

Программно-ориентированный подход к анализу перемещений в контактно-стесненных оболочечных конструкциях

© А.В. Егоров

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

В трансверсально составных оболочечных конструкциях тонкая металлическая оболочка окружена жесткой средой. Предложенный подход к решению задач на расслоение в таких конструкциях основан на трех положениях: введение в расчетную схему конструкции технологических отклонений, соответствующих допускаемым дефектам в реальных изделиях; определение объемного напряженно-деформированного состояния конструкции; учет при деформировании конструкции режима реального времени. Подход реализован в программном комплексе LS-DYNA в динамической постановке с применением объемных конечных элементов TSHELL и SOLID, с учетом геометрической и физической нелинейности конструкции и поверхности контакта оболочка–среда с односторонней связью по нормали, без касательных взаимодействий. Результатом расчетов по предложенному подходу является оценка нагрузок на исходную двухслойную конструкцию, при которых металлическая оболочка с малой изгибной жесткостью способна терять устойчивость в локальной области в виде внутренних складок.

Приведен пример расчета цилиндрического металлокомпозитного баллона высокого давления при нагружении охлаждаемой наружной композитной оболочкой. Установлены временные интервалы начала расслоения и роста складок на поверхности внутренней металлической оболочки (лейнера). Решения представлены в виде изображений деформированной поверхности лейнера и графиков изменения напряжений, деформаций и перемещений во времени; показано их соответствие друг другу. Предложенный подход позволяет наглядно и точно провести оценку возможности расслоения в контактно-стесненных оболочечных конструкциях уже на этапе проектирования.

Ключевые слова: *составной металлокомпозитный баллон давления, локальная устойчивость лейнера, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, LS-DYNA, расслоение*

Введение. На практике существует большое число металлических оболочечных конструкций, деформации которых ограничены внешней более жесткой средой. Это, в первую очередь, современные двухслойные металлокомпозитные тонкостенные конструкции, например, баллоны высокого давления для авиационно-космической техники, в которых деформации металлической оболочки (лейнера) ограничены композитной оболочкой, выполненной из высокомодульных материалов типа углепластиков или органопластиков. К двухслойным металлокомпозитным конструкциям относятся также составные трубчатые и стержневые элементы, емкостные неоднородные конструкции. Под схемой внешне ограниченной оболочки можно понимать конструкции

транспортных трубопроводов типа труба–грунт, труба–бетонное окружение. Во всех случаях наружные деформации металлических оболочек контактно ограничены внешней средой, что существенно отражается на их поведении под внешней прессовой, гидростатической или тепловой нагрузкой. Если при проектировании двухслойных конструкций не учитывать односторонний контактный эффект, то при их изготовлении и эксплуатации возможен отход (отслоение) металлической оболочки от жесткого основания и, как следствие, локальная потеря устойчивости оболочки и возникновение складок, что относится к недопустимым дефектам. Поэтому изучение механизма поведения контактно стесненных металлических оболочек является актуальной задачей.

Цель данной работы — предложить программно-ориентированный подход к анализу расслоений в двухслойной металлокомпозитной емкостной конструкции, связанных с локальной потерей устойчивости внутренней металлической оболочки. Ограниченное число публикаций по данной проблеме свидетельствует о сложности задачи.

Применительно к составным кольцам и цилиндрам первые работы были выполнены В.И. Феодосьевым [1] и Д. Глоком [2], в которых приведены упругие аналитические решения с учетом начального несовершенства формы. Дальнейшим развитием этих работ стали учет пластических свойств и переход к численным методам исследований. Подробный обзор литературы содержится в работе [3], в которой авторы применили метод конечных элементов и исследовали плоскую задачу.

В современных публикациях [4–17] по расчету двухслойных металлокомпозитных баллонов давления и трубчатых элементов конструкций анализируются вопросы прочности, общей устойчивости, разрушения композитных слоистых оболочек, включая внутренние расслаивания композитов. Также все больше внимания уделяется учету повреждений в композитах и прогнозу предельных нагрузок на конструкции. При этом механизм отслоения деформируемых металлических оболочек от жестких композитных оболочек подробно не исследовался, несмотря на экспериментально установленный [18] эффект возможного отслоения.

Однако для оценки работоспособности реальных конструкций, содержащих допустимые дефекты геометрических и механических свойств, необходимо знание объемного напряженно-деформированного состояния в динамике, в геометрически и физически нелинейной постановке, при особенностях технологического и эксплуатационного нагружений. Данные вопросы нашли отражение в работах [19–21], но в них не показан единый подход к решению подобной задачи.

Предлагаемый программно-ориентированный подход к анализу механического поведения внешне ограниченных оболочечных конструкций строится на базе трех положений. Во-первых, в расчетную схему вводятся технологические отклонения, которые соответствуют возможным допустимым дефектам и размещены в характерных зонах конструкций. Во-вторых, определяется пространственное напряженно-деформированное состояние конструкции. В-третьих, задача решается в режиме реального времени. Такой подход реализован в программном комплексе LS-DYNA в динамической постановке с применением объемных конечных элементов.

Методика программного подхода. Основу методики составляют технологические отклонения, которые вводятся специальным образом, чтобы идеальную расчетную схему конструкции свести к реальной схеме. Именно благодаря такому приему удается в осесимметричные расчетные схемы ввести малые геометрические или механические возмущения, не изменяющие начальную форму конструкции. В этом состоит отличие технологических отклонений от общепринятых в задачах устойчивости начальных несовершенств, смысл которых заключается в начальном малом предполагаемом изменении формы конструкции. Эффект технологических отклонений удобно продемонстрировать на задаче устойчивости гибкого центрально сжатого стержня (рис. 1). В работе [22] показано, что без технологических отклонений идеальный стержень под нагрузкой не изгибается, остается прямолинейным, но более коротким и широким за счет эффекта Пуассона. Замена даже малого объема стержня на материал с пониженным модулем упругости (вкладыш), в пределах разрешенных допусков, приводит к потере устойчивости стержня, причем критическая нагрузка отличается от эйлеровой силы не более, чем на 26,9 % для очень гибкого стержня (с параметрами гибкости $\lambda = 867$) и на 4,54 % для стержня с $\lambda = 400$. Полученное отличие объясняется учетом в предлагаемом подходе инерционных нагрузок, а сами значения критических сил располагаются в некотором интервале, что теоретически обосновано В.И. Феодосьевым [1]. В частности, в этой работе показано, что разброс значений критических сил сжатия прямолинейного стержня с плоскими торцами может лежать в интервале $(1,14-4) P_3$. Здесь под P_3 понимается критическая сила, вычис-

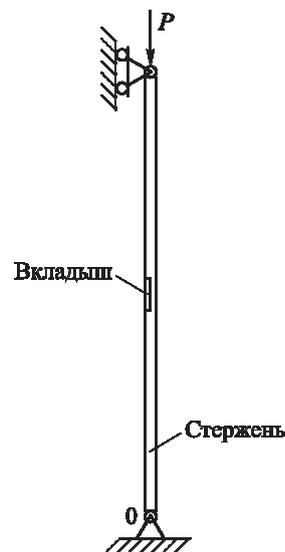


Рис. 1. Расчетная схема сжатого стержня с вкладышем

ленная по формуле Эйлера для шарнирно закрепленного стержня. Наличие интервала значений критических сил объясняется комплексом свойств системы и возмущений, действующих на систему.

По результатам проведенного исследования можно сделать вывод о применимости приема технологических отклонений к задачам устойчивости внешне ограниченных металлических оболочек. Действительно, в работе [19] отмечается, что при нагреве идеального металлического кольца в жесткой обойме кольцо не изгибается (не теряет устойчивость), а только увеличивается в поперечных сечениях (эффект Пуассона). Применяя в расчете по предлагаемому подходу прием технологических отклонений [19], было получено значение критической температуры потери устойчивости нагретого стального кольца (рис. 2) в среднем на 10 % выше, чем экспериментально замеченная В.В. Васильевым [18] температура, что свидетельствует о достоверности предлагаемого подхода.

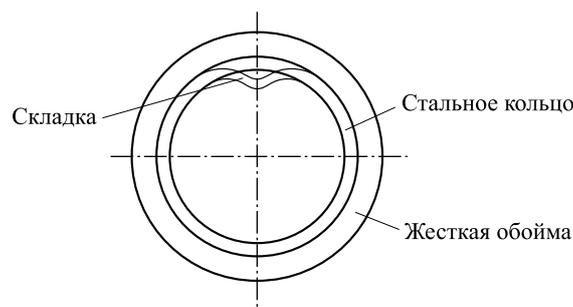


Рис. 2. Локальная потеря устойчивости нагретого кольца

Использование в расчетах по предлагаемой методике объемных конечных элементов позволяет более точно определять компоненты напряженно-деформированного состояния конструкций, особенно в краевых зонах, и делать заключение об их работоспособности. В частности, учет осевых сил в задачах расчета металлокомпозитных баллонов высокого давления [21] приводит к повышению интенсивности напряжений во внутренней металлической оболочке (цилиндрической части лайнера) на 15 % по отношению к плоской задаче. В стержневых конструкциях через объемные конечные элементы задаются вкладыши (имитирующие технологические отклонения) несимметрично (см. рис. 1) относительно центральной оси. Объемные конечные элементы необходимы при моделировании металлокомпозитных баллонов давления с учетом днищ, полюсных фланцев и технологических отклонений.

Применение объемных конечных элементов требуется и в задачах типа труба–грунт, где наблюдаются разломы в грунте. Перечис-

ленные задачи подтверждают важность моделирования конструкций с помощью объемных конечных элементов.

Предлагаемая методика ориентирована на динамику процессов деформирования. Влияние на поведение внешне стесненных оболочек оказывает закон изменения нагрузок во времени, что отражается на величине инерционных сил и моментов. Так, процессы деформирования стержня при действии кратковременной ($\tau \leq \tau_1$) и продолжительной ($\tau > \tau_1$) осевой сжимающей силы отличаются принципиально: в первом случае — это затухающий продольно-поперечный волновой процесс, во втором — непрерывное деформирование, сопровождающееся большими перемещениями [22]. Здесь τ — время действия силы, с; τ_1 — время однократного продвижения прямой и обратной волны деформации в стержне. Обзор публикаций по этой задаче содержится в работе [23].

Более сложно вопрос о времени нагружения решается в задачах устойчивости оболочек, модели деформирования которых приводят к большим размерностям задач. Поэтому время действия нагрузок выбирается малым, путем проведения численного эксперимента. Это время, с одной стороны, не должно создавать ударные нагрузки, а с другой — быть разумным по времени машинного счета. Для быстрейшего затухания колебательных процессов в расчетах применяется команда глобального демпфирования (*DAMPING_GLOBAL), предусмотренная в программном комплексе LS-DYNA. Из расчетов по предлагаемому программно-ориентированному подходу установлено, что для составной металлокомпозитной оболочечной конструкции цилиндрической формы рациональное время действия нагрузки находится в интервале 0,01...0,05 с. Поскольку эта задача решается в режиме реального времени [21], то в указанном интервале и происходит основное деформирование, которое не различимо человеческим глазом (в кинофильмах кадры сменяются за 0,04 с), т. е. для наблюдателя переход системы из одного положения равновесия в смежное другое происходит скачком и это согласуется с классическим понятием потери устойчивости.

Рассмотренная методика программно-ориентированного подхода может быть применена к анализу расслоений в двухслойных металлокомпозитных баллонах высокого давления.

Особенности расчета металлокомпозитных баллонов. Современные сверхлегкие и высокопрочные металлокомпозитные баллоны для авиационно-космической техники имеют особенность — возможность расслаиваться по границе между внутренней металлической оболочкой (лейнер) и наружной композитной оболочкой в случае неблагоприятных внешних условий. При таком механизме нарушения монолитности конструкции предъявляются дополнитель-

ные требования и к проектировочным расчетам, в которых необходимо принимать во внимание контактные взаимодействия на границе лейнер–композитная оболочка. Проявление неблагоприятных внешних условий возможно при изготовлении баллонов и во время их эксплуатации. К технологическим особенностям изготовления баллонов относятся намотка с натяжением композитной ленты на готовый лейнер и последующая термообработка собранной конструкции баллона. К особенностям эксплуатации баллонов относится цикличность нагружения внутренним давлением, сопровождающаяся переходом лейнера в пластик. В указанных случаях изготовления и эксплуатации составных баллонов возможно их расслаивание, даже при наличии в конструкции допустимых дефектов. Это обстоятельство и оправдывает необходимость проведения специального проектировочного расчета составного баллона в целях выявления опасности расслоения и локальной потери устойчивости лейнера, что относится уже к недопустимым дефектам конструкции.

В качестве примера проанализируем механическое поведение лейнера при намотке на него композитной ленты. Согласно изложенной выше методике программно-ориентированного подхода построим расчетную схему баллона, включая цилиндрическую часть и днища (рис. 3). Введем на цилиндре и днищах технологические отклонения с размерами допустимых дефектов [9] (рис. 4). Выберем для конечно-элементного моделирования объемные конечные элементы типа TSHELL для оболочек и SOLID для жесткого кольца, имитирующего фланец. Назначим малое время опрессовки лейнера и применим глобальное демпфирование. Расчеты проведем в программном комплексе LS-DYNA в динамической постановке.

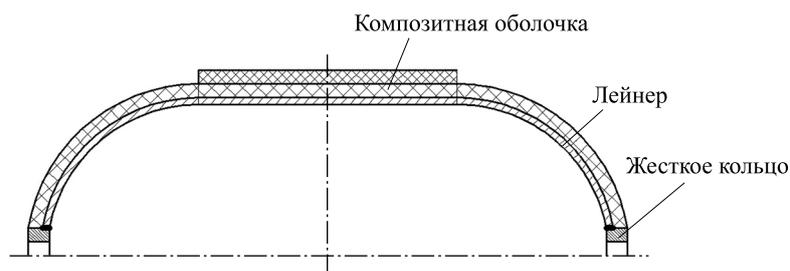


Рис. 3. Расчетная схема цилиндрического металлокомпозитного баллона давления

Для того чтобы снизить размерность задачи, рассмотрим половину баллона (см. рис. 4), на торцах которого зададим геометрические граничные условия, запрещающие вертикальной плоскости симметрии горизонтальные смещения, а жесткому кольцу — перемещения в вертикальной плоскости. Считаем, что лейнер выполнен из алюми-

ниевое сплава с упругопластическими свойствами, линейно-упругая многослойная композитная оболочка — из углеродной ленты и эпоксидного связующего. Давление опрессовки на лейнер задаем через охлаждение композитной оболочки, считая ее теплоизолированной. На первом временном интервале отрицательная температура в композитной оболочке линейно возрастает до значения T_1 , на втором — остается постоянной (рис. 5).

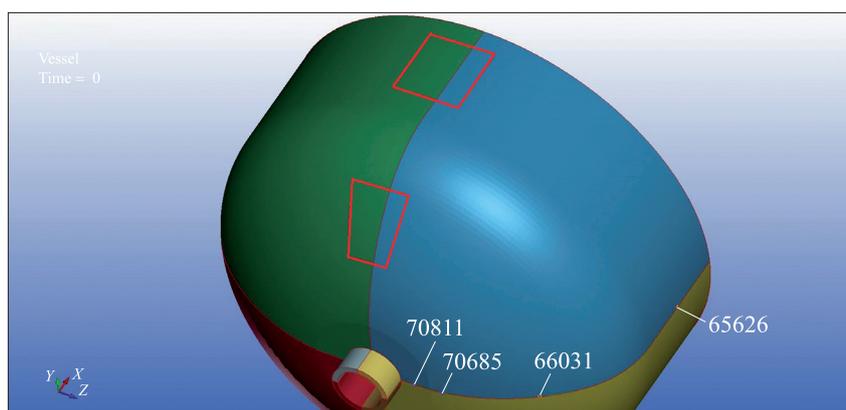


Рис. 4. Расположение технологических отклонений на корпусе баллона

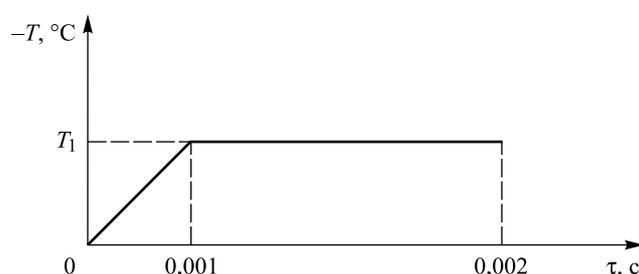


Рис. 5. Изменение температуры T композитной оболочки во времени τ

Размеры баллона: диаметр лейнера в миделевом сечении $D = 0,39\text{ м}$; полная длина баллона $L = 0,46\text{ м}$.

Между лейнером и композитной оболочкой существует односторонняя связь, которая разрешает им отходить друг от друга по нормали к поверхности контакта, но запрещает взаимное проникновение. Касательных взаимодействий нет.

Сформированная расчетная схема металлокомпозитного баллона давления с местными технологическими отклонениями является неосесимметричной, что отражается на результатах расчета.

Анализ результатов. Результаты расчета металлокомпозитного баллона давления удобно представить в двух видах: в виде изобра-

жений деформированной поверхности и в виде графиков напряжений, деформаций и перемещений в функции времени τ нагружения. В силу высокой жесткости композитной оболочки форма ее поверхности при нагружении баллона практически не искажается и основные эффекты, связанные с расслоением баллона, происходят в лайнере. Поэтому представляет интерес исследование поведения лайнера, для чего, во-первых, средствами визуализации снимем с него композитную оболочку и, во-вторых, выберем четыре конечных элемента (см. рис. 4) в характерных зонах лайнера, для которых построим графики изменения напряженно-деформированного состояния лайнера во времени. Сопоставление изображений с графиками дает возможность уточнять временные моменты и места отслоения лайнера от композитной оболочки и определять соответствующие нагрузки на лайнер от намотки на него композитной оболочки по величине напряжений. Учитывая тот факт, что при локальной потере устойчивости лайнера (т.е. при образовании на его поверхности местной складки) в остальной части лайнера снижаются напряжения, можно находить напряжения вне складок перед потерей устойчивости и сравнивать их с напряжениями, возникающими при намотке, которые, в свою очередь, должны определяться по известным методикам, например В.В. Васильева и Н.Г. Мороза [18]. Из такого сравнения делается вывод о появлении или непоявлении складок на лайнере в конкретном баллоне при конкретной намотке.

Расчеты показывают, что вначале, при $\tau \approx 0,0005$ с, в лайнере появляется кольцевая складка вокруг полюсного отверстия с жестким кольцом (рис. 6), затем возникают радиальная складка на днище и контурная — на цилиндре. При $\tau \sim 0,001 \dots 0,0015$ с происходит заметный рост всех складок (рис. 7), жесткое кольцо вдавливаются внутрь баллона. На изображении (рис. 8) видно, что напряжения Мизеса распределены сильно неравномерно по поверхности лайнера. Наибольшие значения имеют место в зонах складок, в остальной области напряжения Мизеса меньше, а напряженное состояние близко к однородному. Данная картина распределения напряжений Мизеса на изображении согласуется с графиком, приведенным на рис. 9, а.

Аналогично ведут себя и компоненты нормальных напряжений по осям x , y , z (рис. 9, б–г). В моменты появления и роста складок наблюдаются изменения в поведении компонентов. Например, на цилиндрической поверхности лайнера (элемент D) возрастание сжимающих напряжений сменяется на снижение окружных (см. рис. 9, б) и меридиональных (см. рис. 9, в) в удаленной от складки области, что обусловлено возникновением контурной продольной складки, которая снижает окружную жесткость цилиндра лайнера.

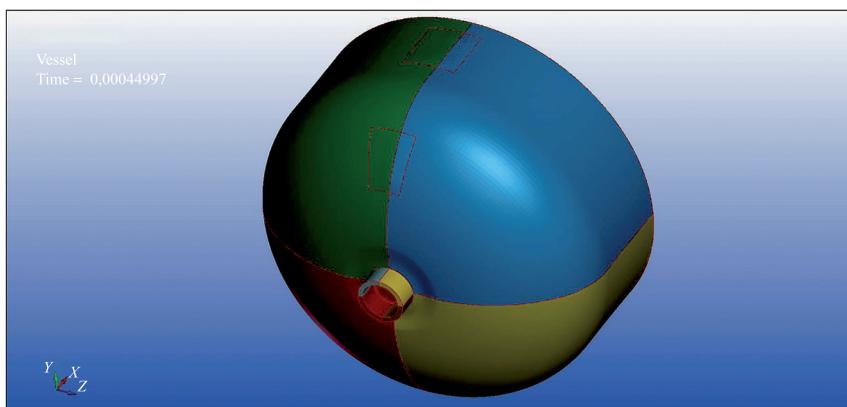


Рис. 6. Появление кольцевой складки ($\tau \sim 0,0005$ с)

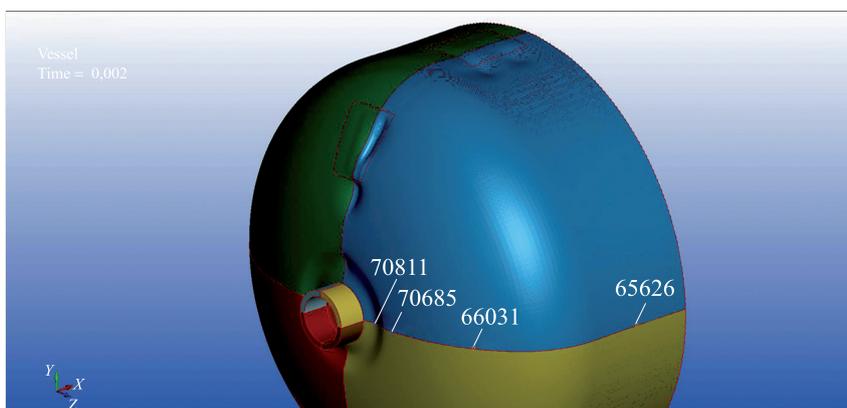


Рис. 7. Заметный рост кольцевой, радиальной и контурной складок ($\tau \sim 0,001...0,0015$ с)

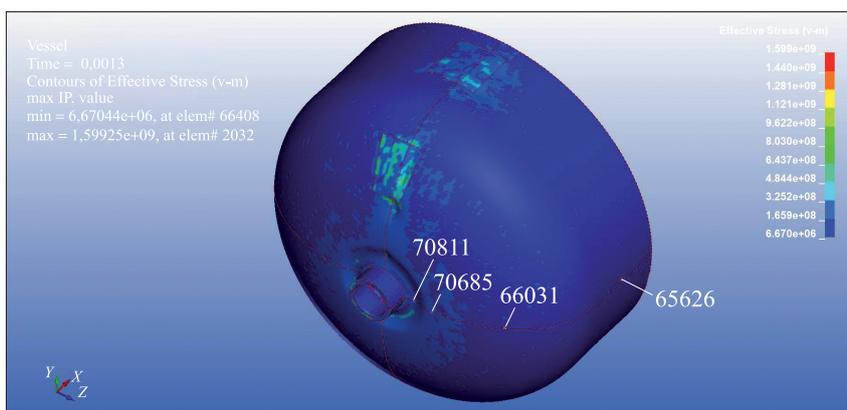


Рис. 8. Напряжения Мизеса ($\tau \sim 0,001...0,0015$ с)

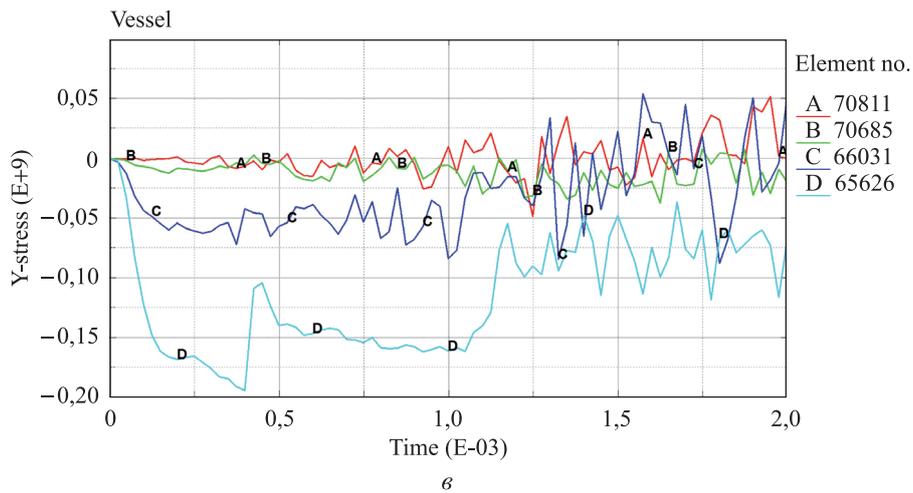
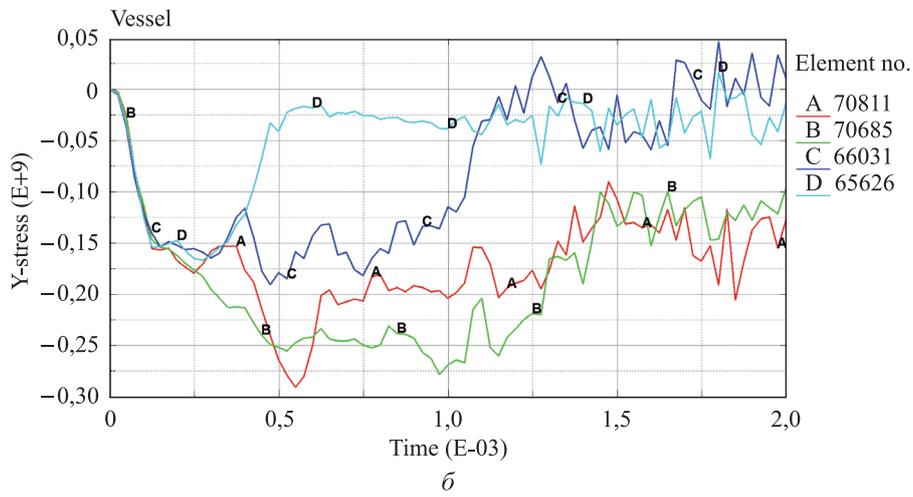
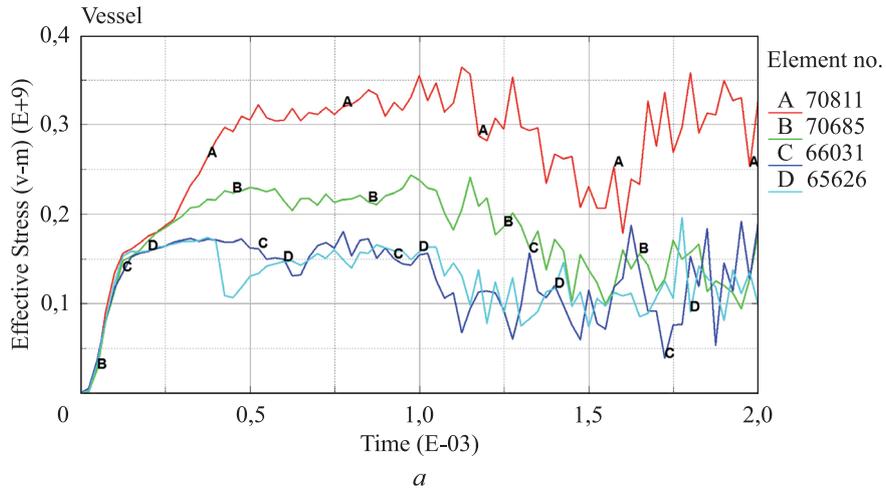


Рис. 9 (начало). Напряжения ($\times 10^9$, Па) в элементах А, В, С, D в функции времени ($\times 10^{-3}$, с)

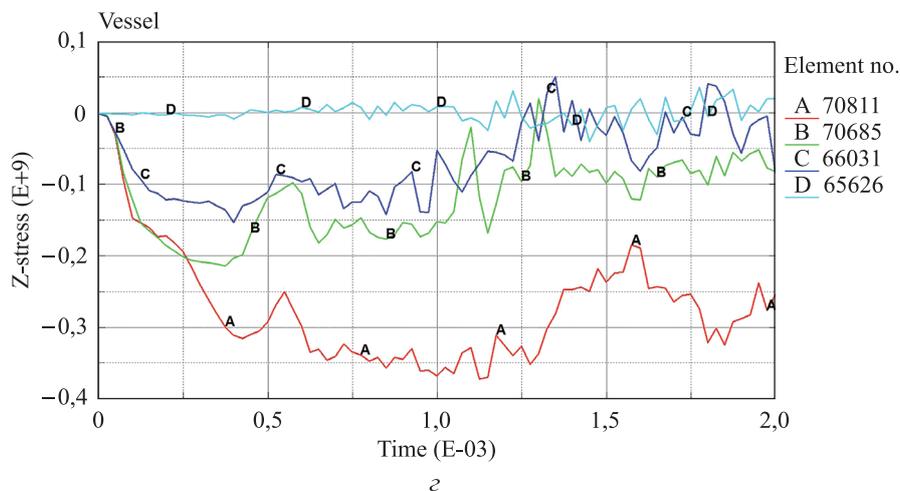


Рис. 9 (окончание). Напряжения ($\times 10^9$, Па) в элементах A, B, C, D в функции времени ($\times 10^{-3}$, с)

Интересно отметить, что окружные напряжения (элемент D) не восстанавливаются после сброса нагрузки (после $\tau \approx 0,0005$ с), в то время как меридиональные (см. рис. 9, в) несколько возрастают и сохраняют значение 150 МПа до появления поперечной контурной складки при $\tau \approx 0,001$ с, наличие которой снижает местную продольную жесткость цилиндра лайнера. Заметим также, что поперечные нормальные напряжения в цилиндре (элемент D) лайнера (см. рис. 9, з) вдали от складок близки к нулю. Наибольшие напряжения Мизеса (см. рис. 9, а) существуют на днище (элемент А) в зоне кольцевой складки на лайнере. Здесь же появляются и наибольшие остаточные пластические деформации (рис. 10, а). Что касается цилиндрической части лайнера (элемент D), то окружные деформации (рис. 10, б) вначале уходят в зону сжатия, а затем при $\tau \approx 0,0004$ с начинают расти и переходить в зону растяжения. Данный эффект можно объяснить тем, что сначала преобладает обжатие цилиндра лайнера кольцевой частью композитной оболочки, а затем — днищами композитной оболочки, которые перемещаются навстречу друг другу, что подтверждается отрицательными меридиональными деформациями (рис. 10, в) и положительными продольными перемещениями элемента D (рис. 11, в). По приведенным на рис. 11 данным также видно, что перемещение жесткого кольца (вблизи элемента А) происходит внутрь баллона. Следует отметить, что на днище лайнера (элемент В) окружные сжимающие напряжения (см. рис. 9, б) после $\tau \approx 0,001$ с уменьшаются, и это совпадает с появлением на днище радиальной складки.

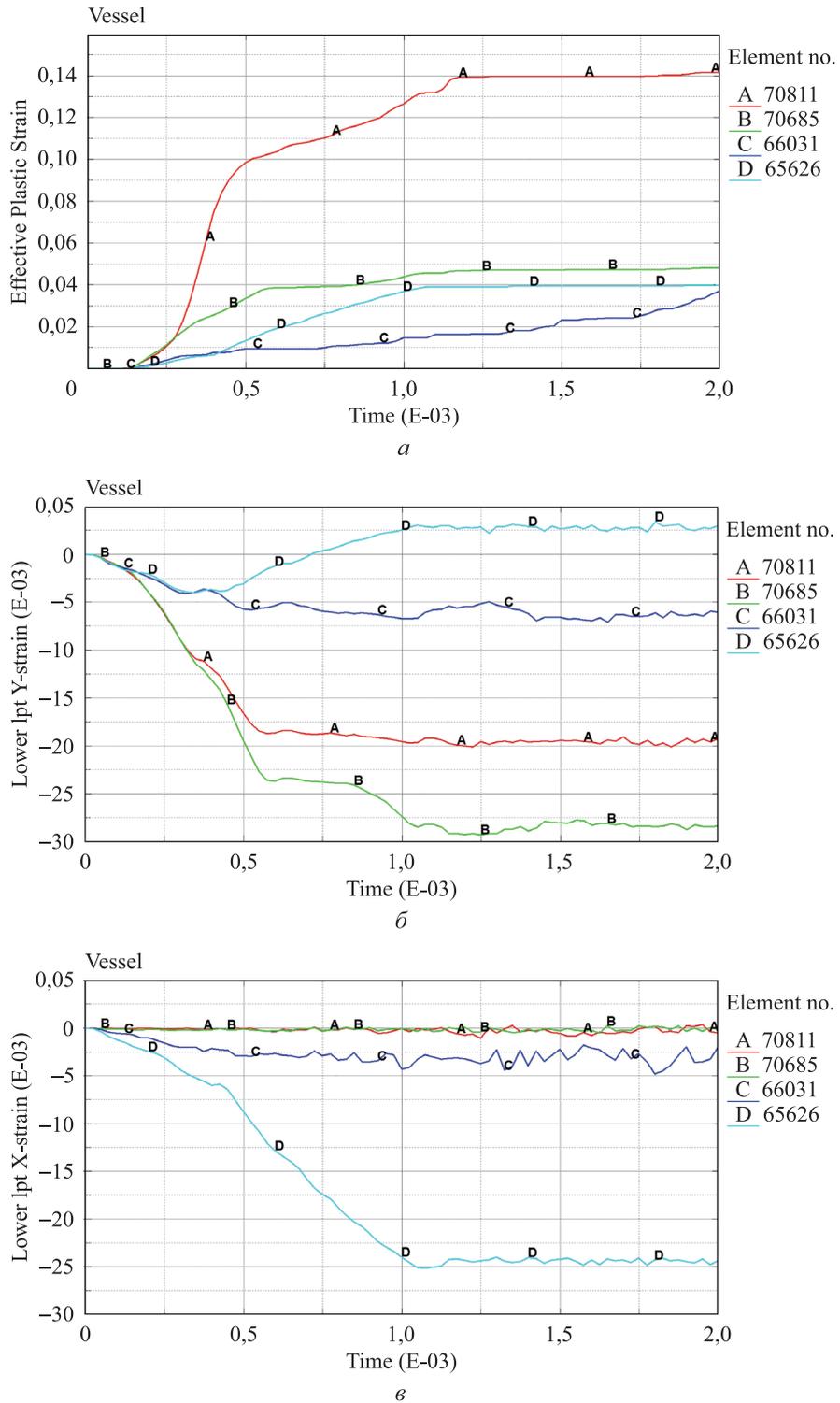


Рис. 10 (начало). Деформации в элементах А, В, С, D в функции времени ($\times 10^{-3}$, с)

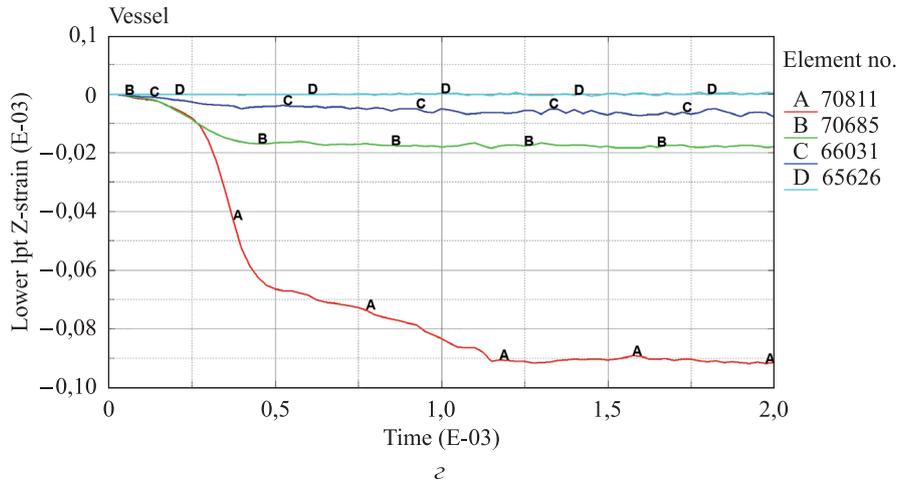


Рис. 10 (окончание). Деформации в элементах А, В, С, D в функции времени ($\times 10^{-3}$, с)

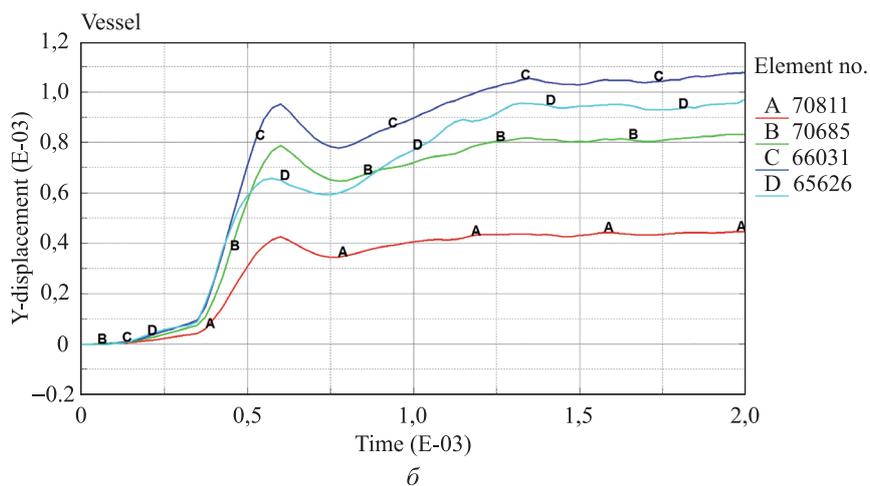
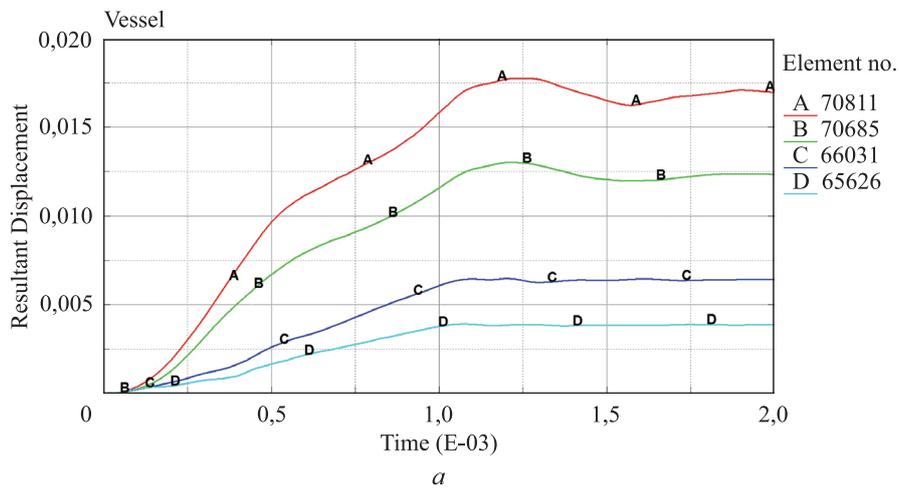


Рис. 11 (начало). Продольные перемещения (м) элементов А, В, С, D в функции времени ($\times 10^{-3}$, с)

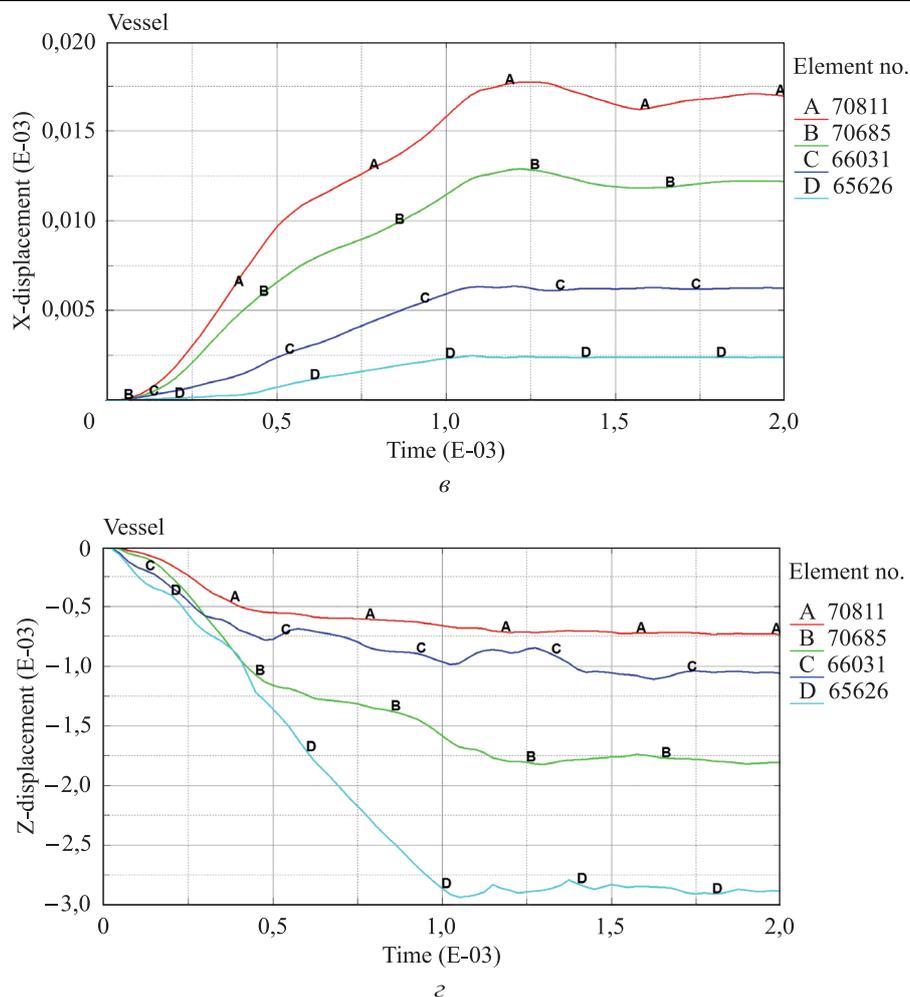


Рис. 11 (окончание). Продольные перемещения (м) элементов А, В, С, D в функции времени ($\times 10^{-3}$, с)

Закключение. Предложенный программно-ориентированный подход, ориентированный на конструкции, в которых металлические оболочки ограничены внешней жесткой средой, позволяет решать класс задач на отслоение оболочек, приводящее их к локальной потере устойчивости в виде внутренних складок, что недопустимо при эксплуатации. Отличительной особенностью подхода является объединение трех положений: введение в расчетную схему технологических отклонений, соответствующих допускаем дефектам; определение объемного напряженно-деформированного состояния; построение решения в режиме реального времени. Благодаря этому данный подход применим к анализу конструкций со сложной геометрией и неоднородными анизотропными свойствами материалов, с внешними нагрузками разной природы. Задача решается в геометрически и физически нелинейной постановке в программном комплексе LS-DYNA. Ограни-

чительной мерой является малое время нагружения конструкции, что связано с большой размерностью задачи и большим временем машинного счета. Для ускорения затухания колебательных процессов применяется команда глобального демпфирования. Для возможности отхода металлической оболочки от жесткой среды на их границе вводится контакт с односторонней связью.

Возможности предложенного программно-ориентированного подхода к анализу расслоений в составных оболочечных конструкциях показаны на примере расчета цилиндрического металлокомпозитного баллона высокого давления, весовая эффективность которого зависит от рационального сочетания свойств тонкой герметизирующей металлической оболочки и жесткой силовой наружной композитной оболочки. Технологические отклонения в виде неглубоких ($\sim 0,2 \dots 0,4$ мм) вырезов в лайнере и композитной оболочке выбраны на днищах и цилиндре баллона. Конечно-элементное моделирование баллона проведено объемными конечными элементами типа TSHELL и SOLID. Учет режима реального времени выполнен применением программы LS-DYNA в динамической постановке. Внешней нагрузкой является охлаждение композитной оболочки, эквивалентное технологическому процессу изготовления металлокомпозитного баллона методом намотки углепластиковой ленты на алюминиевый лайнер. Расчеты показали, что отслоение лайнера от композитной оболочки начинается в зонах технологических отклонений и вблизи жесткого полюсного кольца; в этих же местах в лайнере возникают и растут кольцевые и радиальные складки на днищах и контурные складки (по периметру прямоугольного технологического отклонения) — на цилиндрической поверхности лайнера. Деформированное состояние лайнера, представленное на изображениях, подтверждается поведением функций напряжений, деформаций и перемещений от времени. При сравнении напряжений Мизеса σ_i на поверхности цилиндра лайнера вдали от складок с напряжениями Мизеса $\bar{\sigma}_i$, вычисленными В.В. Васильевым и Н.Г. Морозом [18] в лайнере при изготовлении намоткой геометрически и физически подобного баллона, установлено, что в исследуемом конкретном баллоне контурных складок на цилиндрической поверхности лайнера не будет, так как $\sigma_i = 160$ МПа, $\bar{\sigma}_i = 52$ МПа, т. е. $\sigma_i > \bar{\sigma}_i$. По результатам расчетов установлено также, что цилиндрическая часть лайнера деформируется упруго ($\sigma_i \sim \sigma_{0,2}$), в то время как на днище появляются пластические деформации, особенно большие ($\sigma_i \sim \sigma_b$) вблизи жесткого полюсного кольца, где расположена кольцевая складка. Отметим, что для устранения такого дефекта, выявленного экспериментальным путем, в работе [18] предложено применять технологический стержень в оснастке лайнера при намотке на него композитной оболочки.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Феодосьев В.И. *Избранные задачи и вопросы по сопротивлению материалов*. 4-е изд. Москва, Наука, 1973, 400 с.
- [2] Glock D. Überkritisches Verhalten eines Starr Ummantelten Kreisrohres bei Wasserdruck von außen und Temperaturerhöhung [Post-critical behaviour of a rigidly encased circular pipe subject to external water pressure and thermal rise]. *Der Stahlbau*, 1977, Bd. 46, No. 7, S. 212–217.
- [3] Vasilikis D., Karamanos S.A. Mechanics of confined thin-walled cylinders subjected to external pressure. *Applied Mechanics Reviews*, ASME, 2014, vol. 66, Article Number 010801.
- [4] Marzbanrad J., Paykani A., Afkar A., Ghajar M. Finite element analysis of composite high-pressure hydrogen storage vessels. *J. Mater. Environ. Sci*, 2013, vol. 4 (1), pp. 63–74.
- [5] Zheng J.Y., Liu X.X., Xu P., Liu P.F., Zhao Y.Z., Yang J. Development of high pressure gaseous hydrogen storage technologies. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2012, vol. 37 (1), pp. 1048–1057. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.02.125>
- [6] Liu P.F., Chu J.K., Hou S.J., Xu P., Zheng J.Y. Numerical simulation and optimal design for composite high pressure hydrogen storage vessel: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev*, 2012, no. 16, art. 1817.
- [7] Rafiee R., Torabi M.A. Stochastic prediction of burst pressure in composite pressure vessels. *Composite Structures*, 2018, vol. 185, pp. 573–583. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.11.068>
- [8] Chou H.Y., Mouritz A.P., Bannister M.K., Bunsell A.R. Acoustic emission analysis of composite pressure vessels under constant and cyclic pressure. *COMPOS. PT. A-APPL. SCI. MANUF*, 2015, vol. 70, pp. 111–120. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.11.027>
- [9] Blanc-Vannet P. Burst pressure reduction of various thermoset composite pressure vessels after impact on the cylindrical part. *Composite Structures*, 2017, vol. 160, pp. 706–711. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.099>
- [10] Wu Q.G., Chen X.D., Fan Z.C., Nie D.F. Stress and damage analyses of composite overwrapped pressure vessel. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 130, pp. 32–40. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.171>
- [11] Almeida J.H.S. Jr., Ribeiro M.L., Tita V., Amico S.C. Damage and failure in carbon/epoxy filament wound composite tubes under external pressure: Experimental and numerical approaches. *Materials & Design*, 2016, vol. 96, pp. 431–438. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.054>
- [12] Almeida J.H.S. Jr., Tonatto M.L.P., Ribeiro M.L., Tita V., Amico S.C. Buckling and post-buckling of filament wound composite tubes under axial compression: Linear, nonlinear, damage and experimental analyses. *Composites Part B: Engineering*, 2018, vol. 149, pp. 227–239. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.05.004>
- [13] Raja J., Selvaraju S., Sridhar R. Modelling and analysis of composite pressure vessel. *IJAERD*, 2018, no. 5, pp. 1483–1487.
- [14] Mukund Kavekar, Vinayak H. Khatawate & Gajendra V. Patil weight reduction of pressure vessel using FRP composite material. *IJMET*, 2013, vol. 4 (4), pp. 300–310.
- [15] Bradford M. A., Roufegarinejad A. Elastic local buckling of thin-walled elliptical tubes containing elastic infill material. *Interaction and Multiscale Mechanics*, 2007, vol. 1 (1), pp. 143–156.
- [16] Егоров В.Н., Егоров А.В. Оценка допустимого давления опрессовки металлического лайнера при намотке композитной оболочки. *Инженерный*

- журнал: наука и инновации, 2019, вып. 2. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2019-2-1854>
- [17] Vasiliev V.V. *Composite pressure vessels — Analysis, design and manufacturing*. Blacksburg, Bull Ridge Publ., 2009.
- [18] Васильев В.В., Мороз Н.Г. *Композитные баллоны давления. Проектирование, расчет, изготовление и испытания: справ. пособие*. Москва, Машиностроение; Инновационное машиностроение, 2015, 373 с.
- [19] Егоров А.В., Егоров В.Н. Устойчивость нагретого кольца в жесткой обойме. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, Сер. Машиностроение*, 2019, № 3, с. 62–77. <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2019-3-62-77>
- [20] Egorov A.V. Studying rigidity of the welded liner — composite shell construction. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2019, 537, 022030. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/2/022030>
- [21] Егоров А.В., Егоров В.Н. Влияние осевой силы на устойчивость стесненной цилиндрической оболочки. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 3. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2019-3-1862>
- [22] Egorov A.V., Egorov V.N. Buckling of the flexible rod under shock loads. In: Zingoni A., ed. *Advances in Engineering Materials, Structures and Systems: Innovations, Mechanics and Applications*. London, Taylor & Francis Group, 2019, pp. 879–883. ISBN 978-1-138-38696-9
- [23] Morozov N.F., Tovstik P.E., Tovstik T.P. Stability of a rod under the long-term axial compression. *Probl. Prochn. Plastichn.*, 2015, vol. 77, no. 1, pp. 40–48. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2015-77-1-40-48>

Статья поступила в редакцию 20.02.2020

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Егоров А.В. Программно-ориентированный подход к анализу перемещений в контактно-стесненных оболочечных конструкциях. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 4. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-4-1976>

Егоров Антон Витальевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Космические аппараты и ракеты-носители» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: antegor177@mail.ru
SPIN-код 7513-3026
ORCID iD0000-0002-7401-5534

Software-based approach to the analysis of displacements in contact-constrained shell structures

© A.V. Egorov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

In transversely separable shell structures, a thin metal shell is surrounded by a rigid medium. The proposed approach to solving delamination problems in such constructions is based on three points: the introduction of technological deviations (corresponding to permissible defects in actual structures) to the computation scheme of the structure; the determination of the volumetric general stress-strain state of the structure; real-time structure deformation accounting. The approach is implemented in the LS-DYNA software package in a dynamic formulation using finite elements TSHELL and SOLID, taking into account the geometric and physical nonlinearity of the structure and the shell — medium contact surface with unilateral constraint along normal line, without tangent interactions. According to the proposed approach, the result of calculations is the assessment of the loads on the initial two-layer structure, under which a metal shell with low bending stiffness can lose stability in the local area in the form of internal wrinkles. An example of the calculation of a cylindrical metal-composite high-pressure vessel under loading by a cooled external composite shell is given. The time intervals of the onset of delamination and growth of wrinkles on the surface of the inner metal shell (liner) are established. The solutions are presented in the form of images of the deformed surface of the liner and graphs of time-dependent changes in stresses, strains and displacements; their correspondences to each other are shown. The proposed approach allows one by visual demonstration and accurately to assess the possibility of delamination in contact-constrained shell structures already at the design stage.

Keywords: separable metal composite pressure vessel, liner local stability, finite element method, LS-DYNA, stress-strain state, delamination

REFERENCES

- [1] Feodosyev V.I. *Izbrannye zadachi i voprosy po soprotivleniyu materialov* [The selected tasks and questions regarding the strength of materials]. Moscow, Nauka Publ., 1973, 400 p. (in Russian)
- [2] Glock D. Überkritisches Verhalten eines Starr Ummantelten Kreisrohres bei Wasserdruck von außen und Temperaturerhöhung [Post-critical behaviour of a rigidly encased circular pipe subject to external water pressure and thermal rise]. *Der Stahlbau*, 1977, Bd. 46, No. 7, S. 212–217.
- [3] Vasilikis D., Karamanos S.A. Mechanics of confined thin-walled cylinders subjected to external pressure. *Applied Mechanics Reviews*, ASME, 2014, vol. 66, Article Number 010801.
- [4] Marzbanrad J., Paykani A., Afkar A., Ghajar M. Finite element analysis of composite high-pressure hydrogen storage vessels. *J. Mater. Environ. Sci*, 2013, vol. 4 (1), pp. 63–74.
- [5] Zheng J.Y., Liu X.X., Xu P., Liu P.F., Zhao Y.Z., Yang J. Development of high pressure gaseous hydrogen storage technologies. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2012, vol. 37 (1), pp. 1048–1057. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.02.125>
- [6] Liu P.F., Chu J.K., Hou S.J., Xu P., Zheng J.Y. Numerical simulation and optimal design for composite high pressure hydrogen storage vessel: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2012, vol. 16, art. 1817.

- [7] Rafiee R., Torabi M.A. Stochastic prediction of burst pressure in composite pressure vessels. *Composite Structures*, 2018, vol. 185, pp. 573–583. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.11.068>
- [8] Chou H.Y., Mouritz A.P., Bannister M.K., Bunsell A.R. Acoustic emission analysis of composite pressure vessels under constant and cyclic pressure. *COMPOS. PT. A-APPL. SCI. MANUF*, 2015, vol. 70, pp. 111–120. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.11.027>
- [9] Blanc-Vannet P. Burst pressure reduction of various thermoset composite pressure vessels after impact on the cylindrical part. *Composite Structures*, 2017, vol. 160, pp. 706–711. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.099>
- [10] Wu Q.G., Chen X.D., Fan Z.C., Nie D.F. Stress and damage analyses of composite overwrapped pressure vessel. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 130, pp. 32–40. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.171>
- [11] Almeida J.H.S. Jr., Ribeiro M.L., Tita V., Amico S.C. Damage and failure in carbon/epoxy filament wound composite tubes under external pressure: Experimental and numerical approaches. *Materials & Design*, 2016, vol. 96, pp. 431–438. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.054>
- [12] Almeida J.H.S. Jr., Tonatto M.L.P., Ribeiro M.L., Tita V., Amico S.C. Buckling and post-buckling of filament wound composite tubes under axial compression: Linear, nonlinear, damage and experimental analyses. *Composites Part B: Engineering*, 2018, vol. 149, pp. 227–239. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.05.004>
- [13] Raja J., Selvaraju S., Sridhar R. Modelling and analysis of composite pressure vessel. *IJAERD*, 2018, vol. 5, pp. 1483–1487.
- [14] Mukund Kavekar, Vinayak H. Khatawate, Gajendra V. Patil weight reduction of pressure vessel using FRP composite material. *IJMET*, 2013, vol. 4 (4), pp. 300–310.
- [15] Bradford M.A., Roufegarinejad A. Elastic local buckling of thin-walled elliptical tubes containing elastic infill material. *Interaction and Multiscale Mechanics*, 2007, vol. 1 (1), pp. 143–156.
- [16] Egorov V.N., Egorov A.V. Estimation of the allowable pressure of metal liner pressure testing when winding a composite shell. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2019, iss. 2. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2019-2-1854>
- [17] Vasiliev V.V. *Composite pressure vessels — Analysis, design and manufacturing*. Bull Ridge Publ., Blacksburg, 2009.
- [18] Vasilev V.V., Moroz N.G. *Composite pressure vessels. Design, analysis, manufacturing and testing: a reference book*. Moscow, Mashinostroenie, Innovatsionnoe mashinostroenie Publ., 2015. (in Russian)
- [19] Egorov A.V., Egorov V.N. Buckling of a heated ring enclosed in a rigid case. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2019, no. 3, pp. 62–77. <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2019-3-62-77>
- [20] Egorov A.V. Studying rigidity of the welded liner — composite shell construction. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2019, vol. 537, art. 022030. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/2/022030>
- [21] Egorov A.V., Egorov V.N. Axial force effect on the buckling of a constrained cylindrical shell. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2019, iss. 3. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2019-3-1862>
- [22] Egorov A.V., Egorov V.N. Buckling of the flexible rod under shock loads. In: Zingoni A., Ed. *Advances in Engineering Materials, Structures and Systems: In-*

novations, Mechanics and Applications. London, Taylor & Francis Group, 2019, pp. 879–883. ISBN 978-1-138-38696-9

- [23] Morozov N.F., Tovstik P.E., Tovstik T.P. Stability of a rod under the long-term axial compression”. *Probl. Prochn. Plastichn.*, 2015, vol. 77, no. 1, pp. 40–48. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2015-77-1-40-48>

Egorov A.V., Cand. Sc. (Engineering), Assoc. Professor, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: antegor177@mail.ru

SPIN-code 7513-3026

ORCID iD0000-0002-7401-5534