

УДК 621.454.3.02:539.217.3

Ю.П. Сирик, Ю.А. Лях, Ю.Н. Бабей, О.В. Помин

КОНСТРУКТИВНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЛАГОНЕПРОНИЦАЕМОСТИ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Рассмотрены вопросы исключения влияния влагообменных процессов на чувствительные к влаге элементы узлов изделий. Приведен перечень задач, решение которых с использованием результатов оценки параметров тепло- и влагопереноса в многослойных оболочках из композиционных материалов позволит конструктивно обеспечить влагонепроницаемость изделий, эксплуатируемых в неизотермических условиях в течение гарантийного срока.

Розглянуто питання виключення впливу вологообмінних процесів на чутливі до вологи елементи вузлів виробів. Наведено перелік задач, вирішення яких з використанням результатів оцінки параметрів тепло- і вологопереносу у багатoshарових оболонках із композиційних матеріалів дозволить конструктивно забезпечити вологонепроникність виробів, експлуатованих у неізотермічних умовах протягом гарантійного строку.

The issues are considered of exclusion of influence of moisture exchange processes on moisture-sensitive elements of hardware assemblies. The list of problems is given, solution of which using the results of evaluation of parameters of heat-and-moisture transfer in multi-layer shells made of composite materials will allow to structurally ensure the moisture resistance of hardware operated in non-isothermal conditions during warranty period.

При проектировании ракетных двигателей твердого топлива (РДТТ) с использованием композиционных материалов, эксплуатируемых в течение гарантийного срока при различных температурно-влажностных режимах (ТВР) окружающей среды, учитывается условие обеспечения их работоспособности – исключение влагообменных процессов между окружающей средой и чувствительными к влаге элементами узлов РДТТ.

Анализ конструкции основных узлов РДТТ (крышка в сборе, корпус, сопло) показал, что наиболее чувствительным к влаге узлом является наполненный корпус двигателя. Оболочка корпуса является многослойной, изготовленной из композиционных материалов, внутренняя поверхность которой прочно скреплена с зарядом твердого топлива, который и является самым чувствительным к влаге элементом. Защита узлов РДТТ и их элементов от воздействия влажного воздуха обеспечивается тем, что они снабжаются герметизирующими оболочками. Так, например, для заряда твердого топлива герметизирующей является многослойная оболочка корпуса из композиционных материалов (рис. 1), а для РДТТ и размещенных на них приборов – металлический

корпус (контейнер), в котором длительное время хранится указанное изделие.

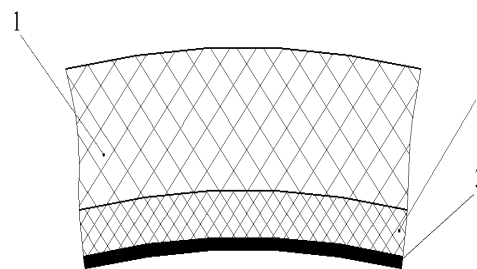


Рис. 1. Многослойная оболочка корпуса:
1 – органопластик; 2 – резина;
3 – защитно-крепящий слой

Проникновение влаги внутрь герметизированного объема, образованного проницаемой герметизирующей оболочкой, происходит двумя путями:

1) перетеканием наружного воздуха через каналы возможной течи в разъемных соединениях оболочки (соединения крышки в сборе и сопла с корпусом), вызываемым разностью давлений снаружи и внутри;

2) диффузионным проникновением водяных паров из наружного воздуха непосредственно через влагонепроницаемый материал оболочки, вызываемым разностью парциальных давлений водяных паров снаружи и внутри.

Анализ конструктивной схемы РДТТ и требований к герметичности разъемных и

неразъемных соединений герметизирующей оболочки свидетельствует о том, что перенос влаги перетеканием наружного воздуха через каналы возможной течи в испытанных на герметичность соединениях оболочки невозможен из-за отсутствия зазоров между стыковочными поверхностями и уплотнительным элементом соединений (рис. 2).

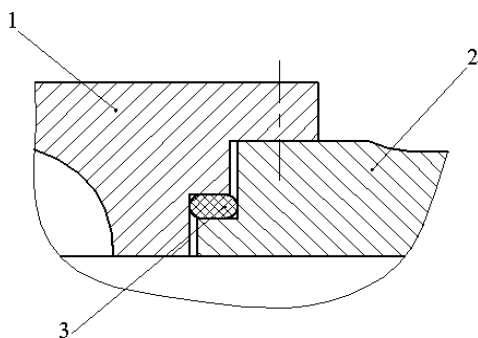


Рис. 2. Соединение крышки с корпусом:
1 – крышка; 2 – фланец корпуса;
3 – уплотнительный элемент (резиновое кольцо)

Таким образом, в герметизирующей оболочке РДГТ перенос влаги происходит за счет диффузионного проникновения водяных паров непосредственно через многослойную оболочку корпуса и уплотнительные элементы разъемных соединений крышки в сборе и сопла с корпусом.

Исходя из условий обеспечения работоспособности наполненного корпуса двигателя для исключения влияния влагообменных процессов на напряженно-деформированное состояние (НДС) заряда и на прочность скрепления его с корпусом разработчиками заряда устанавливаются требования к допустимому количеству влаги, накопленной на границе заряд – защитно-крепящий слой (ЗКС) в течение гарантийного срока эксплуатации корпуса. В соответствии с этим прогнозирование накопления влаги и подтверждение выполнения требований к влагопроницаемости узлов РДГТ проводится по разработанной на ГП «КБ «Южное» расчетно-экспериментальной методике оценки параметров тепло- и влагопереноса в многослойных оболочках из композиционных материалов при переменных температурно-влажностных

условиях окружающей среды [1]. Разработанная методика позволяет определить профили температуры и влагосодержания в материалах конструкции РДГТ путем решения краевой задачи нестационарного тепло- и влагопереноса в сложных конструкциях с цилиндрической симметрией в предположении одномерности указанных процессов, которая включает в себя две взаимосвязанные системы уравнений в частных производных [2]

$$\frac{\partial \mu_i(r, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r D_i(T_i, \mu_i) \frac{\partial \mu_i}{\partial r} \right], \quad (1)$$

$$(i = 1, 2 \dots N, \quad 0 < \tau < t);$$

$$c_i \rho_i \frac{\partial T_i(r, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \lambda_i(T_i, \mu_i) \frac{\partial T_i}{\partial r} \right], \quad (2)$$

$$(i = 1, 2 \dots N, \quad 0 < \tau < t)$$

с начальными данными

$$\mu_i(0, r) = \mu_{i0} = \text{const}; \quad (3)$$

$$T_i(0, r) = T_{i0} = \text{const}, \quad (4)$$

граничными условиями третьего рода на ограничивающих поверхностях

$$D_1 \frac{\partial \mu_1}{\partial r} = \beta_1 [\mu_{C_1} - \mu_1(\tau, R_0)]; \quad (5)$$

$$D_N \frac{\partial \mu_N}{\partial r} = \beta_N [\mu_{C_N} - \mu_N(\tau, R_N)]; \quad (6)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = \alpha_1 [T_{C_1} - T_1(\tau, R_0)]; \quad (7)$$

$$\lambda_N \frac{\partial T_N}{\partial r} = \alpha_N [T_{C_N} - T_N(\tau, R_N)]; \quad (8)$$

граничными условиями сопряжения на поверхностях контакта слоев

$$\mu_i(\tau, R_{i-0}) = \mu_{i+1}(\tau, R_{i+0}); \quad (9)$$

$$\xi_i \frac{\partial \mu_i(\tau, R_{i-0})}{\partial r} = \xi_{i+1} \frac{\partial \mu_{i+1}(\tau, R_{i+0})}{\partial r}; \quad (10)$$

$$T_i(\tau, R_{i-0}) = T_{i+1}(\tau, R_{i+0}); \quad (11)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_i(\tau, R_{i-0})}{\partial r} = \lambda_{i+1}(\tau, R_{i+0}) \frac{\partial T_{i+1}(\tau, R_{i+0})}{\partial r}, \quad (12)$$

где $\mu_i = RT_i \ln \varphi_i$ – потенциал влагопереноса;

R – универсальная газовая постоянная;

φ_i, T_i – относительная влажность и абсолютная температура материала i -того слоя;

c_i, ρ_i, λ_i – удельная теплоемкость, плотность и теплопроводность материала i -того слоя;

N – число слоев в оболочке;

$\xi_i = k_i \rho_i D_i$ – коэффициент влагопроводности i -го слоя;

D_i – коэффициент диффузии влаги i -того слоя;

α_1, α_N и β_1, β_N – коэффициенты теплоотдачи и массоотдачи соответственно.

Система нелинейных уравнений (1), (2) с приведенными краевыми условиями (3) – (12) решается численно методом конечных разностей [3], при известных коэффициентах $\lambda_i, \alpha_1, \alpha_N, \kappa_i, \zeta_i, D_i, \beta_1, \beta_N$ и при граничных условиях первого рода

$$\beta_N = \text{const};$$

$$\alpha_N = \text{const}.$$

Оценка погрешности определения влагосодержания проводится по результатам сравнительного анализа расчетных значений средней величины указанного параметра с экспериментальными значениями, полученными при заданных температурно-влажностных условиях окружающей среды на образцах из материалов оболочки и на образцах, имитирующих многослойную оболочку.

На рис. 3–5 представлены результаты расчетов средней величины влагосодержания $\bar{W}(\tau)$ и экспериментальные значения $W^{\text{э}}(\tau)$ для материалов двухслойной оболочки (органопластик, резина) и указанной оболочки в целом при постоянных по времени значениях температуры $T=288$ К и относительной влажности окружающей среды $\varphi = 40, 75$ и 100% соответственно.

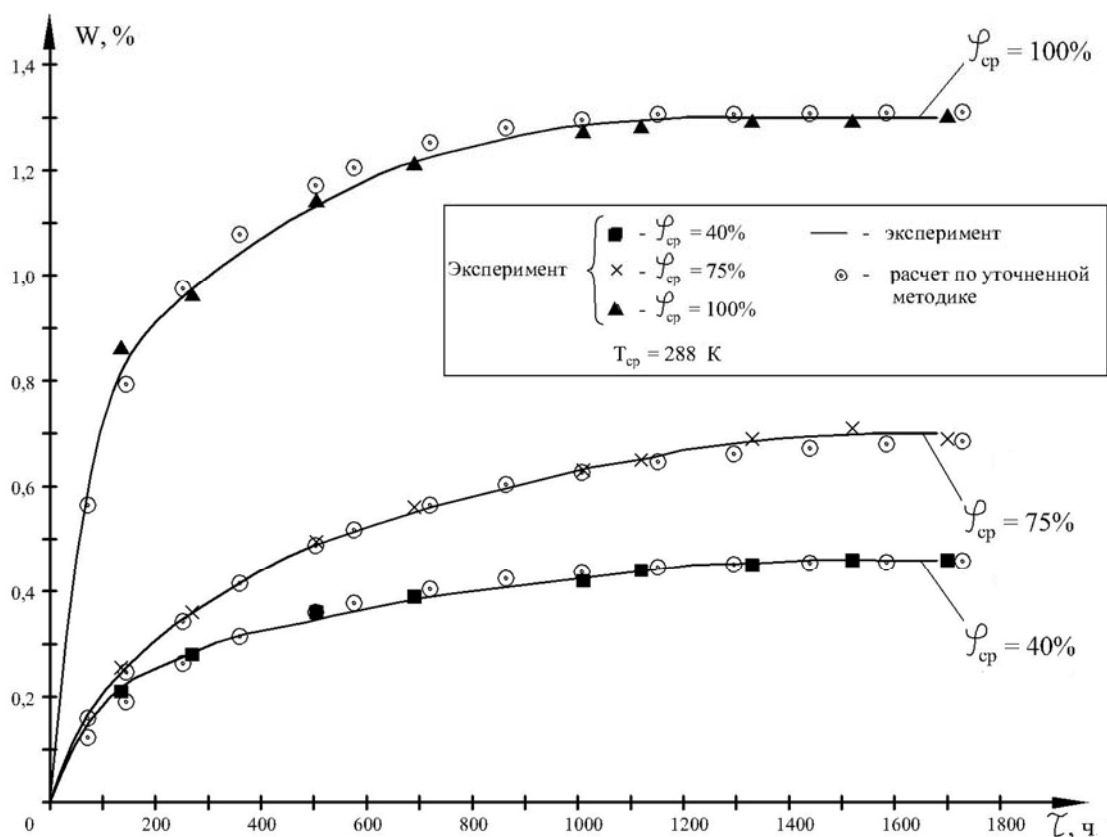


Рис. 3. Кинетика сорбции влаги и результаты расчета влагосодержания в резине

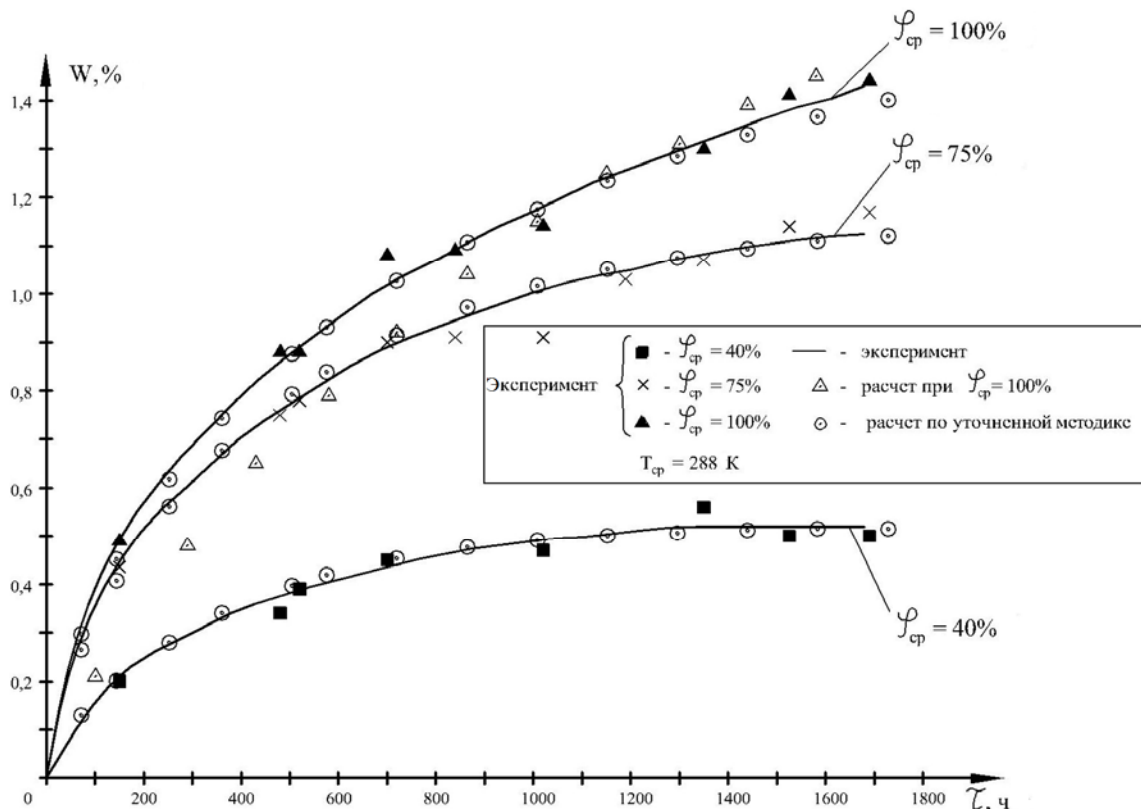


Рис. 4. Кинетика сорбции влаги и результаты расчета влагосодержания в органопластике

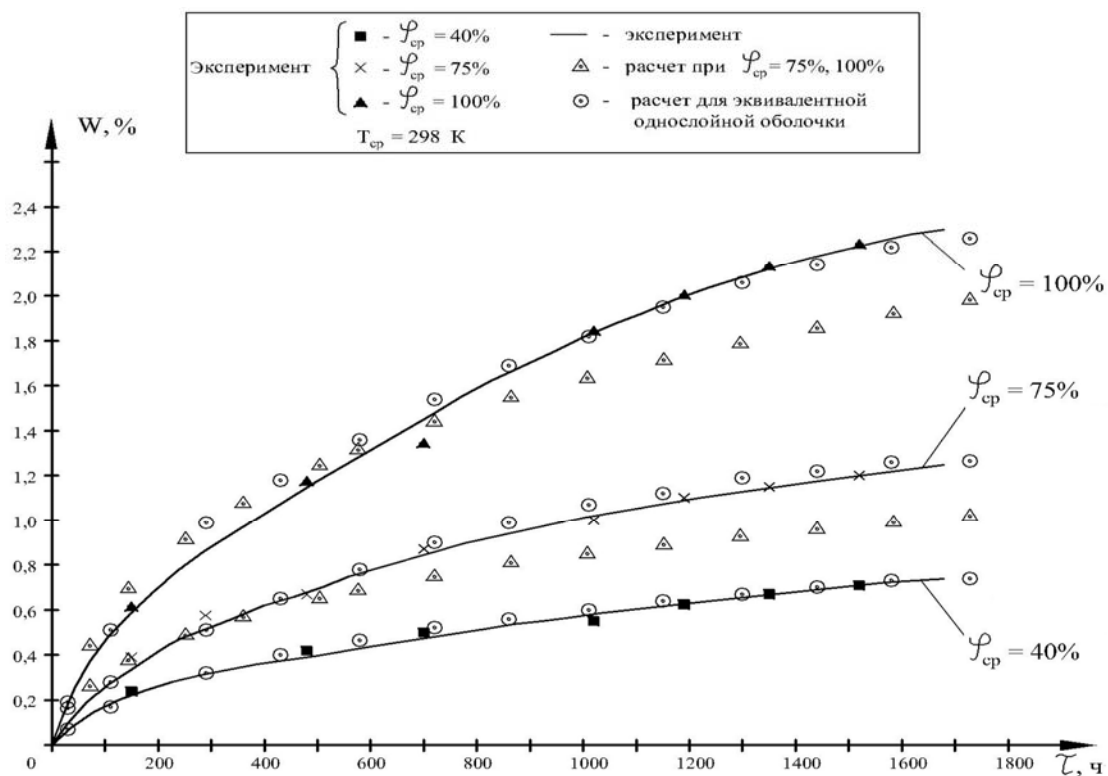


Рис. 5. Кинетика сорбции влаги и результаты расчета влагосодержания в двухслойной оболочке (органопластик и резина)

Результаты сравнительного анализа расчетных и экспериментальных значений свидетельствуют о том, что при указанных выше температурно-влажностных условиях

окружающей среды погрешность определения влагосодержания не превышает ~15%.

Проведение расчетов полей температуры и концентрации влаги по методике [1] в элементах конструкции узлов проектируемых РДТТ позволит конструктивными способами исключить влияние влагообменных процессов на элементы узлов, чувствительных к влаге, решением следующих задач:

– в расчетных сечениях по своду заряда определяется изменение влагосодержания на границе ЗКС – заряд в течение различных гарантийных сроков эксплуатации при переменных ТВР окружающей среды. Решение этой задачи позволит подтвердить выполнение требований к допустимому содержанию влаги, накопленной на границе ЗКС – заряд в течение гарантийного срока эксплуатации корпуса РДТТ. При невыполнении указанного требования защита заряда от воздействия окружающей среды обеспечивается конструктивными изменениями герметизирующей многослойной оболочки корпуса, например изменением толщин, количества слоев, характеристик влагопоглощения (коэффициенты диффузии, проницаемости, растворимости) оболочки и т.д.;

– определяются требования к ТВР окружающей среды при эксплуатации РДТТ в течение заданного времени их воздействия. Решение этой задачи позволит определить:

а) изменение времени натекания влаги на границе ЗКС – заряд при заданных различных значениях температуры и относительной влажности окружающей среды;

б) допустимые значения температуры и относительной влажности окружающей среды при заданном времени их воздействия на конструкцию РДТТ;

– оценивается влияние на изменение влагопроницаемости технологии и условий изготовления корпусов, структуры и свойств применяемых и перспективных композиционных материалов (КМ), теплозащитных материалов (ТЗМ) и влагозащитных покрытий;

– анализируются пути и направления совершенствования влагозащитных меропри-

ятий и влагопроницаемости материалов (пластик, ТЗМ).

При длительном хранении РДТТ используется непроницаемая герметизирующая металлическая оболочка (контейнер). Исключение влагообменных процессов окружающей среды с чувствительным к влаге элементом заряда при этом обеспечивается тем, что при длительном хранении значение относительной влажности воздуха в контейнере должно соответствовать исходному значению влажности заряда, например полученному после заполнения корпуса РДТТ. В этом случае для заданных значений ТВР внутри контейнера становится актуальной задача регулирования и поддержания на необходимом уровне в течение гарантийного срока хранения температуры и относительной влажности воздуха, контактирующего с узлами РДТТ.

В настоящее время применяют следующие способы регулирования влажности: статическое осушение, динамическое осушение, подогрев воздуха, автоматическое регулирование влажности [4].

Статическое осушение – это осушение воздуха в герметизированном объеме с помощью влагопоглотителей, размещенных внутри этих объемов. Конструктивно влагопоглотители выполняют в виде патронов, мешочков, матов, наполненных влагопоглощающим материалом. В качестве влагопоглотителя используют широко применяющийся силикагель, который, поглощая влагу, поддерживает в окружающей его среде относительную влажность не выше 55%. При использовании патронов поглощение влаги силикагелем из осушаемого объема происходит через перфорированную стенку (сетку), а при использовании мешочков – через стенку мешочка (материал стенки – хлопчатобумажная бязь, марля). При этом в зависимости от схемы размещения мешочка в осушаемом объеме (мешочек положен на бок или подвешен) изменяются условия его влагообмена с окружающим воздухом. Патрон и мешочек имеют общий функциональный признак: поглощение влаги происходит на границе в зоне контакта и затем за счет диффузии происходит ее перемещение внутрь. Это

позволяет принять для патронов и мешочка расчетные схемы процессов влагообмена, аналогичные схемам влагообмена неограниченной плоской влагопоглощающей глухой стенки с влажным воздухом, и определить требуемое количество силикагеля для осушения воздуха.

Динамическое осушение – это осушение воздуха в герметизированном объеме с помощью принудительной подачи в этот объем сухого воздуха по определенной схеме. Этот способ называется также способом продувки герметизированного объема сухим воздухом. При этом продувка может быть либо непрерывной с постоянным или переменным расходом сухого воздуха, либо периодической. Управляя длительностью и интенсивностью продувки, можно обеспечить поддержание заданного уровня относительной влажности воздуха в герметизированном объеме.

При подогреве воздуха его абсолютная влажность не изменяется, а относительная влажность уменьшается, в связи с чем подогрев воздуха используется как способ понижения его относительной влажности. Подача подогретого воздуха внутрь герметизированного объема дает возможность поддерживать на необходимом уровне относительную влажность воздуха, находящегося внутри объема, и может рассматри-

ваться как частный случай способа динамического осушения.

Таким образом, на основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что использование результатов решения задач по конструктивному обеспечению защиты узлов проектируемых РДТТ от воздействия влажного воздуха, а также применение способов статического и динамического осушения воздуха в контейнере, в котором хранится РДТТ, позволит исключить влияние влагообменных процессов на элементы узлов указанного изделия при эксплуатации его в неизотермических условиях в течение гарантийного срока.

Список использованной литературы

1. Изделие 15Е18 Методика оценки тепло- и влагопереноса в многослойных оболочках из композиционных материалов 15Е18 44.0296.557 ПМ. – ГKB «Южное», 1992.
2. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 536 с.
3. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1983. – 614 с.
4. Игумнов Н.И. Влагообмен в приборах и аппаратах. – М.: Машиностроение, 1989. – 136 с.

Статья поступила 24.10.2015