

**Механика материалов:
прочность, ресурс, безопасность****Materials mechanics:
strength, durability, safety**

DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-I-49-56

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ И РЕСУРСА
МЕТАЛЛОКОМПОЗИТНЫХ БАКОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ**

© **Анатолий Михайлович Лепихин¹, Владимир Викторович
Москвичев¹, Андрей Ефимович Буров¹, Евгений
Валерьевич Анискович¹, Анатолий Петрович Черняев²,
Владимир Иванович Халиманович³**

¹ Красноярский филиал Института вычислительных технологий СО РАН, г. Красноярск, Россия; e-mail: aml@ict.nsc.ru

² Научно-производственное предприятие «СибЭРА», г. Красноярск, Россия. e-mail: sib_era@sib.kras.ru

³ АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнева, г. Железногорск, Россия.

*Статья поступила 13 февраля 2018 г. Поступила после доработки 9 октября 2018 г.
Принята к публикации 25 ноября 2018 г.*

Представлены результаты уникальных экспериментальных исследований прочности и ресурса металлокомпозитного бака высокого давления. Определены механизмы разрушения и оценены характеристики прочности конструкции. Методика исследований включала испытания натурных образцов бака на прочность при кратковременном статическом, длительном статическом и циклическом нагружениях внутренним пневматическим давлением. Приведены обобщающие результаты испытаний и данные визуально-измерительного, инструментального и акустико-эмиссионного контроля процессов деформирования, накопления повреждений и разрушения натурных образцов бака. Представлен анализ прочности и жесткости конструкции при воздействии внутреннего пневматического давления. Экспериментально установлены виды предельных состояний бака и коэффициенты запаса прочности по разрушающему давлению. Исследованы особенности напряженно-деформированного состояния натурных образцов бака при циклическом и длительном статическом нагружениях. Выявлены локальные перераспределения напряжений и деформаций в слоях композитной оболочки, обусловленные наложением полей технологических напряжений, напряжений от внутреннего давления и действием слабо выраженных процессов низкотемпературной ползучести композитного материала. Установлены особенности механизмов разрушения бака с учетом процессов деформирования металлического лайнера. Представлены расчетно-экспериментальные оценки энергетического потенциала разрушения и размеров зоны поражения при разрушении бака. Обобщенный анализ результатов испытаний показал, что бак имеет высокие прочностные и ресурсные характеристики, удовлетворяющие требованиям проектной документации. Разработанная конструкция может рассматриваться как основа для создания серии баков различной емкости для использования в космических аппаратах тяжелого, среднего и легкого классов. Результаты экспериментов хорошо согласуются с данными численных расчетов напряженно-деформированного состояния и анализа механизмов разрушения, что указывает на адекватность использованных расчетных моделей.

Ключевые слова: металлокомпозитный бак; прочность; ресурс; испытания; разрушение; акустико-эмиссионный контроль.

**EXPERIMENTAL STUDY OF THE STRENGTH AND DURABILITY
OF METAL-COMPOSITE HIGH-PRESSURE TANKS**

© **Anatoly M. Lepikhin¹, Vladimir V. Moskvichev¹, Andrey E. Burov¹,
Evgeny V. Aniskovich¹, Anatoly P. Cherniaev², Vladimir I. Khalimanovich³**

¹ Krasnoyarsk branch of the Institute of computational technologies SB RAS, Krasnoyarsk, Russia; e-mail: aml@ict.nsc.ru

² Research and Production Enterprise "SibERA", Krasnoyarsk, Russia; e-mail: sib_era@sib.kras.ru

³ JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems, Geleznogorsk, Russia.

Received February 13, 2018. Revised October 9, 2018. Accepted November 25, 2018.

The results of unique experimental studies of the strength and service life of a metal-composite high-pressure tank are presented. The goal of the study is to analyze the fracture mechanisms and evaluate the strength characteristics of the structure. The methodology included tests of full-scale samples of the tank for durability under short-term static, long-term static and cyclic loading with internal pneumatic pressure. Generalized test results and data of visual measurements, instrumental and acoustic-emission control of deformation processes, accumulation of damages and destruction of full-scale tank samples are presented. Analysis of the strength and stiffness of the structure exposed to internal pneumatic pressure is presented. The types of limiting states of the tanks have been established experimentally. Change in the stress-strain state of the tank under cyclic and prolonged static loading is considered. Specific features of the mechanisms of destruction of a metal-composite tank are determined taking into account the role of strain of the metal liner. The calculated and experimental estimates of the energy potential of destruction and the size of the area affected upon destruction of the tank are presented. Analysis of test results showed that the tank has high strength and resource characteristics that meet the requirements of the design documentation. The results of the experiments are in good agreement with the results of numerical calculations and analysis of the stress-strain state and mechanisms of destruction of the metal-composite tank.

Keywords: metal-composite tank, strength, service life, testing, fracture, acoustic-emission control.

Металлокомпозитные конструкции сосудов различного назначения находят широкое применение в авиационной и ракетно-космической технике. Малая масса и высокая прочность металлокомпозитных баков позволяют запасать объемы расходного тела, достаточные для обеспечения работоспособности космических аппаратов в течение заданного срока активного существования (САС) космического аппарата. Высокие уровни рабочих давлений и жесткие требования к надежности таких баков диктуют необходимость всестороннего расчетно-экспериментального обоснования их конструкции и оценки предельных рабочих параметров.

Рассматриваемая в статье конструкция металлокомпозитного бака высокого давления (МКБВД) разработана учеными Центрального научно-исследовательского института специального машиностроения совместно со специалистами предприятия «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева для электрореактивных двигателей космических аппаратов. Основная функция МКБВД заключается в хранении необходимого объема рабочего тела (ксенона). По техническим условиям давление разрушения для бака с запасом ксенона 350 кг (Тип-1) должно быть не менее $(13,5 \pm 0,5)$ МПа, а для бака с запасом ксенона 500 кг (Тип-2) — $(18,9 \pm 0,5)$ МПа. САС — не менее 15 лет при вероятности безотказной работы не ниже 0,999. Для обеспечения указанных параметров решали задачи выбора оптимальной формы бака и конструкционных материалов, а также обоснования методов конструктивно-технологического исполнения [1, 2]. Отдельный блок задач составляли оценки прочности, ресурса, надежности, безопасности МКБВД и оценки его соответствия условиям длительной эксплуатации на орбите. Для их решения использовали расчетно-экспери-

ментальные методы [3, 4]. Некоторые предварительные экспериментальные оценки прочности и герметичности МКБВД изложены в работе [5]. В данной статье представлены обобщенные итоговые результаты испытаний МКБВД на прочность при кратковременном статическом, длительном статическом и циклическом нагружении внутренним пневматическим давлением.

Экспериментальные исследования проводили на натурных образцах МКБВД, изготовленных и испытанных в соответствии с требованиями конструкторской документации. Конструктивно МКБВД представляли собой осесимметричную эллипсоидную оболочку вращения, состоящую из тонкостенного металлического сосуда (лейнера) и композитной оболочки. Металлический лейнер обеспечивает герметичность МКБВД, а композитная оболочка — его прочность. Лейнер — тонкостенная сварная емкость из титанового сплава, состоящая из двух днищ переменной толщины, сваренных между собой на подкладном кольце, и двух фланцев. Днища изготавливали методом раскатки из листа ВТ1-0 1,5 по ГОСТ 22178–76, композитную силовую оболочку — спирально-кольцевым методом непрерывной намотки на лейнер пакетов угольных волокон в несколько слоев. Материал волокон — IMS-60. В качестве связующего использовали эпоксидную смолу ЭД-И или ЭДУ.

Методика экспериментальных исследований включала испытания на прочность до разрушения при кратковременном статическом нагружении и ресурсные испытания при длительном статическом и циклическом нагружениях внутренним пневматическим давлением. При кратковременном статическом нагружении было испытано 15 образцов, при длительном статическом нагружении — один образец, при циклическом нагружении — один образец. В отличие от обыч-

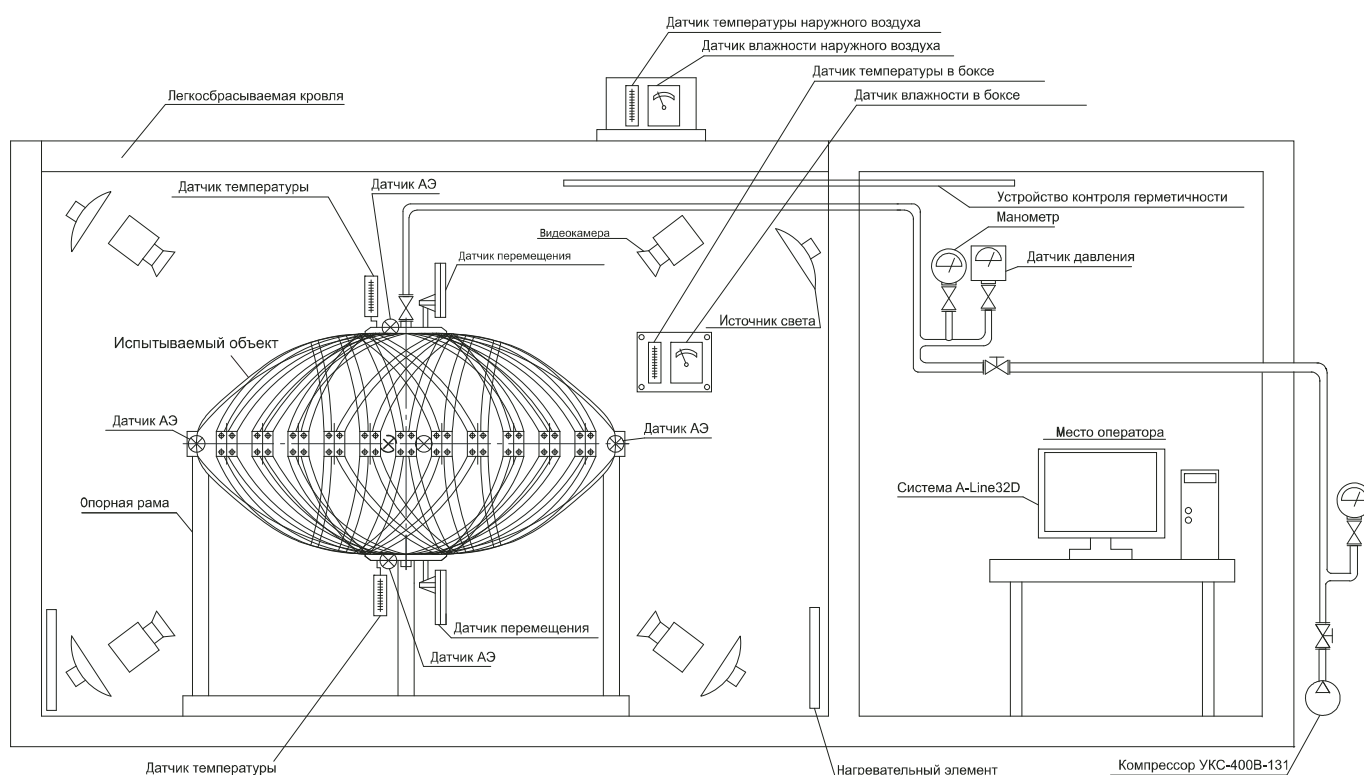


Рис. 1. Схема испытательного стенда

но проводимых гидравлических испытаний сосудов данные испытания проводили при пневматическом нагружении, что обеспечило уникальность полученных результатов.

Испытания на прочность до разрушения и ресурсные испытания при длительном нагружении проводили с использованием специально разработанных испытательных стендов (рис. 1). Стенд испытаний до разрушения был смонтирован в полевых условиях и состоял из взрывозащищенного бункера размерами $3,0 \times 2,0 \times 1,5$ м, выполненного из железобетонных блоков ФБС СБ-4-12, металлического каркаса для установки и закрепления МКБВД и приборов, воздушного компрессора УКС-400В-131, воздуховода высокого давления, запорной и контрольно-измерительной арматуры. В отличие от указанного стенда бокс для длительных испытаний имел закрытое исполнение с герметизируемой легкосбрасываемой кровлей и системой автоматического поддержания в нем заданной температуры и влажности воздуха.

В процессе испытаний проводили измерения перемещений по малой и большой осям баков с использованием датчиков линейных перемещений типа ЛИР-7М. Напряженно-деформированное состояние контролировали с использованием резистивных датчиков (тензорезисторы KFW-5-350-C1-11L1M2R) и измерительного модуля LTR212, техническое состояние МКБВД в про-

цессе нагружения — с помощью системы акустико-эмиссионного (АЭ) контроля A-Line 32D. Сигналы АЭ регистрировали шестью преобразователями, два из которых устанавливали на фланцах лейнера и четыре — на композитной оболочке (равномерно по экватору). Результаты АЭ контроля обрабатывали по методике работы [6]. Для контроля герметичности использовали пенополимерный индикатор ППИ-2, который наносили на поверхность бака непосредственно перед нагружением. Для видеонаблюдения состояния бака использовали видеокамеры GF-IR-1353X и СК-F-361IR. Перемещения и изображения с видеокамер записывали непрерывно и выводили на экран контрольного монитора. Общий вид баков перед испытаниями с установленными контрольно-измерительными средствами представлен на рис. 2.

Нагружение МКБВД в процессе испытаний до разрушения проводили компрессором УКС-400В-131 ступенчато, с выдержками при определенных давлениях для проведения АЭ контроля. Число ступеней — от 6 до 10 — зависело от давления наступления предельного состояния бака.

Нагружение МКБВД при ресурсных испытаниях также проводили компрессором УКС-400В-131 до заданного рабочего давления. Затем компрессор отключали, запорный клапан системы подачи воздуха перекрывали и давление поддерживали постоянным в течение всего времени

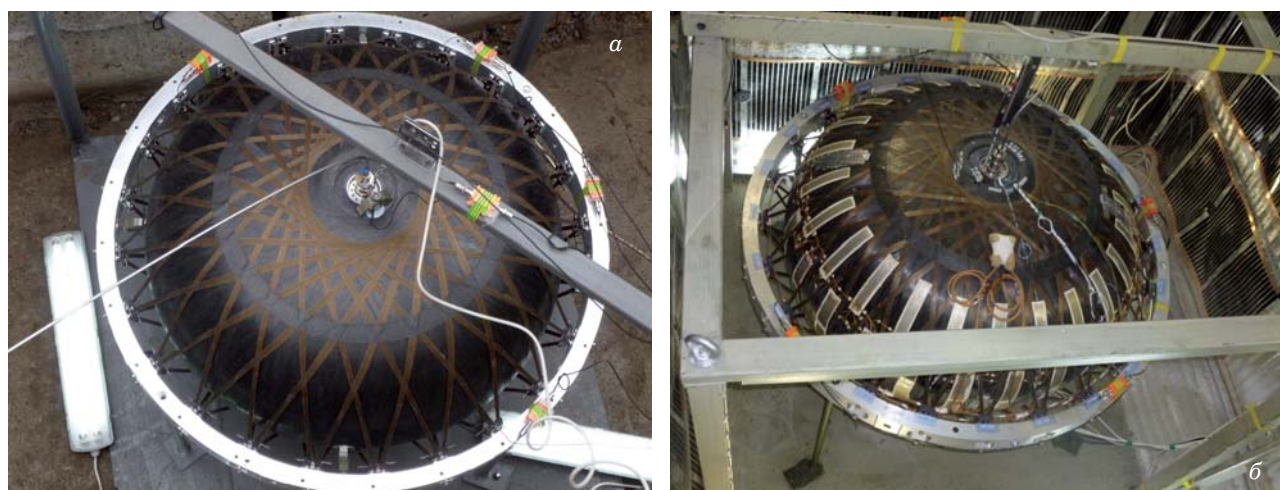


Рис. 2. Общий вид МКБВД в бункере для испытаний до разрушения (а) и в боксе для испытаний на длительную прочность (б)

испытаний (три года). Параметры состояния бака (давление, температура, перемещения, показания тензодатчиков) фиксировали дважды в неделю. АЭ контроль проводили после нагружения бака до заданного давления и далее — с интервалом один раз в месяц.

Циклическое нагружение бака осуществляли компрессором УКС-400В-131 в производственном помещении. Параметры цикла нагружения выбирали с учетом особенностей деформирования лейнера: максимальное давление $P_{\max} = 10$ МПа (1,25 от рабочего давления), минимальное давление $P_{\min} = 5$ МПа (минимальное давление, при

котором в лейнере возникают локальные зоны пластических деформаций). Число циклов нагружения принимали равным числу рабочих циклов, заданных конструкторской документацией, умноженному на коэффициент запаса по циклам нагружения (для конструкций сосудов космических аппаратов принимается не ниже 7); оно составило 82 цикла. При этом 70 циклов имели выдержки в течение 5 мин на $P_{\max}$ и $P_{\min}$ для учета эффектов кратковременной релаксации деформаций. После 25 циклов выполняли один цикл перегрузки с максимальным давлением 13 МПа. Последние 10 циклов нагружения осуществляли без выдержки. Акустико-эмиссионный контроль проводили в течение первых 15 циклов нагружения.

Обобщенные результаты испытаний на прочность до разрушения представлены в табл. 1. Видно, что для большинства МКБВД (Тип-1) предельным состоянием стало нарушение герме-

Таблица 1. Результаты испытаний МКБВД при статическом нагружении

Номер МКБВД	Давление разрушения, МПа	Вид ПС	Перемещения, мм
T1-01	24,7	ПС-2	—
T1-12	21	ПС-1	11,6
T1-15	16,8	ПС-1	11,8
T1-02 ¹	11,7	ПС-1	—
T1-21	15,2	ПС-1	10,7
T1-22 ¹	13,5	ПС-1	9,7
T1-31 ²	20	—	10,7
T1-32	27,5	ПС-2	8,4
T1-33	15	ПС-1	7,9
T1-34	18	—	8,6
T1-23	18,4	ПС-1	9,8
T2-03	33	ПС-2	8,4
T2-01	35	ПС-2	8,5
T2-04	31,7	ПС-2	8,6
T2-05	32	ПС-2	6,0
T1-13	Длит. нагруж.	—	5,1 – 7,5

¹ Баки с дефектами сварных швов.

² Баки после циклического нагружения (82 цикла).

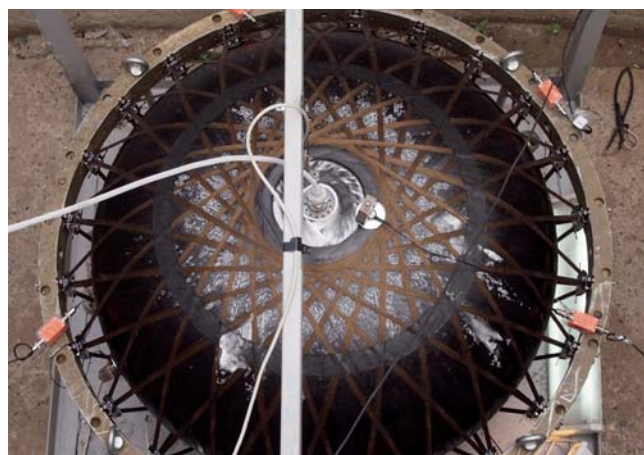


Рис. 3. Вид бака при потере герметичности (вспенивании полимерного индикатора)



Рис. 4. Характер повреждений бака при испытаниях: *а* — разрушение сварного соединения; *б* — потеря устойчивости лейнера

тичности (ПС-1). Факт нарушения герметичности определяли по вспениванию полимерного индикатора ППИ-2 (рис. 3) и по данным АЭ контроля. Для установления причин потери герметичности были проведены вскрытия (удаления) части композитной оболочки баков в зоне вспенивания индикатора.

Визуально-измерительным контролем были обнаружены разрушения сварных соединений расходного фланца с днищем лейнера и характерная локальная потеря устойчивости стенки лейнера (рис. 4). Механизм потери устойчивости установлен и описан при проведении численных расчетов напряженно-деформированного состояния [3, 4]. Металлографические исследования показали, что разрушения соединений произошли по механизму истощения прочностных свойств металла зоны термического влияния. Указанные разрушения обусловлены высокими уровнями локальных деформаций [3]. Имеющийся разброс давлений потери герметичности можно отнести к естественному разбросу механических свойств сварного соединения и жесткости композитной оболочки. Исключение составляют баки № Т1-02 и Т1-22, сварные соединения которых имели технологические дефекты.

По результатам анализа механизмов потери герметичности баков и указанных численных расчетов напряженно-деформированного состояния были изменены конструкции фланцев и силовой оболочки (число слоев композита увеличено с 7 до 9), что позволило существенно повысить жесткость и прочность баков. В результате этого удалось исключить предельные состояния в виде потери герметичности.

При дальнейших испытаниях МКБВД фиксировали предельные состояния в виде разрушений баков (ПС-2) при уровнях давлений, су-

щественно превышающих расчетные проектные давления разрушения. В данном случае коэффициенты запаса прочности существенно превышали величину, заданную техническими условиями. Следует отметить, что разрушения МКБВД сопровождались ударной волной и выбросом фрагментов бака из бункера на высоту до 50 м. Радиус разлета осколков и фрагментов составил 30 – 40 м, а мелких фракций композитной оболочки — до 50 м. Расчеты по методике [7] показали, что тротиловый эквивалент взрыва — около 2 кг для МКБВД (Тип-1) и до 3 кг для МКБВД (Тип-2).

Анализ данных АЭ контроля МКБВД в процессе испытаний позволил заключить, что при давлении до 5 МПа происходит преимущественное деформирование лейнера без трения его о поверхность композитной оболочки. На это указывает наличие единичных источников АЭ сигналов, фиксируемых датчиками, установленными на фланцах. При давлении свыше 5 – 8 МПа зафиксировано нарастающее число АЭ источников от датчиков на композитной оболочке. Следует отметить, что область АЭ активности на этом этапе нагружения совпадает с выявленной при указанных выше численных расчетах зоной активного трения поверхностей лейнера и композитной оболочки. При давлении свыше 11 МПа отмечены АЭ сигналы, обусловленные растрескиванием матрицы и скольжением слоев композитной оболочки. В диапазоне давлений 15,0 – 17,0 МПа выявлены критические источники АЭ III класса, отражающие процессы разрушения волокон композита и формирования локальных кластеров повреждений. При дальнейшем повышении давления (свыше 20 – 22 МПа) зафиксированы катастрофические источники АЭ IV класса, обусловленные процессами развития

очаговых повреждений с множественными разрывами волокон. За несколько секунд до разрушения отмечен резкий рост суммарной активности по каналу АЭ датчика на фланце лейнера. Наиболее вероятным источником такой активности можно считать процесс разрушения лейнера.

Интересные результаты показали измерения перемещений по осям баков в меридиональной и экваториальной плоскостях. Установлено, что перемещения в меридиональной плоскости (по малой оси) находятся в пределах 7,9 – 11,8 мм для МКБВД (Тип-1) и 6,0 – 9,8 мм для более жестких конструкций МКБВД (Тип-2). Сравнительные диаграммы перемещений представлены на рис. 5. Из него следует, что для МКБВД (Тип-1) можно выделить три зоны деформирования. Первая зона находится в пределах давлений до 4 МПа и характеризуется нелинейностью диаграмм перемещений, которую можно объяснить влиянием начальных несовершенств формы баков. Во второй области, при давлениях от 4 до 16 МПа, наблюдается практически линейный рост перемещений. При этих давлениях расширение бака происходит преимущественно в направлении малой оси при незначительных перемещениях в экваториальной плоскости. При давлениях свыше 16 – 17 МПа запас деформативности бака по малой оси исчерпывается и начинается деформирование бака по всему контуру, в том числе и в экваториальной плоскости, с соответствующим снижением темпа нарастания деформаций по малой оси. Вследствие этого возникает третья область нелинейности диаграмм вплоть до момента потери герметичности или разрушения бака.

Более высокая «жесткость» конструкции баков с 9-слойным исполнением композитной оболочки (МКБВД, Тип-2) по сравнению с 7-слойным привела к изменению картины их деформирования и разрушения. Фактически диаграммы перемещений оказались нелинейными во всем диапазоне давлений. Совпадение величин перемещений для баков Тип-2 и Тип-1 имело место только в диапазоне давлений до 4 МПа. Далее

наблюдалось нарастающее отклонение перемещений от полученных ранее результатов. Следует отметить, что в диапазоне давлений от 4 до 18 – 20 МПа деформирование баков происходило преимущественно в направлении малой оси. При давлениях свыше 20 МПа рост перемещений в направлении малой оси прекращался, а в ряде случаев даже отмечалось их незначительное снижение по мере роста давления. Снижение перемещений по малой оси связано с более высоким темпом нарастания перемещений по большой оси бака. Величина этих перемещений перед разрушением достигала 2 мм (для 7-слойных баков эти перемещения не превышали 0,5 мм). Особенности механизма разрушения 9-слойных баков заключались в том, что разрушения инициировались в экваториальной области. На это указывают данные АЭ контроля и анализ фрагментов разрушения.

Испытания на длительную прочность проводили на МКБВД (Тип 1) в течение трех лет. После выдержки бака в течение года при давлении 7,8 МПа его «догружали» до давления 10,8 МПа, соответствующего рабочему давлению для МКБВД (Тип 2). Анализ результатов измерений перемещений в меридиональной плоскости (по малой оси) бака показал, что при давлении 7,8 МПа эти перемещения находились в узком интервале — от 5,11 до 5,52 мм, а при давлении 10,8 МПа — в интервале от 6,8 до 7,52 мм. При этом после повышения давления сначала перемещения образующей бака плавно увеличились на 1,75 мм, а затем плавно уменьшились на 0,03 мм с последующей стабилизацией значений.

Анализ деформаций, полученных по показаниям тензорезисторов, показал следующее. Деформации находятся в узких пределах со слабыми тенденциями изменений средних значений (табл. 2). Деформации в области расходного фланца (тензодатчик № 1) являются сжимающими и находятся в диапазоне $-4,16 \cdot 10^{-4}$ – $-5,14 \cdot 10^{-4}$, снижение их значений происходит плавно. Изменение средних значений деформаций за период испытаний не превышает 10 %. На расстоянии 250 мм от фланца (тензодатчик № 2) деформации находятся в диапазоне $+3,47 \cdot 10^{-4}$ – $+7,57 \cdot 10^{-4}$. В этой зоне нагружены в основном верхние слои композитной оболочки. Изменение средних значений деформаций не превышает 11 %. На расстоянии 600 мм от фланца (тензодатчик № 3) деформации находятся в диапазоне $-2,10 \cdot 10^{-4}$ – $+1,24 \cdot 10^{-4}$. Здесь происходит более существенное изменение деформаций (на 44 %), с переходом от сжатия к растяжению. В экваториальной зоне (тензодатчик № 4) деформации находятся в пределах $+4,37 \cdot 10^{-4}$ – $+6,80 \cdot 10^{-4}$. В этой зоне имеет место плавное уве-

Таблица 2. Статистические параметры деформаций при длительных испытаниях

Номер тензодатчика	Среднее значение в начале испытаний	Среднее значение в конце испытаний	Среднее квадратическое отклонение
1	$-4,65 \cdot 10^{-4}$	$-4,60 \cdot 10^{-4}$	$1,91 \cdot 10^{-5}$
2	$4,50 \cdot 10^{-4}$	$5,02 \cdot 10^{-4}$	$1,52 \cdot 10^{-4}$
3	$-2,11 \cdot 10^{-4}$	$1,11 \cdot 10^{-4}$	$4,78 \cdot 10^{-5}$
4	$4,72 \cdot 10^{-4}$	$5,53 \cdot 10^{-4}$	$1,55 \cdot 10^{-4}$

Таблица 3. Статистические параметры деформаций при циклических испытаниях

Номер тензо-датчика	Среднее значение в 1 – 26 циклах	Среднее значение в 27 – 82 циклах	Среднее квадратическое отклонение
7	$-7,12 \cdot 10^{-4}$	$-6,22 \cdot 10^{-4}$	$0,03 \cdot 10^{-4}$
6	$7,68 \cdot 10^{-4}$	$7,50 \cdot 10^{-4}$	$0,08 \cdot 10^{-4}$
8	$7,15 \cdot 10^{-4}$	$7,00 \cdot 10^{-4}$	$0,05 \cdot 10^{-4}$
5	$-4,24 \cdot 10^{-4}$	$-4,24 \cdot 10^{-4}$	$0,07 \cdot 10^{-4}$

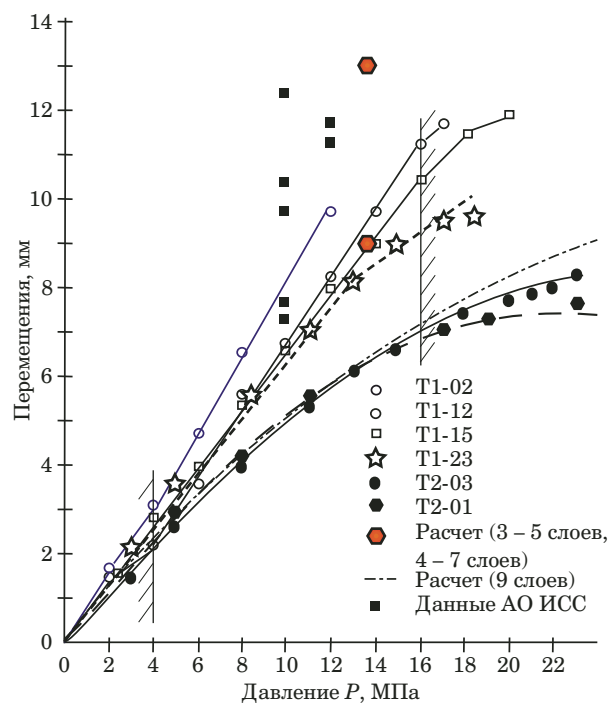
личение деформации слоев композитной оболочки (изменение средних значений деформаций составляет 17 %).

Как следует из полученных результатов, каких-либо существенных тенденций на диаграммах перемещений и деформаций бака, явно свидетельствующих о развивающихся процессах ползучести конструкции, не отмечается. Можно полагать, что происходят процессы локальных перераспределений напряжений и деформаций в верхних слоях композитной оболочки, обусловленных наложением сложной картины технологических напряжений, напряжений от внутреннего давления и слабо выраженных процессов низкотемпературной ползучести композитного материала. Повышение давления на втором этапе испытаний не привело к значимому росту деформаций. Фиксируемый уровень деформаций в целом соответствовал результатам расчетов [4, 5].

По данным испытаний можно полагать, что МКБВД обладает ресурсом не ниже указанных трех лет при заданных рабочих давлениях. Данный тезис будет проверен в ходе дальнейших испытаний и расчетных оценок с использованием известных моделей ползучести композитных материалов данного класса.

Циклические испытания проводили на МКБВД (Тип-1). Для обеспечения безопасности бак предварительно заполняли водой. Затем осуществляли пневматическое циклическое нагружение компрессором УКС-400В-131. В процессе испытаний с 1 по 70 цикл нагружения выявлены незначительные изменения деформаций, свидетельствующие о процессах перераспределения напряжений в композитном материале (табл. 3). При нагружениях с 71 по 82 цикл каких-либо особых изменений деформаций не наблюдали. Уровень зафиксированных деформаций сопоставим с указанными выше значениями при испытаниях бака на длительную прочность.

На первых 15 циклах нагружения МКБВД АЭ контролем не выявлено каких-либо существенных деформационных процессов и сколь угодно значимых источников АЭ. Обнаружены

**Рис. 5.** Графики перемещений

лишь пассивные источники II класса. Дефектов и повреждений конструкции после испытаний не выявлено. Проведенные после циклического нагружения испытания бака на прочность с АЭ контролем до давления 20 МПа показали отсутствие критических источников акустической эмиссии. Характер диаграммы перемещений бака также не имел особенностей по сравнению с ранее полученной. На основании этого можно заключить, что предусмотренные конструкторской документацией циклические нагружения бака в процессе технологических испытаний не приводят к каким-либо значимым процессам накопления повреждений и снижению прочностных характеристик бака. Бак обладает достаточным ресурсом по числу циклов нагружения.

Таким образом, выполнены уникальные экспериментальные исследования прочности и ресурса натурных образцов металлокомпозитного бака высокого давления для электрореактивных двигателей космических аппаратов. Испытания на прочность до разрушения при кратковременном статическом нагружении и ресурсные испытания при длительном статическом и циклическом нагружении внутренним пневматическим давлением показали высокие прочностные и ресурсные характеристики МКБВД, удовлетворяющие требованиям проектной документации.

Результаты экспериментов, полученные с использованием современных средств инструментального и неразрушающего контроля, в целом хорошо согласуются с данными численных рас-

четов напряженно-деформированного состояния и анализа механизмов разрушения металлокомпозитного бака. Разработанная конструкция МКБВД может рассматриваться как основа для создания серии баков различной емкости для использования в космических аппаратах тяжелого, среднего и легкого классов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Vasiliev V. V.** Composite Pressure Vessels: Analysis, Design, and Manufacturing. — Blacksburg, VA: Bull Ridge Publishing, 2009. — 690 p.
2. **Азаров А. В., Бабичев А. А., Синьковский Ф. К.** Проектирование и изготовление композитного бака высокого давления для космического аппарата / Композиты и наноструктуры. 2013. № 4. С. 44 – 57.
3. **Лепихин А. М., Буров А. Е., Москвичев В. В.** Возможности расчетной оценки надежности металлокомпозитных баков высокого давления / Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. № 4. С. 49 – 55.
4. **Амелина Е. В., Буров А. Е., Голушко С. К., Лепихин А. М., Москвичев В. В., Юрченко А. В.** Расчетно-экспериментальная оценка прочности металлокомпозитного бака высокого давления / Вычислительные технологии. 2016. Т. 21. № 5. С. 3 – 21.
5. **Лепихин А. М., Москвичев В. В., Черняев А. П., Похабов Ю. П., Халиманович В. И.** Экспериментальная оценка прочности и герметичности металлокомпозитных сосудов высокого давления / Деформация и разрушение материалов. 2015. № 6. С. 30 – 36.
6. ГОСТ Р 52727–2007. Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Общие требования. — М.: Стандартинформ, 2007.
7. Сборник методических документов, применяемых для независимой оценки рисков в области пожарной безопасности, гражданской обороны и защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций. Ч. 2. — М.: Полимаг, 2008. — 704 с.

REFERENCES

1. **Vasiliev V. V.** Composite Pressure Vessels: Analysis, Design, and Manufacturing. — Blacksburg, VA: Bull Ridge Publishing, 2009. — 690 p.
2. **Azarov A. V., Babichev A. A., Sin'kovskii F. K.** Design and manufacture of composite high-pressure tank for spacecraft / Kompozity Nanostrukt. 2013. N 4. P. 44 – 57 [in Russian].
3. **Lepikhin A. M., Burov A. E., Moskvichev V. V.** Opportunities for estimating the reliability of high pressure metal-composite tanks / Probl. Mashinostr. Nadezhn. Mashin. 2015. N 4. P. 49 – 55 [in Russian].
4. **Amelina E. V., Burov A. E., Golushko S. K., Lepikhin A. M., Moskvichev V. V., Yurchenko A. V.** Calculated and experimental evaluation of the strength of high-pressure metal composite tank / Vychislit. Tekhnol. 2016. Vol. 21. N 5. P. 3 – 21 [in Russian].
5. **Lepikhin A. M., Moskvichev V. V., Chernyaev A. P., Pokhabov Yu. P., Khalimanovich V. I.** Experimental evaluation of the strength and tightness of metal-composite high-pressure vessels / Deform. Razrush. Mater. 2015. N 6. P. 30 – 36 [in Russian].
6. RF State Standard GOST R 52727–2007. Technical diagnostics. Acoustic-emission diagnostics. General requirements. — Moscow: Standartinform, 2007 [in Russian].
7. Collection of methodological documents used for independent risk assessment in the field of fire safety, civil defense and protection of the population and territories from emergency situations. Part 2. — Moscow: Polimag, 2008. — 704 p. [in Russian].