

УДК 620.172.23:62–215

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ОБОЛОЧЕЧНОЙ КОМПОЗИТНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ ОСЕВОМ СЖАТИИ

© В. О. Каледин¹, А. Ф. Разин², Т. В. Бурнышева¹, О. А. Штейнбрехер¹*Статья поступила 15 марта 2014 г.*

Рассмотрена задача идентификации фактических условий нагружения составной оболочечной конструкции путем интерпретации данных натурных испытаний. Конструкция состоит из стрингерного отсека, выполненного из алюминиевого сплава, и композитной сетчатой оболочки. При проведении натурного эксперимента сжимающая нагрузка прикладывалась к верхней кромке стрингерного отсека. Для решения задачи идентификации приложенная нагрузка рассматривалась как комбинация сжимающей силы и изгибающего момента. Критерием качества идентификации выбрана сумма квадратов отклонений измеренных перемещений в точках установки датчиков от вычисленных перемещений тех же точек. Перемещения определялись численно методом конечных элементов в пакете программ «Композит». Рассмотрены два способа моделирования нагружения: распределением погонной нагрузки по верхней кромке конструкции и передачей силы и момента через «жесткий» узел. Найденные параметры нагружения через «жесткий» узел обеспечивают совпадение расчетных и экспериментально измеренных перемещений в пределах погрешности измерений. Показано, что расчет с приложением погонной силы на кромке не согласуется с экспериментальными данными. Полученные параметры нагружения использовались при решении задачи идентификации жесткости крышек люков.

Ключевые слова: сетчатая композитная конструкция; натурные испытания; интерпретация данных; идентификация; метод конечных элементов.

В настоящее время в качестве силовых элементов машиностроительных конструкций применяются сетча-

тые композитные оболочки [1, 2]. Такие оболочки представляют собой регулярную систему ребер (спи-

¹ Новокузнецкий институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Кемеровский государственный университет», г. Новокузнецк, Россия; e-mail: tburn@mail.ru

² ОАО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения», г. Хотьково, Россия.

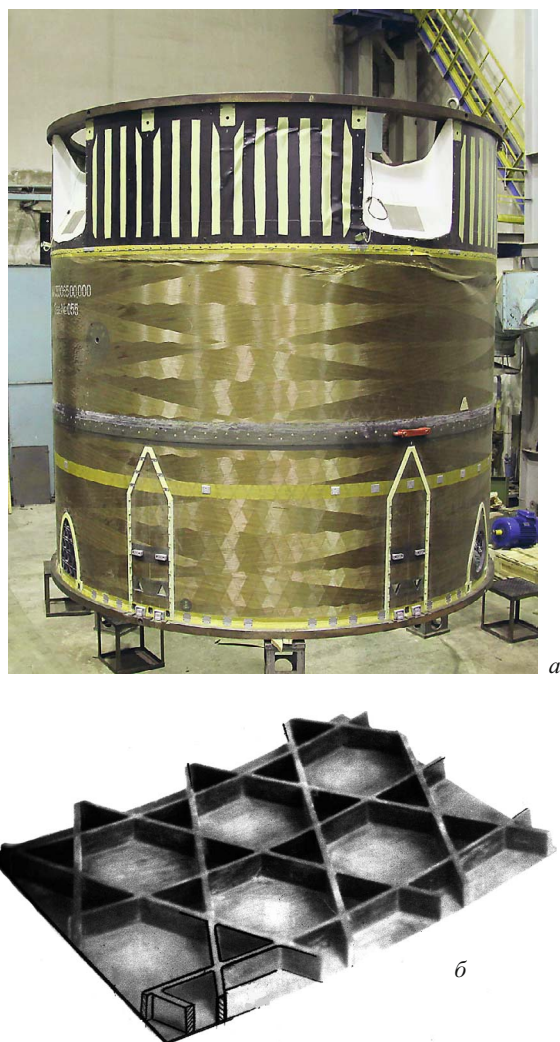


Рис. 1. Составная цилиндрическая оболочка: а — общий вид, б — расположение ребер

ральных и кольцевых) и обшивку. К особенностям таких конструкций следует отнести наличие в сетчатых оболочках вырезов под люки, усиленных окантовкой.

Натурные испытания сложных конструкций связаны с необходимостью интерпретации данных, содержащих погрешности вследствие неточного воспроизведения в эксперименте заданных условий нагружения и неполного соответствия фактических прочностных и жесткостных параметров конструкции их проектным значениям. По этим причинам анализ данных натурных испытаний должен сопровождаться уточнением фактических условий эксперимента. Одной из частных задач, решаемых при анализе экспериментальных данных, является идентификация фактических параметров прочности, жесткости и нагружения, которые были реализованы при проведении конкретного эксперимента над конкретным экземпляром испытываемого изделия.

В данной работе приведено решение идентификационной задачи по уточнению фактических условий испытаний составной цилиндрической оболочки, включающей два отсека — металлический и сетчатый

композитный. В силу сложности конструкции для расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) использовался численный метод решения, основанный на полном дискретном моделировании элементов конструкции [3, 4]. Численный расчет проводился в пакете программ «Композит-НК», предназначенном для решения краевых задач, с встроенным входным языком для задания данных, что позволяет проводить быструю перестройку модели при необходимости варьирования настроечных параметров [5].

Исследуемая силовая конструкция (рис. 1) представляет собой цилиндрическую оболочку и состоит из двух частей: композитной сетчатой оболочки и стрингерного алюминиевого отсека. Структурная схема конструкции приведена на рис. 2.

Нижняя часть конструкции — цилиндрическая оболочка из углепластика в виде усеченного конуса, образованная системой спиральных и кольцевых ребер, соединенных внешней поверхностью с однослойной обшивкой. Обшивка конструкции выполнена из материала со следующими физико-механическими характеристиками: модули упругости в осевом и окружном направлении $E_1 = E_2 = 30\,000$ МПа; модуль сдвига $G = 5000$ МПа; коэффициенты Пуассона $\mu_1 = \mu_2 = 0,2$. Высота цилиндра составляет $0,69R$ (R — радиус оболочки). Высота (d) сечения спиральных и кольцевых ребер одинакова. Ширина сечения — $0,25d$, расстояния между спиральными ребрами по высоте — $2,63d$, между осями пар кольцевых ребер — $3,56d$, между ребрами внутри пары — $0,25d$. Спиральные и кольцевые ребра выполнены из одного и того же материала со следующими механическими характеристиками: продольный модуль упругости $E_1 = 64900$ МПа; модуль упругости поперек армирования $E_2 = 6470$ МПа; модуль сдвига $G = 3800$ МПа; коэффициенты Пуассона $\mu_1 = \mu_2 = 0,21$.

Конструкция подкреплена двумя шпангоутами — передним и задним, встроенным кольцом и четырьмя продольными ребрами. Имеются три компенсированных выреза круглой формы, усиленные двумя окантовками переменной толщины: внутренней (ближней к вырезам) и внешней (отдаленной от вырезов). Поверх внешней окантовки толщиной h_e располагается внутренняя окантовка толщиной h_m . Вырезы под люки закрыты крышками, форма которых совпадает с формой вырезов. Люк верхнего выреза усилен тремя вертикальными стрингерами, которые выполнены в виде равнобоких уголков.

Металлический отсек представляет собой конструкцию цилиндрической формы и состоит из однослойной алюминиевой обшивки. Высота этой части конструкции составляет $0,53R$. Отсек содержит четыре равномерно расположенных по окружности проема, частично закрытых несъемными крышками, и укреплен шестью десятками алюминиевых стрингеров и тремя шпангоутами. Алюминиевый сплав, из которого выполнен отсек, имеет следующие механические

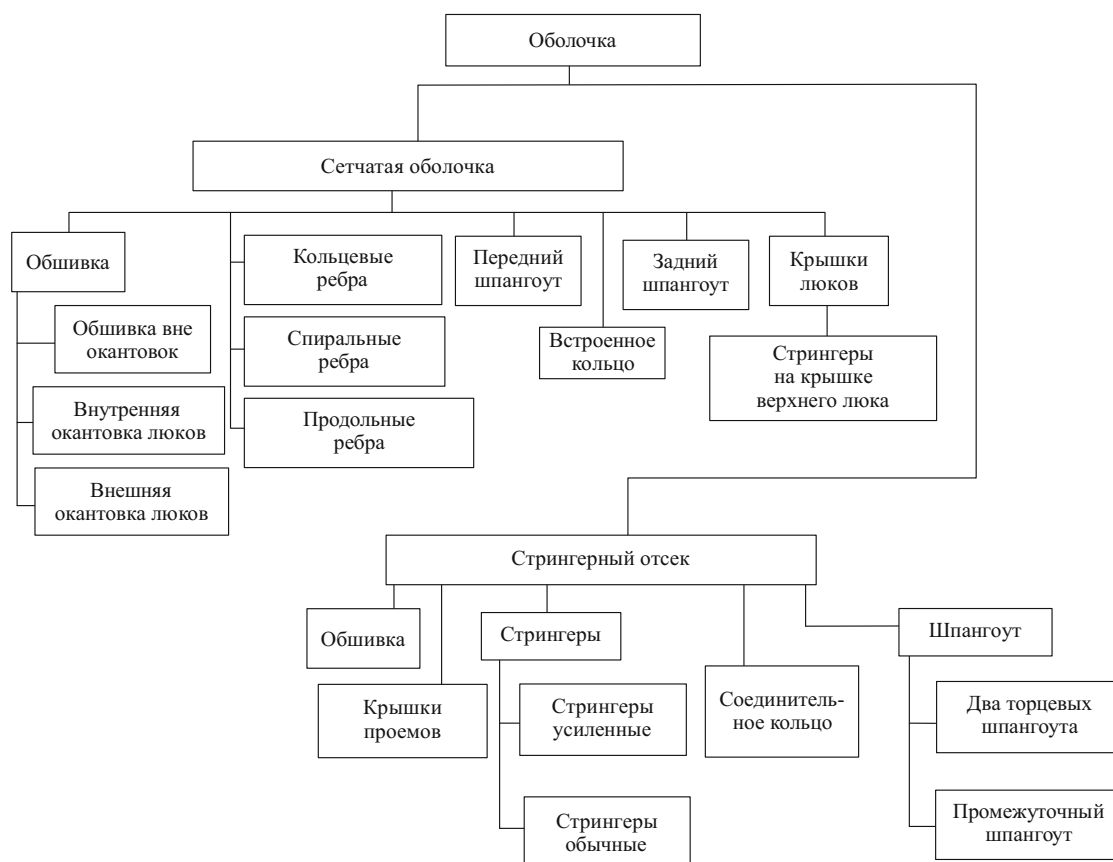


Рис. 2. Структурная схема модели

характеристики: модуль Юнга $E = 7,2 \cdot 10^4$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$.

Стрингерный отсек стыкуется с нижней (комполитной) частью конструкции при помощи соединительного кольца. В средней части этот отсек содержит промежуточный шпангоут сложной геометрии. Шпангоут имеет переменное сечение — z-образной формы между проемами и формы тавра у проемов. Часть шпангоута возле проемов имеет вид пластины. Торцевые шпангоуты имеют сечение в форме неравнобокого уголка.

Толщины обшивок композитной и алюминиевой частей конструкции равны: $h_k = h_c = h$.

Построение дискретной модели конструкции. Для проведения численного расчета НДС конструкции в пакете программ «Композит-НК» была построена дискретная модель оболочки.

Схема разбиения обшивки нижней части конструкции на треугольные конечные элементы получалась естественным образом наложением оребрения. Границы треугольных элементов составляют проекции осей спиральных ребер и линии, проходящие через точки их пересечения параллельно продольной оси оболочки и вдоль окружности. Эта же сетка узлов используется при разбивке каждого ребра и шпангоутов на конечные элементы типа балок Тимошенко.

Для моделирования ребер и стрингеров алюминиевой части конструкции используется двухузловой конечный элемент с шестью степенями свободы в каждом узле и аппроксимацией прогибов эрмитовыми полиномами третьей степени, учитывающий деформации поперечного сдвига по сдвиговой модели Тимошенко [6]. Обшивка и окантовки моделировались элементами изгибаемой пластины Зенкевича с неполной кубической аппроксимацией прогибов [7]. Перемещения вдоль осей элементов ребер и в плоскости каждого треугольника обшивки аппроксимировались линейными сплайнами.

Дискретная модель конструкции, содержащая 32364 конечных элемента и 9188 узлов, представлена на рис. 3.

В натурном эксперименте к верхней кромке конструкции прикладывалась сжимающая сила F . Нагружение осуществлялось через плиту, жесткость которой превышает жесткость испытываемой конструкции. При этом возможно появление трудно контролируемой погрешности (смещения точки приложения равнодействующей от оси оболочки и отклонения вектора равнодействующей от оси оболочки). Такая погрешность может быть выявлена и количественно оценена путем идентификации.

При построении математической модели нагружение через плиту учитывалось приложением сосредоточенной силы и моментов в «жестком» узле на нагру-

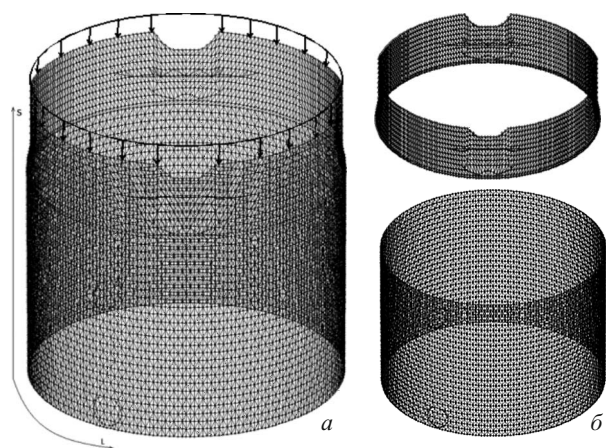


Рис. 3. Дискретная модель конструкции: *a* — общий вид расчетной модели и схема приложения нагрузки; *б* — сетки элементов алюминиевой и композитной частей

женной кромке. «Жесткий» узел располагается в центре окружности и имеет шесть степеней свободы — три линейных перемещения и три угла поворота. Перемещения узлов верхней кромки выражаются через перемещения «жесткого» узла, что позволяет привести нагрузку, распределенную по кромке произвольным образом, к действию сосредоточенных сил и моментов, приложенных в «жестком» узле.

При проведении натурального эксперимента на осевую жесткость конструкция жестко закреплялась по нижней кромке, а на верхнюю кромку металлического отсека через плиту прикладывалась нагрузка F .

В процессе нагружения оболочки в определенных ее точках измерялись перемещения в направлении образующей. Для этого на конструкции крепились датчики перемещений (экстензометры сопротивления): восемь в композитной части и восемь в металлическом отсеке (рис. 4).

Натурный эксперимент проводился на двух одностипных конструкциях (А и Б), изготовленных в разное время. Были получены значения осевых перемещений в точках расположения датчиков. Результаты натурального эксперимента (рис. 5) показали, что перемещения одних и тех же точек у двух испытываемых конструкций различаются на 15–25 %. Эта разница может

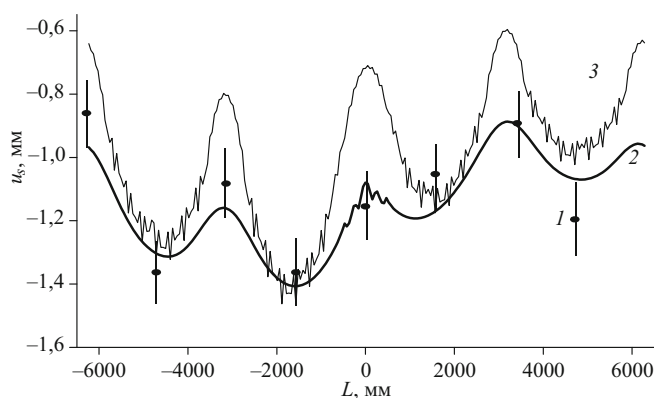


Рис. 5. Распределение осевых перемещений в композиционной части конструкции: 1 — данные натурального эксперимента; 2 и 3 — результаты численного расчета при задании нагрузки с использованием «жесткого» узла и задании распределенной нагрузки

быть обусловлена различием фактических размеров и физико-механических параметров материалов двух вариантов конструкции под влиянием технологических факторов [8], а также случайными отклонениями параметров нагрузки.

Видно, что осевые перемещения неравномерно распределены вдоль окружности, т.е. наряду со сжатием имеет место общий изгиб. Таким образом, возникает задача идентификации приложенной нагрузки: требуется найти сосредоточенные силы и моменты на «жестком» узле, обеспечивающие минимальное расхождение вычисленных и измеренных перемещений. Кроме того, была предпринята попытка оценить реалистичность приложения нагрузки через «жесткий» узел, для чего был проведен расчет с нагрузкой, распределенной по кромке, без наложения дополнительных кинематических ограничений на перемещения нагруженной кромки.

Сосредоточенная нагрузка в «жестком» узле характеризуется шестью числовыми параметрами (координатами вектора силы и вектора момента). Соответственно, идентификация сводится к определению минимума функции шести переменных. В качестве критерия качества идентификации была выбрана сумма квадратов отклонений измеренных перемещений в

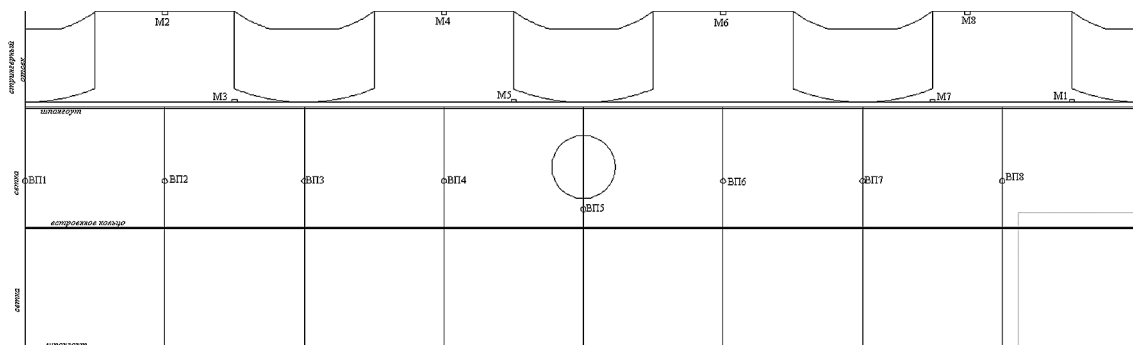


Рис. 4. Схема расположения датчиков перемещения на развертке конструкции

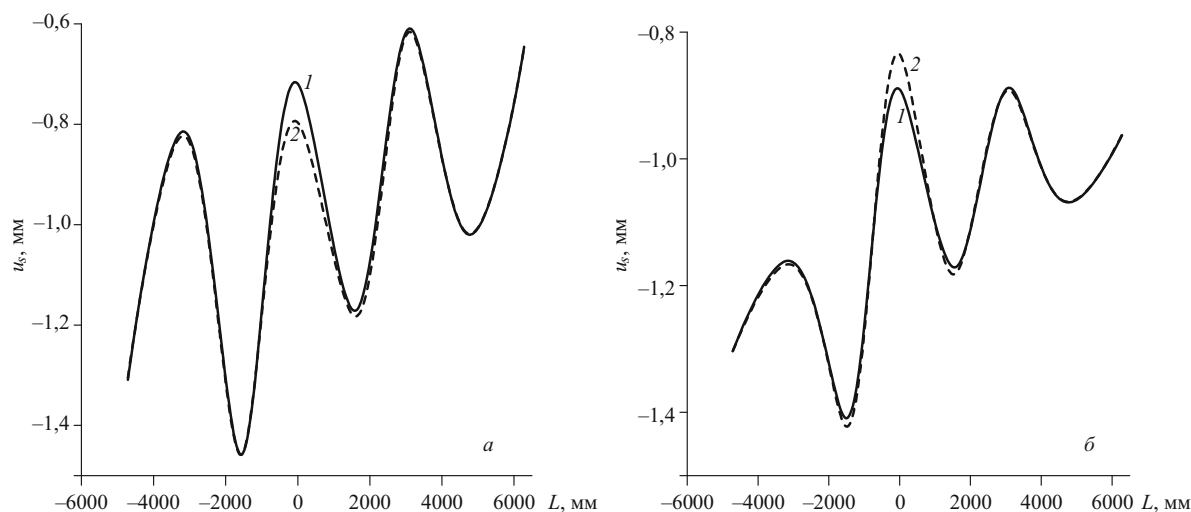


Рис. 6. Распределение осевых перемещений в композиционной части конструкции Б при нагрузке, распределенной по верхней кромке (а) и сосредоточенной в «жестком» узле (б): 1 и 2 — при закрытых и открытых люках

точках установки датчиков от вычисленных перемещений тех же точек.

Распределенная нагрузка в вычислительном эксперименте представлялась в виде комбинации равномерно приложенной нагрузки F и неравномерно распределенной нагрузки, создающей изгибающий момент:

$$R = a_1 F + a_2 F \sin \alpha + a_3 F \cos \alpha. \quad (1)$$

Распределение перемещений в конструкции в силу линейности деформирования также равно линейной комбинации трех полей перемещений с теми же коэффициентами:

$$u = a_1 u + a_2 u_s + a_3 u_c. \quad (2)$$

Базисные функции u , u_s и u_c численно рассчитываются в пакете программ «Композит-НК» при приложении

трех составляющих нагрузок (1) по отдельности. Таким образом, задача идентификации фактического распределения нагрузок при таком моделировании нагружения заключается в отыскании минимума квадратичной функции трех переменных — коэффициентов разложения (2).

В таблице представлены рассчитанные и измеренные перемещения в конструкциях А и Б по восьми датчикам, а также результаты сравнения этих перемещений.

На рис. 5 представлено распределение как измеренных, так и вычисленных перемещений. Вертикальными отрезками показаны границы возможной погрешности измерений используемыми датчиками, которая не превышает 2 % от верхнего предела диапазона измерений, равного 5 мм, т.е. $\pm 0,1$ мм. Как видно, параметры нагружения через «жесткий» узел, найден-

Результаты натурного эксперимента и численного расчета

Датчик	Конструкция	Измеренные перемещения, мм	Рассчитанные перемещения, мм		Отклонение вычисленных перемещений от измеренных, %	
			Нагружение через «жесткий» узел	Распределенная нагрузка	Нагружение через «жесткий» узел	Распределенная нагрузка
ВП1	А	0,54	0,7766	0,5294	43,81	1,96
ВП2		1,164	1,0656	1,0938	8,45	6,03
ВП3		0,914	0,9092	0,6395	0,53	30,03
ВП4		0,962	1,0251	1,0675	6,56	10,97
ВП5		0,73	0,6013	0,5143	17,63	29,55
ВП6		0,699	0,7581	0,8121	8,45	16,18
ВП7		0,56	0,6005	0,4384	7,23	21,71
ВП8		0,959	0,7989	0,8085	16,69	15,69
ВП1	Б	0,86	0,963	0,6382	11,98	25,79
ВП2		1,363	1,3038	1,3091	4,34	3,95
ВП3		1,083	1,161	0,8045	7,20	25,72
ВП4		1,363	1,4071	1,4631	3,24	7,34
ВП5		1,155	0,8905	0,719	22,90	37,75
ВП6		1,053	1,1713	1,1756	11,23	11,64
ВП7		0,829	0,8884	0,6021	7,17	27,37
ВП8		1,195	1,0687	1,0225	10,57	14,44

ные в результате идентификации, обеспечивают совпадение расчетных и экспериментально измеренных перемещений в пределах погрешности измерений. Расчет с приложением погонной силы на кромке не согласуется с экспериментальными данными.

Полученные результаты позволяют количественно интерпретировать данные измерений и учесть влияние фактических условий нагружения на напряженно-деформированное состояние конструкции. Поправка на отклонение линии приложения равнодействующей в дальнейшем может быть использована для оценки напряжений, которые возникнут в конструкции при других условиях нагружения.

Идентификация жесткости крышек люков. В отличие от монолитно связанных конструктивных элементов, крышки люка соединяются с основной частью конструкции механическим соединением (разъемным или неразъемным), что создает вероятность некоторого нарушения совместности деформирования крышек и ответной части конструкции (окантовок люков). Это нарушение проявляется в уменьшении жесткости крышек по сравнению с проектной, что приводит к искажению напряженно-деформированного состояния. Поэтому представляется актуальной оценка фактической жесткости крышек люка, которая также может быть выполнена методом параметрической идентификации. Как предельный случай может быть смоделирована ситуация, в которой крышка люка имеет нулевую жесткость (крышка люка не соединена с окантовкой).

Рассматриваемая оболочка имеет три люка. Были рассмотрены шесть возможных ситуаций: 1) закрыты все люки; 2) открыт один нижний люк; 3) открыты два нижних люка; 4) открыт верхний люк; 5) открыты один нижний и верхний люки; 6) открыты все люки. В результате вычислительного эксперимента установлено, что раскрытие люка влияет на перемещения только в окрестности этого люка. Кроме того, влияние раскрытия люков зависит от способа приложения нагрузки: при распределенной нагрузке раскрытие центрального люка увеличивает перемещения на 10 %, а при сосредоточенной силе — уменьшает на 6–7 %. Раскрытие нижних люков оказывает меньшее

влияние: при распределенной нагрузке перемещения уменьшаются на 2 %, а при сосредоточенной — на 1 %. На рис. 6 показано распределение перемещений в композитной части конструкции.

Таким образом, идентификация параметров конструкции по данным натурных испытаний позволяет получать объективную количественную оценку отклонений факторов, определяющих фактические условия испытаний, от номинальных проектных значений. Проведение идентификации для оценки фактических условий нагружения и соединения крышек люков с окантовками дает возможность более обоснованно распространить данные испытаний на другие условия реальной работы конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев В. В., Разин А. Ф. Композитные сетчатые балочные элементы для авиационных конструкций / Вопросы оборонной техники. 2006. № 1/2. С. 3–6.
2. Васильев В. В., Барынин В. А., Разин А. Ф., Петроковский С. А., Халиманович В. И. Анизотропные композитные сетчатые конструкции — разработка и приложение к космической технике / Композиты и наноструктуры. 2009. № 3. С. 38–50.
3. Бурнышева Т. В., Каледин В. О. Сравнение дискретного и континуального подхода к расчету напряженного состояния сетчатых оболочечных конструкций при статическом нагружении / Научно-технический вестник Поволжья. 2011. № 4. С. 113–116.
4. Каледин В. О., Аникина Ю. В., Бурнышева Т. В., Решетникова Е. В. Математическое моделирование статики сетчатой оболочки с учетом концентрации напряжений / Вестник Томского государственного университета. 2006. № 19. С. 233–237.
5. Бурнышева Т. В., Каледин В. О., Равковская И. В., Эптешева С. В. Развитие пакета программ математического моделирования сопряженных задач механики неоднородных конструкций / Вестник Кемеровского государственного университета. 2010. № 1(41). С. 3–8.
6. Каледин В. О. и др. Разработка методики, алгоритмов и программ для расчета напряженно-деформированного состояния конструкций из композиционных материалов. Статика слоистых конструкций. Новокузнецк, 1985. — 102 с. Деп. в ВНИИ, № 02860024610.
7. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. — М.: Мир, 1975. — 541 с.
8. Шевченко А. А. Физикохимия и механика композиционных материалов. — М.: Профессия, 2010. — 224 с.