несущих слоев уменьшается почти пропорционально изменению \bar{h}_1 .

Концентрация мембранных и суммарных напряжений наблюдается по всему криволинейному краю выреза, при этом моментные напряжения значительно меньше мембранных напряжений.

Наибольшие суммарные напряжения наблюдаются в районе угловой точки выреза на поверхности сопряжения внутреннего несущего слоя и слоя заполнителя $\bar{\sigma}_{22\Delta}^{1\Sigma}$. Влияние толщины внутреннего

несущего слоя на наибольшие значения этих напряжений в районе угловой точки выреза $\bar{\sigma}_{22\Delta}^{1\Sigma}$, на середине криволинейного края выреза $\bar{\sigma}_{22\cup}^{1\Sigma}$, на наибольшие значения осевых суммарных напряжений на середине прямолинейного края выреза $\bar{\sigma}_{11-}^{1\Sigma}$, а также суммарных напряжений на поверхности сопряжения внешнего несущего слоя и слоя заполнителя в районе угловой точки выреза $\bar{\sigma}_{22\Delta}^{3\Sigma}$ приведено на рисунке.

Наибольшими по величине напряжениями в слое заполнителя являются поперечные сдвиговые напряжения τ_{13} в районе угловой точки выреза $\bar{\tau}_{13\Delta}$. На рисунке показано влияние толщины внутреннего несущего слоя на наибольшие значения этих напряжений, а также напряжений τ_{23} , наблюдаемых в районе угловой точки выреза $\bar{\tau}_{23\Delta}$, и поперечных нормальных напряжений в слое заполнителя $\bar{\sigma}_{33\Delta}$, наблюдаемых на расстоянии ширины выреза от угловой точки выреза.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института прикладной механики РАН (ИПРИМ РАН).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Васильев В.В.* Механика конструкций из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1988. 272 с.
2. *Панин В.Ф., Гладков Ю.А.* Конструкции с заполнителем: Справочник. М.: Машиностроение, 1991. 272 с.
3. *Авдеев В.С.* Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения. Путь длиной в полвека. Хотьково, 2015. 300 с.
4. *Тестоедов Н.А., Наговицин В.Н., Пермяков М.Ю.* Применение трехслойных сотовых конструкций в космических аппаратах // Вестник СибГАУ. 2016. № 1. С. 200–211.
5. *Бакулин В.Н.* Применение трехслойных оболочек. Краткий обзор работ по расчету напряженно-деформированного состояния трехслойных оболочек с прямоугольными в плане вырезами // Вопросы оборонной техники. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. 2023. № 3 (208). С. 17–24.
6. *Смердов А.А., Шон Ф.Т.* Анализ эффективности оптимальных композитных оболочек многостеночной и трехслойной схем для отсеков ракет-носителей и разгонных блоков // Конструкции из композиционных материалов. 2016. № 3 (143). С. 58–65.
7. *Бакулин В.Н.* Трехслойные оболочки – эффективные элементы конструкций современных летательных аппаратов. Модели прочностного анализа // Материалы 14-й Междунар. конф. по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли, г. Алушта, 5–12 сент. 2022. М.: МАИ, 2022. С. 270–272.
8. *Сливинский В.И., Ткаченко Г.В., Сливинский М.В.* Эффективность применения сотовых конструкций в летательных аппаратах // Вестник СибГАУ. 2005. № 3. С. 169–173.
9. *Образцов И.Ф., Савельев Л.М., Хазанов Х.С.* Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов. М.: Высшая школа, 1985. 392 с.
10. *Бакулин В.Н., Рассоха А.А.* Метод конечных элементов и голографическая интерферометрия в механике композитов. М.: Машиностроение, 1987. 312 с.
11. *Глеулинов М.К.* Построение геометрически нелинейной динамической модели составных несущих и управляющих поверхностей летательных аппаратов на основе метода конечных элементов // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2008. № 1. С. 15–18.
12. *Чекмарев Д.Т.* Об одном способе построения двумерных 4-узловых и трехмерных 8-узловых конечных элементов для решения задач теории упругости // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. 2013. № 3. С. 150–158.
13. *Длугач М.И., Ковальчук Н.В.* Исследование напряженного состояния ребристых цилиндрических оболочек с прямоугольными отверстиями методом конечных элементов // Прикладная механика. 1974. № 10. С. 22–30.
14. *Бакулин В.Н., Снесарев С.Л.* Собственные колебания цилиндрических оболочек с прямоугольным вырезом // Изв. вузов. Авиационная техника. 1988. № 4. С. 3–6.
15. *Дмитриев В.Г. и др.* Исследование устойчивости тонкостенных несущих элементов авиационных конструкций с большими прямоугольными вырезами методами вычислительного эксперимента // Изв. вузов. Авиационная техника. 2018. № 2. С. 18–26.
16. *Длугач М.И., Гавриленко Г.Д.* Расчет ребристых цилиндрических оболочек с большими прямоугольными отверстиями методом сеток // Прикладная механика. 1975. № 12. С. 22–30.
17. *Бакулин В.Н., Кривцов В.С., Рассоха А.А.* Алгоритм получения матрицы жесткости конечного элемента анизотропной оболочки // Изв. вузов. Авиационная техника. 1983. № 4. С. 14–18.

18. Рикардс Р.Б. Метод конечных элементов в теории оболочек и пластин. Рига: Зинатне, 1988. 284 с.
19. Шешенин С.В., Демидович П.Н. Применение метода осреднения для построения слоистого конечного элемента // Упругость и неупругость: Материалы междунар. науч. симпозиума по проблемам механики деформируемых тел, посвященного 95-летию со дня рождения А.А. Ильюшина, г. Москва, 19–20 янв. 2006. М.: Ленанд, 2006. С. 432–437.
20. Каледин В.О. и др. Моделирование статики и динамики оболочечных конструкций из композиционных материалов. М.: Физматлит, 2014. 196 с.
21. Bakulin V.N. A Model for Refined Calculation of the Stress-Strain State of Sandwich Conical Irregular Shells // *Mechanics of Solids*. 2019. Vol. 54. № 5. P. 786–796.
22. Bakulin V.N. Layer-by-Layer Stress-Strain Analysis of Irregular Sandwich Shells of Revolution with Non-Zero Gaussian Curvature // *Mechanics of Solids*. 2021. Vol. 56. Iss. 7. P. 1439–1450.
23. Bakulin V.N. Block-Layer Approach for the Analysis of the Stress-Strain State of Three-Layer Irregular Cylindrical Shells of Rotation // *Mechanics of Solid*. 2021. Vol. 56. Iss. 7. P. 1451–1460.
24. Балабух Л.И. и др. Основы строительной механики ракет. М.: Высшая школа, 1969. 494 с.
25. Бакулин В.Н. Трехмерная оболочечная модель для послойного исследования напряженно-деформированного состояния трехслойных нерегулярных конических оболочек // Докл. РАН. Физика, технические науки. 2023. Т. 512. № 1. С. 51–57.
26. Новожилов В.В. Теория тонких оболочек. Л.: Судпромгиз, 1962. 431 с.
27. Образцов И.Ф. и др. Строительная механика летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1986. 536 с.
28. Бакулин В.Н. Послойное исследование напряженно-деформированного состояния трехслойных конических отсеков летательных аппаратов с прямоугольными в плане вырезами // Изв. вузов. Авиационная техника. 2022. № 4. С. 37–43.
29. Бакулин В.Н. Эффективная модель несущих слоев для послойного анализа напряженно-деформированного состояния трехслойных цилиндрических нерегулярных оболочек вращения // Изв. РАН. Механика твердого тела. 2020. № 3. С. 69–79.
30. Бакулин В.Н., Демидов В.И. Трехслойный конечный элемент естественной кривизны // Изв. вузов. Машиностроение. 1978. № 5. С. 5–10.
31. Железнов Л.П., Кабанов В.В. Функции перемещений конечных элементов оболочки вращения как твердых тел // Механика твердого тела. 1990. № 1. С. 131–136.
32. Bakulin V.N. Research of the Influence of Rectangular Cutout Dimensions on the Stress-Strain State of Shells Using an Effective Finite Element Model // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 868. Article № 012034.
33. Ashwell D.G., Sabir A.B. A New Cylindrical Shell Finite Element, Based on Simple Independent Strain Functions // *International Journal of Mechanical Sciences*. 1972. Vol. 14. Iss. P. 171–183.
34. Бакулин В.Н. Эффективная модель послойного анализа трехслойных нерегулярных оболочек вращения цилиндрической формы // Докл. РАН. 2018. Т. 478. № 2. С. 148–152.
35. Bakulin V.N. Block Finite-Element Approach to Building Refined Models of Layer-by-Layer Analysis of the Stress-Strain State of Three-Layer Irregular Shells // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1392. Article № 012065.
36. Прохоров Б.Ф., Кобелев В.Н. Трехслойные конструкции в судостроении. Л.: Судостроение, 1972. 344 с.
37. Бакулин В.Н. Конечно-элементная модель для анализа напряженно-деформированного состояния трехслойных оболочек // Математическое моделирование. 2006. № 1. С. 3–9.
38. Белкин А.Е., Гаврюшин С.С. Расчет пластин методом конечных элементов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 232 с.
39. Zienkiewicz O.C. *The Finite Element Method in Engineering Science*. London: McGraw-Hill, 1971. 541 p.
40. Постнов В.А., Хархурим И.Я. Метод конечных элементов в расчетах судовых конструкций. Л.: Судостроение, 1974. 341 с.
41. Голованов А.И., Тюленева О.Н., Шигабутдинов А.Ф. Метод конечных элементов в статике и динамике тонкостенных конструкций. М.: Физматлит, 2006. 392 с.
42. Стренг Г., Фикс Дж. Теория метода конечных элементов. М.: Мир, 1977. 350 с.
43. Bakulin V.N. The Influence of Elasticity of the Filler Material on Stresses in the Layers of Three-Layered Shells of Rotation under the Action of Local Loads // *Materials Physics and Mechanics*. 2016. Vol. 26. № 1. P. 33–37.
44. Бакулин В.Н. Влияние размеров прямоугольных в плане вырезов и модуля упругости подкрепляющих закладных элементов на напряженно-деформированное состояние трехслойных отсеков // Изв. вузов. Авиационная техника. 2023. № 2. С. 11–21.

45. Бакулин В.Н. Влияние угла раствора прямоугольных в плане вырезов на напряженно-деформированное состояние трехслойных цилиндрических отсеков // Изв. вузов. Авиационная техника. 2024. № 1. С. 21–29.

Поступила в редакцию 3.06.24
После доработки 17.07.24
Принята к публикации 17.07.24

Influence of the Thickness of the Bearing Layer on the Stress-Strain State in Layers of Sandwich Cylindrical Compartments with Rectangular Cutouts

V.N. BAKULIN

IAM RAS, Moscow

A model of layer-by-layer finite element analysis of the stress-strain state of sandwich cylindrical irregular shells of revolution is considered. The influence of the thickness of the inner load-bearing layer on the stress-strain state in the layers of sandwich cylindrical compartments weakened by rectangular cutouts is investigated.

Sandwich cylindrical shells of revolution, rectangular cutouts, stress-strain state, block model, layer-by-layer finite element analysis