



Received: 27.08.2024

Revised: 30.09.2024

Accepted: 25.10.2024



DOI: 10.17804/2410-9908.2024.5.097-106

PROBABILISTIC MODELING OF THE LOAD-BEARING CAPACITY OF A COMPOSITE PRESSURE VESSEL

A. E. Burov^{1,2}

¹Federal Research Center for Information and Computational Technologies,
53 Mira Ave., Krasnoyarsk, 660049, Russia

²Institute of Biophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center», SB RAS,
50/50 Akademgorodok St., Krasnoyarsk, 660036, Russia

 <https://orcid.org/0000-0002-4360-0335>  aeburov@ict.nsc.ru

Email: aeburov@ict.nsc.ru

Address for correspondence: ul. Akademgorodok, 50/50, Krasnoyarsk, 660036, Russia

Modeling possible limit states and predicting load-bearing capacity, accounting for the scatter of mechanical properties, is an integral part of ensuring the strength and reliability requirements for structures. In this study, based on a probabilistic approach, we analyze the influence of variations in the parameters of the composite shell on the load-bearing capacity of a high-pressure metal-composite tank manufactured by continuous composite tape winding on a thin liner. Winding angle, fiber volume content, and ultimate fiber strength are taken as the variable parameters. Numerical modeling based on a model taking into account the processes of damage accumulation and degradation in the mechanical properties of the material is used to predict the mechanical behavior of the structure. Based on the calculation results, the burst pressure distribution function is obtained, which gives an idea of the influence of manufacturing process variability on the load-bearing capacity of the tank.

Keywords: high-pressure metal-composite tank, numerical analysis, stress-strain state, progressive failure, probabilistic approach, burst pressure

References

1. Vasiliev, V.V. *Composite Pressure Vessels: Analysis, Design, and Manufacturing*. Ridge Publishing, Blacksburg, VA, 2009, 690 p.
2. *Nesushchaya sposobnost i bezopasnost metallokompozitnykh bakov kosmicheskikh apparatov* [Load-Bearing Capacity and Safety of Metal-Composite Tanks in Spacecraft, eds., V.V. Moskvichev and N.A. Testoedov]. Nauka Publ., Novosibirsk, 2021, 439 p. (In Russian).
3. Azeem, M., Ya, H.H., Alam, M.A., Kumar, M., et al. Application of filament winding technology in composite pressure vessels and challenges: a review. *Journal of Energy Storage*, 2022, 49, 103468. DOI: 10.1016/j.est.2021.103468.
4. Kam, T.Y., Liu, Y.W., and Lee, F.T. First-ply failure strength of laminated composite pressure vessels. *Composite Structures*, 1997, 38, 65–70. DOI: 10.1016/S0263-8223(97)00042-1.
5. Garnich, M.R. and Akula, M.K. Review of degradation models for progressive failure analysis of fiber reinforced polymer composites. *Applied Mechanics Reviews*, 2009, 62 (1), 010801. DOI: 10.1115/1.3013822.
6. Ganesan, R. and Nair, A.S. Reliability-based first-ply failure envelopes of composite tubes subjected to combined axial and torsional loadings. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2024, 52 (7), 4470–4502. DOI: 10.1080/15397734.2023.2229415.



7. De Luca, A. and Caputo, F. A review on analytical failure criteria for composite materials. *AIMS Materials Science*, 2017, 4 (5), 1165–1185. DOI: 10.3934/matricsci.2017.5.1165.
8. Rabotnov, Yu.N. *Problemy mekhaniki deformiruemogo tverdogo tela: izbrannyye trudy* [The Problems of Solid Mechanics: Selected Works]. Nauka Publ., Moscow, 1991, 194 p. (In Russian).
9. Srilakshmi, Ch., Sambasivarao, G., and Kumar, J.S. A review on progressive failure analysis of composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, 1185, 012020. DOI: 10.1088/1757-899X/1185/1/012020.
10. Regassa, Y., Gari, J. and Lemu, H.G. Composite overwrapped pressure vessel design optimization using numerical method. *Journal of Composites Science*, 2022, 6 (8), 229. DOI: 10.3390/jcs6080229.
11. Ge, L. Zhao, J., Li, H., Dong, J., Geng, H., Zu, L., Lin, S., Jia, X., and Yang, X. A three-dimensional progressive failure analysis of filament-wound composite pressure vessels with void defects. *Thin-Walled Structures*, 2024, 199, 111858. DOI: 10.1016/j.tws.2024.111858.
12. Ozaslan, E., Yurdakul, K., and Talebi, C. Investigation of effects of manufacturing defects on bursting behavior of composite pressure vessels with various stress ratios. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2022, 199, 104689. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2022.104689.
13. Vallmajo, O., Arteiro, A., Guerrero, J.M., Melro, A.R., Pupurs, A., and Turon, A. Micromechanical analysis of composite materials considering material variability and microvoids. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2024, 263, 108781. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2023.108781.
14. Burov, A.E. Burst pressure estimations of a composite pressure vessel accounting for the composite shell imperfections. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1260, 112007. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/11/112007.
15. Lepikhin, A.M., Makhutov, N.A., Moskvichev, V.V., and Chernyaev, A.P. *Veroyatnostnyi risk-analiz konstruktsiyi tekhnicheskikh sistem* [Probabilistic Risk, Analysis of Technical Systems]. Nauka Publ., Novosibirsk, 2003, 173 p. (In Russian).
16. Zu, L., Koussios, S., and Beukers, A. Design of filament-wound isotensoid pressure vessels with unequal polar openings. *Composite Structures*, 2010, 92 (9), 2307–2313. DOI: 10.1016/j.compstruct.2009.07.013.
17. Hashin, Z. Failure criteria for unidirectional fiber composites. *Journal of Applied Mechanics*, 1980, 47, 329–334. DOI: 10.1115/1.3153664.
18. Kaplun, A.B., Morozov, E.M., and Shamraeva, M.A. *Ansys v rukakh inzhenera* [Ansys in the Hands of an Engineer: Guidance Manual]. Lenand Publ., Moscow, 2021, 272 p.
19. Halpin Affdl, J.C. and Kardos, J.L. The Halpin-Tsai equations: a review. *Polymer Engineering and Science*, 1976, 16 (5), 344–352. DOI: 10.1002/pen.760160512.
20. Alam, S., Yandek, G.R., Lee, R.C., and Mabry, J.M. Design and development of a filament wound composite overwrapped pressure vessel. *Composites. Part C: Open Access*, 2020, 2, 100045. DOI: 10.1016/j.jcomc.2020.100045.



Подана в журнал: 27.08.2024

УДК 539.3

DOI: 10.17804/2410-9908.2024.5.097-106

**ВЕРОЯТНОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ
МЕТАЛЛОКОМПОЗИТНОГО БАКА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ**А. Е. Буров^{1,2}¹Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,
пр-т Мира, 53, Красноярск, 660049, Россия²Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук,
Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН»,
ул. Академгородок, 50/50, Красноярск, 660036, Россия <https://orcid.org/0000-0002-4360-0335> aeburov@ict.nsc.ru

Электронная почта: aeburov@ict.nsc.ru

Адрес для переписки: ул. Академгородок, 50/50, Красноярск, 660036, Россия

Моделирование возможных предельных состояний и прогнозирование несущей способности с учетом рассеяния механических свойств является неотъемлемой частью обеспечения требований прочности и надежности конструкций. В данной работе на основе вероятностного подхода выполнен анализ влияния вариации характеристик силовой оболочки на несущую способность металлокомпозитного бака высокого давления, изготовленного по технологии непрерывной намотки композитной ленты на тонкий лайнер. В качестве переменных параметров приняты угол намотки, объемное содержание волокна и предел его прочности. Численное моделирование на основе модели, учитывающей процессы накопления повреждений и деградацию механических свойств материала, используется для прогнозирования механического поведения конструкции бака. По результатам вычислений получена функция распределения значений разрушающего давления, дающая представление о влиянии вариативности процесса изготовления на несущую способность бака.

Ключевые слова: металлокомпозитный бак высокого давления, численный анализ, напряженно-деформированное состояние, прогрессирующее разрушение, вероятностный подход, предельное давление

1. Введение

Технология непрерывной намотки широко применяется при изготовлении армированных оболочек, используемых в качестве основных несущих элементов композитных сосудов высокого давления с металлическим лайнером [1, 2]. Совокупность уникальных свойств, включающих высокие показатели массовой эффективности, усталостной долговечности и коррозионной стойкости, расширила область современного применения металлокомпозитных баков высокого давления (МКБВД) от аэрокосмической и авиационной техники до химического, автомобильного, медицинского и спортивного сегментов промышленности [3].

Вес, как один из наиболее важных параметров проектирования МКБВД, в основном определяется требуемым давлением, при котором происходит разрушение силовой композитной оболочки и по величине которого с учетом схемы армирования рассчитывается ее толщина. Моделирование реализуемых типов предельных состояний и прогнозирование несущей способности являются фундаментальными задачами для получения безопасной и экономически эффективной конструкции МКБВД.

Как правило, критические нагрузки для конструкций из слоистых композитов определяются в предположении, что материал утрачивает несущую способность при разрушении

хотя бы одного из его слоев [4–7]. Окончательное разрушение этих материалов происходит в результате процесса накопления повреждений, поэтому применение критерия «разрушение первого слоя» обычно приводит к консервативной оценке прочности. Это определяет прогнозирование несущей способности МКБВД с учетом прогрессирующего разрушения, связывающего эволюцию повреждений в структуре композитов в условиях роста внешней нагрузки с деградацией их механических свойств [8–11].

Другим аспектом проблемы достоверной оценки давления разрушения МКБВД является необходимость учета возможного рассеяния механических свойств, определяющих жесткостные и прочностные характеристики материала силовой оболочки [11–13]. В первую очередь это относится к армирующим волокнам, стохастическая природа прочности которых хорошо известна, и/или отклонениям конструкции от проектных параметров в результате несовершенств технологии изготовления [2, 14].

2. Постановка задачи и методы решения

Цель исследований состоит в анализе влияния вариации параметров композитной оболочки на несущую способность МКБВД на основе вероятностного подхода и модели прогрессирующего разрушения. Рассматривается МКБВД объемом 200 литров (рис. 1), изготовленный путем непрерывной намотки ленты углеродных волокон, пропитанных эпоксидным связующим, на тонкий титановый лейнер.

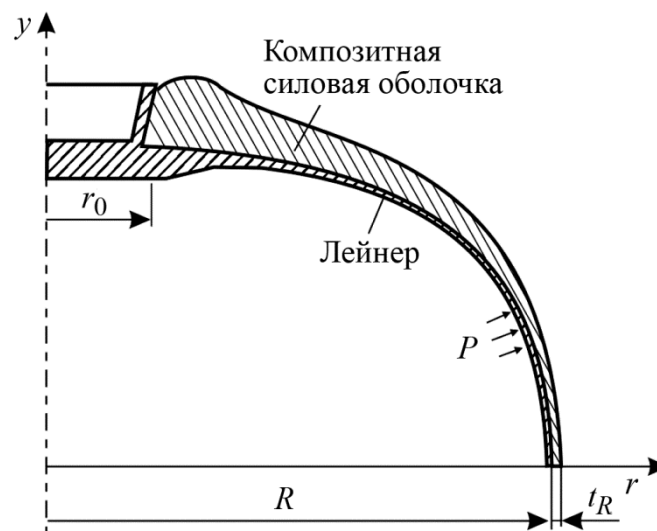


Рис. 1. Металлокомпозитный бак высокого давления, изготовленный методом непрерывной намотки

Следующие параметры конструкции бака и механических свойств материалов использовались в расчетах: максимальный радиус R , угол намотки φ_R и толщина слоя композита t_R на экваторе, соответственно, 416 мм, $4,8^\circ$ и 2 мм, толщина лейнера $t_l = 1,0$ мм; монослой композита на основе углеродного волокна IMS-60 ($V_f \approx 0,55$) и эпоксидного связующего [2] (индекс 1 – направление армирования): $E_1 = 165$ ГПа, $E_2 = E_3 = 7,7$ ГПа, $G_{12} = G_{13} = 3,8$ ГПа, $G_{23} = 3,4$ ГПа, $\nu_{12} = \nu_{13} = 0,26$, $\nu_{23} = 0,49$, пределы прочности при растяжении $X_1 = 1850$ МПа, $X_2 = 80$ МПа, при сжатии $Y_1 = -1500$ МПа, $Y_2 = -180$ МПа, при сдвиге $S_{12} = 85$ МПа, энергия разрушения $G_{c1} = 106,3$ Н/мм, $G_{c2} = 0,28$ Н/мм; материал лейнера: $\sigma_{0,2} = 340$ МПа, $\sigma_B = 430$ МПа, $E = 110$ ГПа, $\nu = 0,32$.

Моделирование несущей способности в вероятностной постановке выполнено методом статистических испытаний (метод Монте-Карло), который заключается в многократном решении детерминированной задачи определения напряженно-деформированного состояния



(НДС) и предельного давления с использованием в каждом случае различного набора значений случайных переменных [15]. В настоящих исследованиях такими переменными являются объемное содержание волокон, угол армирования и прочностные характеристики композита. Как показывают экспериментальные исследования [2], для типичного МКБВД объемное содержание волокон V_f изменяется в пределах от 0,45 до 0,6, а отклонение угла армирования φ при геодезической намотке составляет $\pm 3^\circ$ по отношению к теоретическому значению [16]. Вариации характеристик прочности однонаправленного слоя композита приняты равными $\pm 10\%$ к среднему значению. Предполагается, что переменные подчиняются равномерному закону распределения вероятностей. Искомым параметром анализа является функция распределения значений давления разрушения МКБВД.

Моделирование прогрессирующего разрушения композитной оболочки МКБВД состоит в реализации следующих шагов: 1) решение задачи МКЭ, определение параметров НДС для слоев пакета каждого элемента композитной оболочки; 2) проверка инициации разрушения и идентификация его типа по критериям Хашина [17]; 3) при выполнении критерия разрушения расчет параметров поврежденности и соответствующих им значений упругих свойств материала (переход на шаг 1) вычисления повторяются до отсутствия поврежденных слоев; 4) приращение давления и повторение цикла шагов 1–3. Потеря несущей способности конструкции определяется как спонтанное увеличение числа поврежденных элементов при неизменной нагрузке, которая представляет собой давление разрушения.

После инициации разрушения упругие характеристики композита снижаются, следуя изменению меры поврежденности материала. Параметр поврежденности d для каждого типа разрушения вычисляется по эквивалентным перемещениям:

$$d = 1 - \frac{u_{eq}^0(u_{eq}^c - u_{eq}^0)}{u_{eq}^c(u_{eq}^c - u_{eq}^0)}; u_{eq}^0 \leq u_{eq} \leq u_{eq}^c, \quad (1)$$

где u_{eq}^0 – перемещения, соответствующие инициации разрушения.

Предполагается, что энергия разрушения элемента равна количеству энергии, необходимой для продвижения трещины на его длину:

$$G_c = \int_0^{u_{eq}^c} \sigma_{eq} du_{eq} = \frac{1}{2} \sigma_{eq}^c u_{eq}^c, \quad (2)$$

где σ_{eq} , u_{eq} – эквивалентные напряжения и перемещения; σ_{eq}^c , u_{eq}^c – их предельные максимальные значения.

Эквивалентные перемещения и напряжения для различных типов разрушения определяются следующим образом:

разрушение волокон (растяжение) $u_{eq} = l_e \sqrt{\langle \varepsilon_{11} \rangle^2 + \alpha \varepsilon_{12}}$, $\sigma_{eq} u_{eq} = l_e \langle \sigma_{11} \rangle \langle \varepsilon_{11} \rangle + \alpha \sigma_{12} \varepsilon_{12}$;

разрушение волокон (сжатие) $u_{eq} = l_e \langle -\varepsilon_{11} \rangle$, $\sigma_{eq} = \langle -\sigma_{11} \rangle$;

разрушение матрицы (растяжение) $u_{eq} = l_e \sqrt{\langle \varepsilon_{22} \rangle^2 + \varepsilon_{12}^2}$, $\sigma_{eq} u_{eq} = l_e \langle \sigma_{22} \rangle \langle \varepsilon_{22} \rangle + \sigma_{12} \varepsilon_{12}$;

разрушение матрицы (сжатие) $u_{eq} = l_e \sqrt{\langle -\varepsilon_{22} \rangle^2 + \varepsilon_{12}^2}$, $\sigma_{eq} u_{eq} = l_e \langle -\sigma_{22} \rangle \langle -\varepsilon_{22} \rangle + \sigma_{12} \varepsilon_{12}$,

где σ_{ij} , ε_{ij} – компоненты тензоров напряжений и деформаций соответственно; $\langle x \rangle = (x + |x|)/2$; $\alpha = 0 \dots 1$ – параметр, используемый для обеспечения сходимости решения при значениях напряжений вдоль направления армирования, близких к нулю; l_e – характерный размер элемента.

Для поврежденного трансверсально-изотропного материала связь между напряжениями и деформациями имеет вид

$$\{\sigma\} = \begin{bmatrix} (1 - d_f)E_1 & (1 - d_f)(1 - d_m)v_{21}E_1 & 0 \\ (1 - d_f)(1 - d_m)v_{12}E_2 & (1 - d_m)E_2 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta(1 - d_s)G_{12} \end{bmatrix} \{\varepsilon\} \quad (3)$$

$$\Delta = 1 - (1 - d_f)(1 - d_m)v_{12}v_{21},$$

где $d_f, d_m, d_s = 1 - (1 - d_f) \cdot (1 - d_m)$ – параметры поврежденности при разрушении волокон, матрицы и разрушения при сдвиге соответственно.

Геометрия образующей МКБВД получена на основе моноотропной модели композита, согласно которой его жесткость и прочность обеспечиваются только за счет армирующих волокон [1]. Расчетная конечно-элементная модель, подготовленная в среде пакета инженерного анализа Ansys [18], представляет собой 45-градусный сегмент оболочки вращения, состоящей из лайнера и композитного слоя, которые контактируют между собой с учетом сил трения (рис. 2). Модель построена на базе 8-узлового конечного элемента оболочки с опцией слоистого и однородного тела для композита и лайнера соответственно.

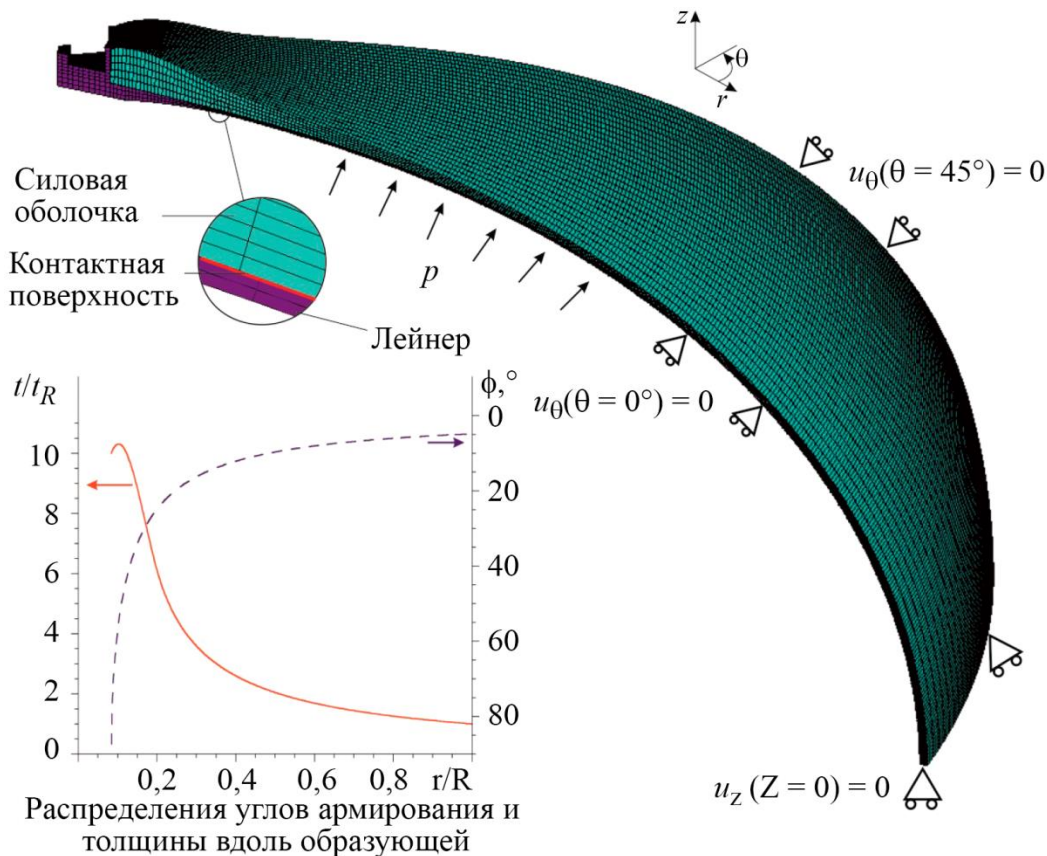


Рис. 2. Конечно-элементная модель МКБВД

Для построения варианта модели МКБВД значения объемного содержания волокон V_f и угла армирования $\pm\phi$ каждого слоя выбирались случайным образом. Учитывался процесс намотки, при котором связующее выдавливается из внутренних слоев в направлении внешней поверхности бака, что приводит к градиенту V_f по толщине. Характеристики упругих свойств монослоя композита определялись с использованием микромеханической модели Халпина – Цая [19]. Поведение лайнера описывается моделью упругопластического материала с изотропным упрочнением, соответствующей уравнению Прандтля – Рейсса и условию пластичности Мизеса в детерминированной постановке.

3. Результаты и обсуждение

Существует несколько способов оценки несущей способности МКБВД. Для комбинированной оболочки с лайнером из упруго-идеально-пластического материала при использовании моноотропной модели композита значение предельного давления P_f можно вычислить по следующей формуле [1]:

$$P_f = \frac{2(X_1 t_R \cos^2 \varphi_R + \sigma_T t_l)}{R} \quad (4)$$

Выражение (4) определяет разрушение по максимальным напряжениям на экваторе, действующим в композите вдоль направления армирования, и отражает критерий «разрушения первого слоя». Для рассматриваемого МКБВД предельное давление составляет 19,3 МПа.

Результаты расчетов с использованием модели прогрессирующего разрушения в детерминированной постановке свидетельствуют о нескольких стадиях процесса деформирования и разрушения конструкции. Они включают упругое деформирование силовой и герметизирующей оболочек, упругопластическое деформирование материала лайнера, инициацию повреждений в композите, их развитие до предельного уровня, определяющего потерю несущей способности силовой оболочки, и разрушение лайнера в результате возникновения чрезмерных деформаций.

Эволюция поврежденности в композитной оболочке при возрастании нагрузки представлена на рис. 3 для МКБВД, параметры которого приведены выше. На шкале изолиний уровня поврежденности значение 1 соответствует полному разрушению элемента, 0 – неповрежденный элемент. Инициация и накопление поврежденности силовой оболочки определяется прежде всего анизотропией прочностных свойств однонаправленной ленты композита. Первоначально низкая прочность в направлении, перпендикулярном армированию, обуславливает возникновение повреждений в области полюсного отверстия по механизму разрушения матрицы от действия растягивающих напряжений (рис. 3 а). По мере увеличения нагрузки такие повреждения развиваются в направлении экватора.

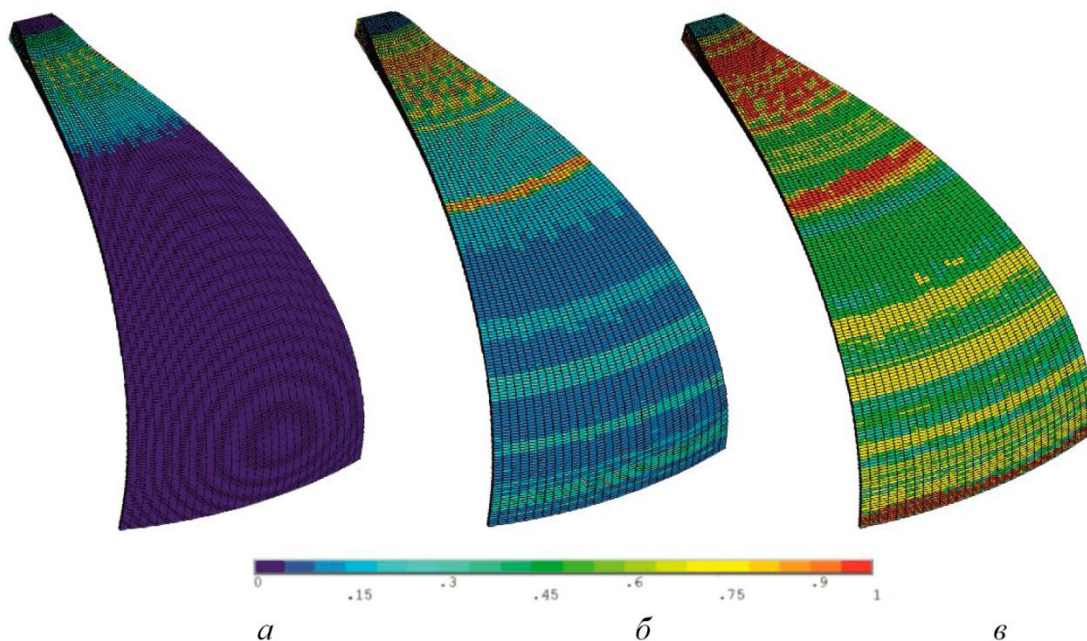


Рис. 3. Развитие повреждений в композитной оболочке при увеличении внутреннего давления

Дальнейшее увеличение нагрузки и концентрация напряжений, возникающая в соседних с разрушенными элементами, приводит к повреждениям слоев композита по механизму обрывов волокон в результате превышения напряжений предела прочности в направлении армирования (рис. 3 б). Их накопление определяет резкое снижение жесткости силовой оболочки в результате спонтанного роста поврежденности при неизменной нагрузке, что в конечном итоге ведет к полной потере несущей способности (рис. 3 в). Окончательное разрушение конструкции МКБВД произошло при внутреннем давлении порядка 20,1 МПа.

Использование значений объемного содержания волокон и угла армирования в качестве случайных переменных ведет к тому, что механические характеристики слоев индивидуальны для каждого из расчетных случаев. Это определяет вариативность параметров НДС силовой оболочки и, в свою очередь, разрушающего давления.

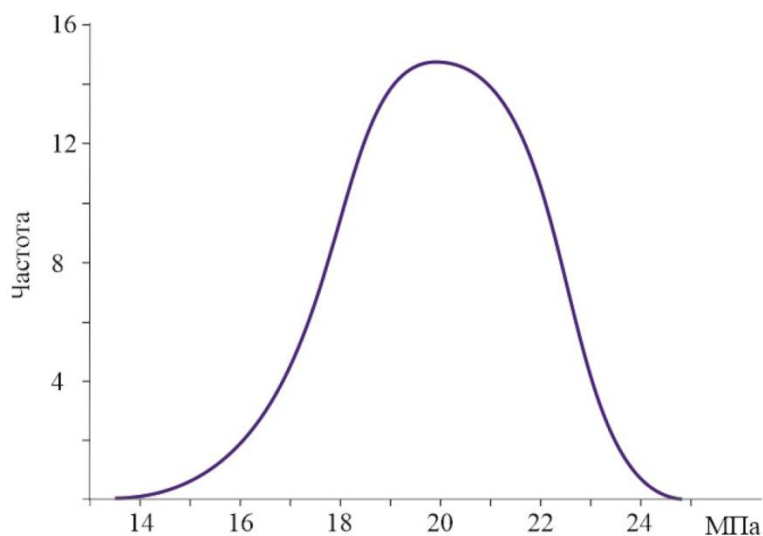


Рис. 4. Плотность функции распределения разрушающего давления

Выборка случайных вариантов МКБВД составила 100 образцов. Полученные эмпирические частотные распределения значений давления разрушения аппроксимировали нормальным законом. На рис. 4 приведена плотность функции распределения давления разрушения МКБВД. Среднее значение и стандартное отклонение распределения составляют 19,9 МПа и 1,1 МПа соответственно. Разница значений предельного давления, полученных с использованием двух различных подходов, составляет порядка 1 %. Однако вероятностный анализ предоставляет гораздо больше информации для оценки близости состояния конструкции к предельному. Прежде всего это относится к возможности оценить влияние вариативности процесса изготовления на несущую способность МКБВД и прогнозировать более рациональный конструктивный вариант, чем решение на основе традиционного метода, базирующегося на коэффициенте запаса. Кроме того, вероятностный подход позволяет решать задачи прочностной надежности конструкции МКБВД.

4. Заключение

В данной работе на основе вероятностного подхода выполнен анализ влияния вариации характеристик силовой оболочки на несущую способность металлокомпозитного бака высокого давления. Численное моделирование на основе прогрессирующего разрушения используется для прогнозирования механического поведения МКБВД и предельного давления. Модель прогрессирующего разрушения основана на представлениях континуальной механики поврежденности, связывающей процессы накопления повреждений и деградации механических свойств. В качестве переменных параметров силовой оболочки, которые больше все-



го чувствительны к технологическим факторам, приняты угол намотки, объемное содержание волокна и предел его прочности. Их вариация ведет к вариативности параметров НДС и процесса накопления повреждений и в конечном итоге к статистическому рассеянию значений давления разрушения. Выполненные расчеты подтверждают экспериментальные наблюдения о том, что потеря несущей способности композитной оболочки происходит в результате процесса накопления повреждений [2, 20]. Результаты вероятностного анализа можно использовать для количественной оценки близости состояния МКБВД к предельному и решать задачи оценки прочностной надежности конструкции при заданных параметрах нагружения.

Литература

1. Vasiliev V. V. Composite Pressure Vessels: Analysis, Design, and Manufacturing. – Blacksburg, VA : Ridge Publishing, 2009. – 690 p.
2. Несущая способность и безопасность металлокомпозитных баков космических аппаратов / под ред. В. В. Москвичева, Н. А. Тестоедова. – Новосибирск : Наука, 2021. – 440 с.
3. Application of filament winding technology in composite pressure vessels and challenges: a review / M. Azeem, H. H. Ya, M. A. Alam, M. Kumar, P. Stabla, M. Smolnicki, L. Gemi, R. Khan, T. Ahmed, Q. Ma, M. R. Sadique, A. A. Mokhtar, M. Mustapha // Journal of Energy Storage. – 2022. – Vol. 49. – Art. 103468. – DOI: 10.1016/j.est.2021.103468.
4. Kam T. Y., Liu Y. W., Lee F. T. First-ply failure strength of laminated composite pressure vessels // Composite Structures. – 1997. – Vol. 38. – P. 65–70. – DOI: 10.1016/S0263-8223(97)00042-1.
5. Garnich M. R., Akula M. K. Review of degradation models for progressive failure analysis of fiber reinforced polymer composites // Applied Mechanics Reviews. – 2009. – Vol. 62 (1). – P. 010801. – DOI: 10.1115/1.3013822.
6. Ganesan R., Nair A. S. Reliability-based first-ply failure envelopes of composite tubes subjected to combined axial and torsional loadings // Mechanics Based Design of Structures and Machines. – 2024. – Vol. 52. – P. 4470–4502. – DOI: 10.1080/15397734.2023.2229415.
7. De Luca A., Caputo F. A review on analytical failure criteria for composite materials // AIMS Materials Science. – 2017. – Vol. 4. – P. 1165–1185. – DOI: 10.3934/mat.2017.5.1165.
8. Работнов Ю. Н. Проблемы механики деформируемого твердого тела : избранные труды. Москва : Наука, 1991. – 194 с.
9. Srilakshmi Ch., Sambasivarao G., Suresh Kumar J. A review on progressive failure analysis of composites // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1185. – Art. 012020. – DOI: 10.1088/1757-899X/1185/1/012020.
10. Regassa Y., Gari J., Lemu H. G. Composite overwrapped pressure vessel design optimization using numerical method // Journal of Composites Science. – 2022. – Vol. 6. – P. 229. – DOI: 10.3390/jcs6080229.
11. A three-dimensional progressive failure analysis of filament-wound composite pressure vessels with void defects / L. Ge, J. Zhao, H. Li, J. Dong, H. Geng, L. Zu, S. Lin, X. Jia, X. Yang // Thin-Walled Structures. – 2024. – Vol. 199. – Art. 111858. – DOI: 10.1016/j.tws.2024.111858.
12. Ozaslan E., Yurdakul K., Talebi C. Investigation of effects of manufacturing defects on bursting behavior of composite pressure vessels with various stress ratios // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2022. – Vol. 199. – Art. 104689. – DOI: 10.1016/j.ijpvp.2022.104689.
13. Micromechanical analysis of composite materials considering material variability and microvoids / O. Vallmajo, A. Arteiro, J. M. Guerrero, A. R. Melro, A. Pupurs, A. Turon. // International Journal of Mechanical Sciences. – 2024. – Vol. 263. – Art. 108781. – DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2023.108781.
14. Burov A. E. Burst pressure estimations of a composite pressure vessel accounting for the composite shell imperfections // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1260, iss. 11. – Art. 112007. – DOI: 10.1088/1742-6596/1260/11/112007.



15. Вероятностный риск-анализ конструкций технических систем / А. М. Лепихин, Н. А. Махутов, В. В. Москвичев, А. П. Черняев. – Новосибирск : Наука, 2003. – 173 с.
16. Zu L., Koussios S., Beukers A. Design of filament-wound isotenoid pressure vessels with unequal polar openings // *Composite Structures*. – 2010. – Vol. 92. – P. 2307–2313. – DOI: 10.1016/j.compstruct.2009.07.013.
17. Hashin Z. Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites // *Journal of Applied Mechanics*. – 1980. – Vol. 47. – P. 329–334. – DOI: 10.1115/1.3153664.
18. Каплун А. Б., Морозов Е. М., Шамраева М. А. ANSYS в руках инженера : практическое руководство. – Москва : Ленанд, 2021. – 272 с.
19. Halpin J. C., Kardos J. L. The Halpin-Tsai equations: a review // *Polymer Engineering and Science*. – 1976. – Vol. 16. – P. 344–352. – DOI: 10.1002/pen.760160512.
20. Design and development of a filament wound composite overwrapped pressure vessel / S. Alam, G. R. Yandek, R. C. Lee, J. M. Mabry // *Composites. Part C: Open Access*. – 2020. – Vol. 2. – Art. 100045. – DOI: 10.1016/j.jcomc.2020.100045.