УДК 678.8:620.1

К.А. Колесник[1]

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛАГОНАСЫЩЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ В РЕАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-77-86

На основе законов Фика численно моделируется влагонасыщение полимерных композитов на протяжении срока службы самолета. Учитываются изменения температуры и влажности воздуха в реальных климатических условиях. Получено хорошее согласование расчетов и экспериментальных данных для влагонасыщения на протяжении одного года. Численно показано, что нагрев за счет солнечной радиации, а также эксплуатация значительно влияют на уровень влагонасыщения, однако влияние длительных внешних нагрузок оказалось незначительным.

Ключевые слова: *углепластики, климатические испытания, климатические условия, относительная влажность.*

The moisture saturation in polymer composites is numerically modelled using Fick's equations for the service life of an aircraft. Temperature changes and air humidity are taken into account in real climatic environmental conditions. It has been obtained good matching of calculations and experimental data for moisture saturation during the year. It is numerically shown that solar heating and exploitation greatly affect on the level of moisture. On the other hand, effect of prolonged external loads failed to be significant.

Keywords: *carbon fiber reinforced plastics, environmental testing, climatic conditions, relative humidity.*

[1]Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» [Federal state unitary enterprise «Central Aerohydrodynamic Institute named after N.E. Zhukovsky»]; e-mail: info@tsagi.ru

Введение

В настоящее время полимерные композиционные материалы (ПКМ) активно внедряют в высоконагруженные авиаконструкции. Благодаря широкой географии использования авиации, авиаконструкции подвергаются воздействию различных климатических факторов. Влагонасыщение конструкций из ПКМ зачастую приводит к деградации их прочностных характеристик. Поэтому возможность предсказания распределения влаги в конструкциях из ПКМ в процессе длительной эксплуатации является актуальной задачей. В процессе эксплуатации на влагонасыщение оказывают влияние переменные по времени температура, влажность воздуха, скорость ветра и интенсивность солнечной радиации. Вышеперечисленные климатические факторы имеют как суточную, так и сезонную периодичность, что необходимо принимать во внимание при прогнозировании влагонасыщения. Периодичность рейсов, отражающая способность поверхности и распределение нагрузок также оказывают влияние на влагонасыщение конструкций.

Методика расчета

Зачастую детали авиаконструкций из ПКМ представляют собой плоские пластины, поэтому влиянием потока влаги в плоскости листа можно пренебречь. Таким образом, для прогнозирования распределения влаги в конструкции определялось распределение влаги в плоских пластинах с толщинами, соответствующими толщинам конструктивных элементов. Для определения распределения влаги в пластинах использовали второй закон Фика для одномерного случая:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}. \qquad (1)$$

Моделирование диффузионных процессов выполняли для одномерной задачи с использованием разработанной компьютерной программы расчета влагонасыщения. Моделирование проводили пошаговым решением системы уравнений, полученных в результате применения неявной разностной схемы к уравнению (1). Использовали расчетную сетку, которая сгущается у поверхности листа, для описания суточных и сезонных колебаний концентрации влаги в поверхностных слоях материала. В процессе расчета предполагалось, что обе поверхности листа композиционного материала контактируют с атмосферой, потому что зачастую авиаконструкции содержат технологические отверстия для сообщения внутренних объемов с атмосферой. В случае использования кессона крыла и центроплана в качестве топливных баков, они также сообщаются с атмосферой для поддержания несколько повышенного давления, необходимого для функционирования топливной системы [1]. В результате при проведении расчетов

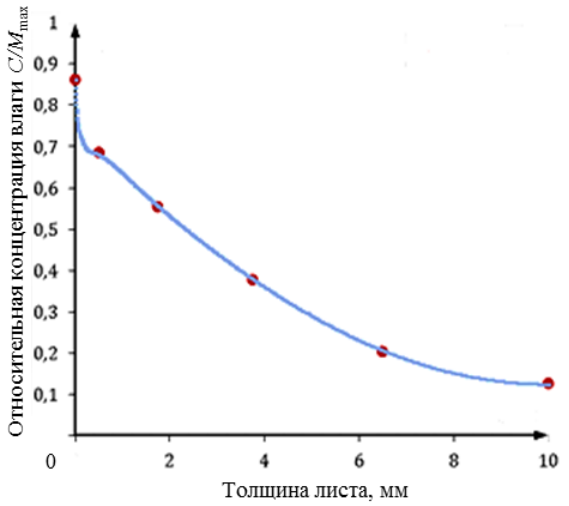

Рис. 1. Распределение концентрации влаги, полученное с использованием 5 (●) и 500 (—) расчетных узлов

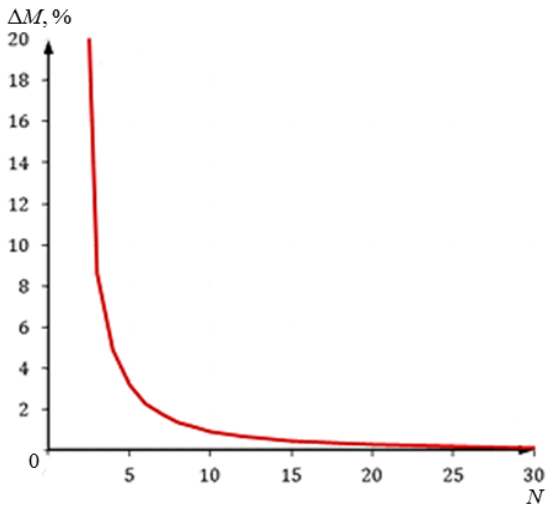

Рис. 2. Зависимость отклонения приращения массы пластины (ΔM) от количества расчетных узлов (N)

Таблица 1

Исследованные климатические зоны

Местоположение	Климат
Порт-Харкорт (Нигерия)	Тропический муссонный
Гуам	Тропический муссонный
Сингапур	Экваториальный
Мухаррак (Бахрейн)	Аридный (климат пустынь)
Сочи	Влажный субтропический
Вудбридж (Англия)	Влажный континентальный
Шлезвиг-Гольштейн (Германия)	Морской
Владивосток	Муссонный
Москва	Умеренно континентальный
Магадан	Субарктический морской

предполагалось, что влагонасыщение протекает симметрично относительно срединной плоскости листа.

Для подтверждения сходимости численного метода расчета проведены вычисления с использованием расчетных сеток, содержащих различное количество N узлов. Вычисления проводили для влагонасыщения ПКМ в виде листа толщиной 10 мм, экспонируемого в условиях климата г. Сочи в течение 15 лет. Одна из поверхностей листа материала предполагалась изолированной, что равноценно влагонасыщению листа вдвое большей толщины с неизолированными поверхностями. На рис. 1 представлено распределение концентрации влаги по толщине листа, полученное с использованием 5 и 500 расчетных узлов. Видно, что в узловых точках решения хорошо согласуются. На рис. 2 представлена зависимость отклонения приращения массы пластины ΔM=100%(M_N-M_{500})/M_{500} с использованием N расчетных узлов от решения, полученного с использованием 500 расчетных узлов. Так, при использовании 20 расчетных узлов отклонение составляет 0,3%, что является приемлемым для дальнейших расчетов.

На влагонасыщение конструкций оказывают влияние различные климатические факторы, такие как температура и влажность окружающего воздуха, скорость ветра и интенсивность солнечной радиации. В данной работе проведено моделирование диффузионных процессов в различных климатических зонах с использованием метеорологических данных, собранных как на территории РФ [2], так и за ее пределами [3]. В табл. 1 перечислены исследованные климатические зоны.

При расчетах использовались следующие предположения:

– метеопараметры остаются постоянными между измерениями, т. е. в течение каждого трехчасового участка;

– в тонком поверхностном слое мгновенно устанавливается концентрация влаги, соответствующая текущим метеопараметрам;

– диффузионные процессы подчиняются второму закону Фика, потому что в процессе многолетних исследований признаков аномальной диффузии выявлено не было;

– внутри листа отсутствует градиент температуры, т. е. при переходе к следующему участку с

Таблица 2

Диффузионные свойства материала марки CYCOM

D_0, мм^2/с	E_a, кДж/моль	M_{max}	b
18,5	48,1	0,012	1

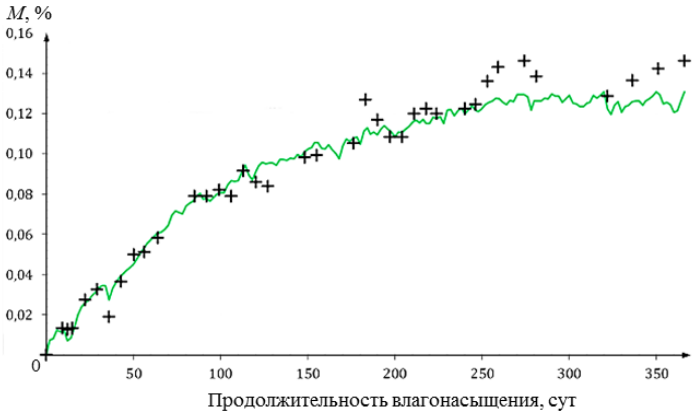

Рис. 3. Сопоставление экспериментального влагонасыщения образца (+) и результатов численного моделирования (—)

постоянными метеопараметрами температура устанавливается мгновенно.

Для доказательства справедливости последнего утверждения проведены дополнительные исследования. На основе рассматриваемых метеоданных максимальный зафиксированный перепад температуры при переходе от одного участка с постоянными метеопараметрами к другому составил 16°С. Для оценочных расчетов коэффициент температуропроводности k_z в направлении, перпендикулярном плоскости листа, приняли равным 0,4 мм^2/с [4]. Считали, что температура выровнялась, когда различия температуры не превышали 16°С, тогда время для выравнивания температуры для листа толщиной 20 мм составляет 5 мин. Следовательно, для листов с толщинами до 20 мм можно считать, что температура устанавливается мгновенно.

Метеорологические данные использовали для моделирования диффузионных процессов в течение 30 лет в листах различной толщины из углепластика на основе связующего марки CYCOM 977-2 и наполнителя марки TENAX® IMS. В процессе моделирования диффузионных процессов считалось, что коэффициент диффузии не зависит от влажности окружающего воздуха, а зависит только от температуры материала. В соответствии с законом Аррениуса температурная зависимость коэффициента диффузии D выражается уравнением [5]:

$$D(T) = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \qquad (2)$$

где D_0 – константа для материала; E_a – энергия активации диффузии; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура.

Предельное влагосодержание или влагоемкость отражает установившуюся концентрацию влаги в материале при постоянных внешних условиях, таких как влажность и температура воздуха. В соответствии с работой [5] влагоемкость материала имеет степенную зависимость от влажности окружающего воздуха (RH, %) и не зависит от температуры:

$$M_0 = M_{max}\left(\frac{RH}{100\%}\right)^b, \qquad (3)$$

где M_{max} – предельная влагоемкость при RH=100%; b – экспериментальная константа.

В табл. 2 представлены диффузионные параметры исследуемого материала, которые получены в результате экспериментальных исследований по методике, описанной в работе [6].

Влагонасыщение конструкций в тени

Базовым случаем влагонасыщения является влагонасыщение конструкций в тени. В этом случае на поверхность конструкции не воздействует солнечное излучение и температура поверхности обшивки равна температуре окружающего воздуха. Такой случай реализуется при хранении авиационной техники в проветриваемом ангаре.

С целью верификации описанных подходов к прогнозированию влагонасыщения сопоставили результаты влагонасыщения образца и результаты численного моделирования. Образец из углепластика толщиной 6,7 мм на основе связующего марки CYCOM 977-2 и наполнителя марки TENAX ® IMS экспонировали под навесом в г. Сочи. На рис. 3 представлено экспериментальное приращение массы на протяжении одного года. Численное моделирование проводили с

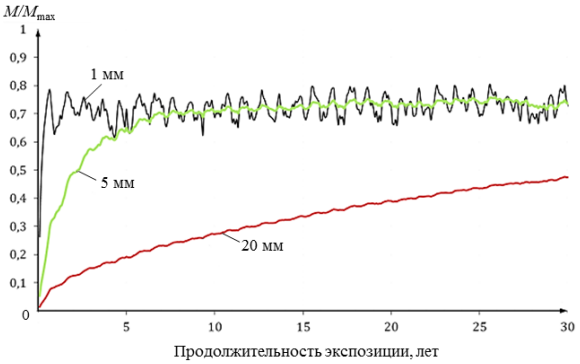

Рис. 4. Колебания влагосодержания в листах различной толщины при экспозиции во влажном субтропическом климате (г. Сочи)

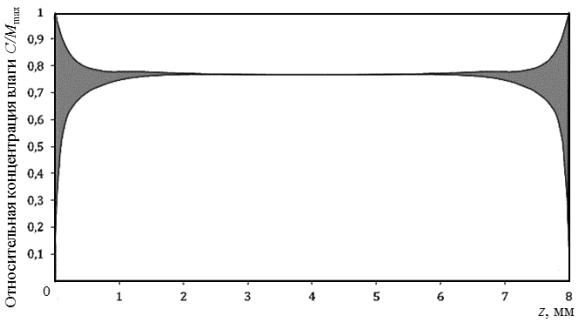

Рис. 5. Колебания влагосодержания в листе из углепластика на протяжении года (z – ось, перпендикулярная плоскости листа)

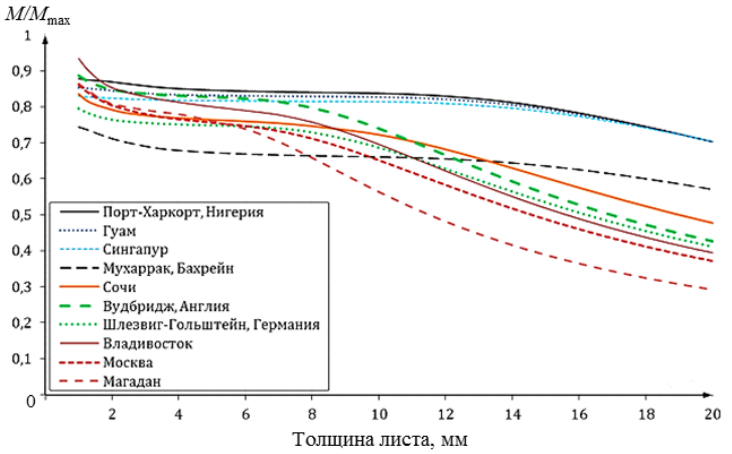

Рис. 6. Максимальная относительная масса поглощенной влаги M/M_{max} в зависимости от толщины листа для различных климатических зон

использованием климатических метеопараметров, зарегистрированных в непосредственной близости от образца. Видно (рис. 3), что спрогнозированная сорбционная кривая хорошо согласуется с экспериментальными точками.

Для прогнозирования суточных и сезонных колебаний влаги проведены расчеты для листов различной толщины. На рис. 4 представлено изменение относительного влагосодержания на протяжении 30 лет экспозиции во влажном субтропическом климате (г. Сочи). Колебания влагосодержания в тонком листе имеют значительную амплитуду по сравнению с более толстым листом, поэтому влагосодержание тонких листов достигает бóльших значений. На рис. 5 представлен диапазон значений относительной концентрации влаги на протяжении одного года после завершения влагонасыщения. Результаты характеризуют колебания влаги в листе из углепластика толщиной 8 мм после 30 лет экспозиции в условиях муссонного климата (г. Владивосток). Видно, что значительным изменениям подвержена концентрация влаги лишь в поверхностном слое толщиной 1 мм.

Зависимости максимальной относительной массы влаги, достигаемой (поглощенной) на протяжении 30 лет экспозиции, от толщины экспонируемого листа представлены на рис. 6 для различных климатических зон. Результаты расчетов показали, максимальное влагопоглощение достигается при экспозиции в Порт-Харкорт (Нигерия) почти для всего диапазона толщин конструктивных элементов. При этом для листов в диапазоне толщин от 3 до 10 мм наблюдается максимальное влагонасыщение на уровне 85% от M_{max}, что соответствует влажности воздуха RH=85% при проведении ускоренного лабораторного влагонасыщения. Необходимо отметить, что именно такая влажность воздуха зачастую используется при проведении климатико-прочностных испытаний. Для листов толщиной >15 мм максимальное влагопоглощение значительно ниже 85%, что свидетельствует о возможных резервах при прогнозировании влияния климатических факторов на длительную эксплуатацию таких конструктивных элементов. По этой причине толщина элементов конструкции играет важную роль при определении равновесного значения влаги в процессе эксплуатации.

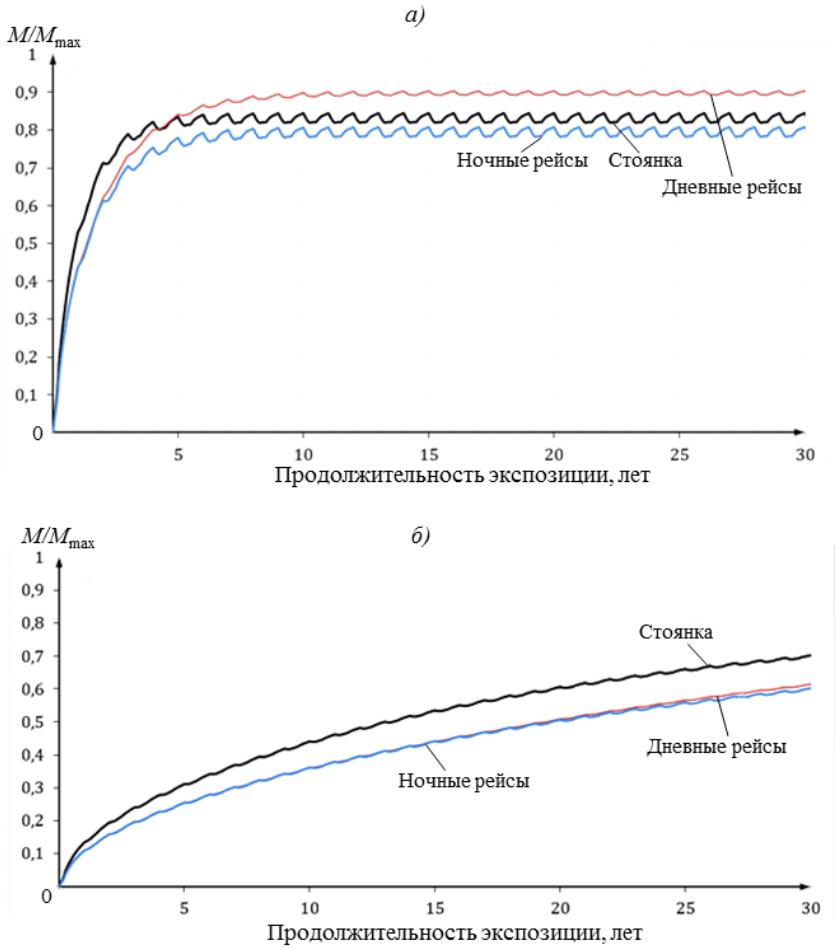

Рис. 7. Влияние эксплуатации авиационной техники на кинетику сорбции пластин толщиной 5 (*а*) и 20 мм (*б*)

Влияние эксплуатации

Для прогнозирования влагонасыщения авиаконструкций в процессе интенсивной эксплуатации вначале необходимо определить типовые рейсы при полете самолетов. По данным работы [7], в среднем воздушное судно проводит в воздухе от 8 до 12 ч при интенсивной эксплуатации. Примем для определенности два типовых вида эксплуатации: ежедневные восьмичасовые рейсы в дневное (10:00–18:00) и ночное время суток (22:00–6:00). Бóльшая часть полета проходит на крейсерской высоте ~10 км. В соответствии со стандартной атмосферой температура на высоте 10 км составляет -50°С, а влажность воздуха [8, 9] равна 36%. Представленные параметры полагали независящими от климатической зоны и времени дня и года. Считалось, что время набора высоты, а также снижения, составляет незначительную часть длительности рейсов, поэтому указанные климатические параметры применялись для всей длительности полета. Как было показано ранее, максимальное влагопоглощение достигается при наземной экспозиции в Порт-Харкорт (Нигерия), поэтому при исследовании вклада эксплуатации использовали климатические параметры данного региона для моделирования влагопоглощения во время стоянки. Для упрощения ввели предположение, что точки отправления и назначения лежат в одном часовом поясе.

Расчеты влагонасыщения проводили для пластин толщиной 5 и 20 мм, результаты расчетов представлены на рис. 7, *а* и *б* соответственно. Низкая температура окружающего воздуха на крейсерской высоте (-50°С) приводит к охлаждению конструкции и, как следствие, диффузионные процессы существенно замедляются. Поэтому непосредственно в процессе выполнения авиарейсов влагосодержание материала конструкции существенно не изменяется. Для пластин толщиной 5 мм в случае дневных рейсов наблюдается повышение уровня влагосодержания за счет влажности воздуха выше среднесуточной в ночные часы стоянки. В свою очередь ночные рейсы приводят к снижению уровня максимального влагонасыщения по причине низкой влажности воздуха при стоянке в дневное время суток. Практическое совпадение диффузионных кривых для случаев дневной и ночной эксплуатации для пластин толщиной 20 мм продемонстрировано на рис. 7, *б*. С одной стороны, во время ночной стоянки

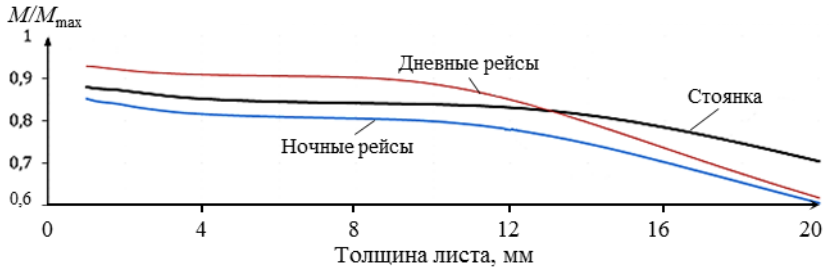

Рис. 8. Зависимости максимального влагопоглощения пластин от их толщины для случаев дневной и ночной эксплуатации авиационной техники

влажность воздуха выше, чем влажность воздуха при дневной стоянке, но с другой – в дневное время выше температура, что приводит к ускорению влагонасыщения. В результате конкурирующие процессы приводят к идентичным результатам. Практические исследования под руководством NASA [10] показали, что при наземной экспозиции наблюдается бóльшее влагопоглощение по сравнению с влагопоглощением образцов, размещенных на эксплуатируемом гражданском самолете.

На рис. 8 представлены зависимости максимального влагопоглощения пластин от их толщины для случаев дневной и ночной эксплуатации авиационной техники. Видно, что ежедневные дневные рейсы приводят к существенному повышению уровня максимального влагопоглощения для пластин, толщина которых не превышает 13 мм.

Нагрев конструкции

Вышеперечисленные результаты получены при условии, что температура конструкции (T_s, К) совпадает с температурой окружающего воздуха (T, К). Обычно авиационные конструкции во время эксплуатации испытывают воздействие солнечного излучения, из-за которого происходит ее нагрев и, как следствие, нагрев воздуха, контактирующего с поверхностью. Увеличение температуры конструкции влечет за собой как ускорение протекания диффузионных процессов, так и снижение значения относительной влажности воздуха (RH_s), контактирующего с нагретой поверхностью.

Для определения значения температуры конструкции, в случае термодинамического равновесия, запишем уравнение энергетического баланса:

$$q_{ab}-q_e-q_c=0, \quad (4)$$

где q_{ab} – поглощенная солнечная энергия; q_e – потери энергии за счет излучения; q_c – конвективные потери энергии.

Поглощенная солнечная энергия зависит от плотности потока солнечной энергии W на поверхности конструкции:

$$q_{ab}=\alpha W, \quad (5)$$

где α – коэффициент поглощения, равный 0,2 – для белых покрытий и 0,9 – для черных [11].

При этом плотность потока солнечной энергии определяется географическим положением, временем года и суток, прозрачностью атмосферы и наклоном поверхности [12]. Потери энергии за счет излучения определяются законом Стефана–Больцмана:

$$q_e=\varepsilon\sigma(T_s^4-T^4), \quad (6)$$

где ε – степень черноты тела, имеющая значение 0,9 для авиационных покрытий [11]; $\sigma=5{,}67\cdot10^{-8}$ Вт/(м$^{-2}\cdot$К$^{-4}$) – постоянная Стефана-Больцмана.

Для описания конвективного теплообмена применили закон Ньютона–Рихмана:

$$q_c=h(T_s-T), \quad (7)$$

где h – коэффициент теплоотдачи, который зависит от скорости ветра V [13]: $h=10{,}2V+3{,}6$, Вт/(м$^2\cdot$К).

Температура воздуха, контактирующего с поверхностью, предполагается равной температуре поверхности. Для вычисления относительной влажности контактирующего с поверхностью воздуха (RH_s) использовано приближенное выражение [14]:

$$RH_s=RH\left(\frac{-240{,}7-0{,}18T_s+1{,}8T}{-240{,}7+1{,}62T_s}\right)^8. \quad (8)$$

Для оценки влияния нагрева конструкции за счет солнечной радиации использованы метеорологические данные по уровню солнечной радиации [12] и скорости ветра [15] для Порт-Харкорт (Нигерия). Как показали расчеты, черное покрытие приводит к значительному нагреву конструкции и составляет 30–40°С в полдень, в то же время нагрев конструкции с белым покрытием составляет 7–10°С в полдень. Результаты расчетов суточного изменения параметров (для декабря) представлены на рис. 9: зависимость температуры

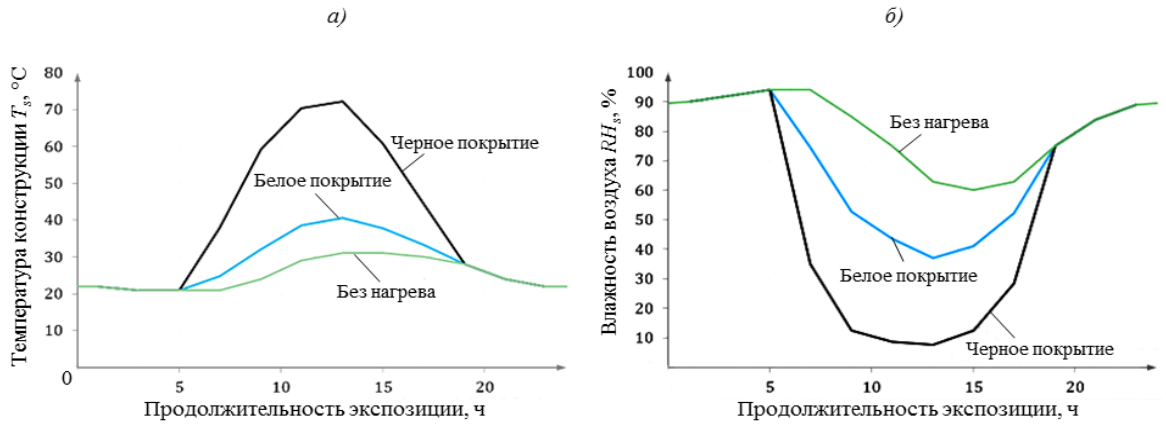

Рис. 9. Зависимости температуры поверхности (*а*) и влажности воздуха, контактирующего с нагретой поверхностью (*б*), от времени суток для различных покрытий

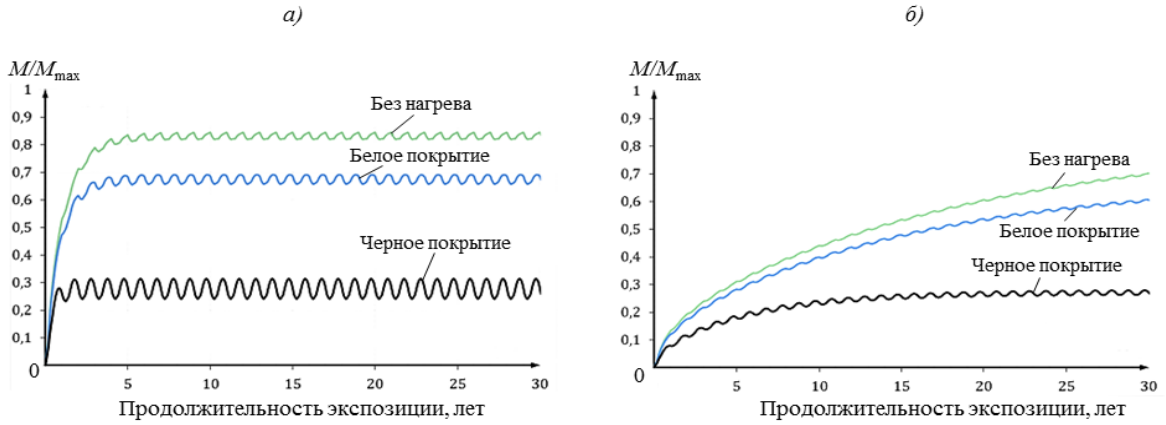

Рис. 10. Влияние нагрева на кинетику сорбции пластин толщиной 5 (*а*) и 20 мм (*б*)

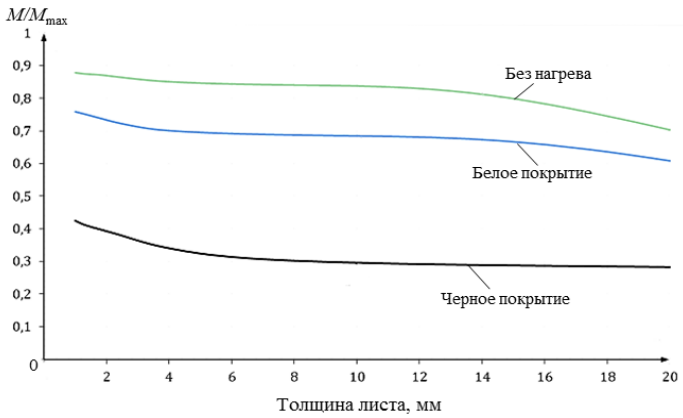

Рис. 11. Зависимости максимального влагопоглощения пластин от их толщины с учетом нагрева за счет солнечной радиации

поверхности T_s от времени суток (рис. 9, *а*) и изменение относительной влажности воздуха (RH_s), контактирующего с нагретой поверхностью (рис. 9, *б*). Нагрев конструкции и, как следствие, прилегающего к поверхности конструкции слоя атмосферного воздуха приводит к снижению влажности воздуха, непосредственно контактирующего с материалом, по сравнению с влажностью окружающего воздуха по уравнению (8). Получаем, что в случае нагрева влажность воздуха, контактирующего с нагретой поверхностью (RH_s), значительно ниже, чем в случае без нагрева конструкции, что приводит к интенсивной сушке материала.

Расчеты влагонасыщения проведены для пластин толщиной 5 и 20 мм, результаты расчетов представлены на рис. 10, *а* и *б* соответственно. Уровень влагонасыщения пластин толщиной 5 мм снижается для белого покрытия на 19%, а для черного покрытия – на 69% (по сравнению со случаем отсутствия нагрева). На рис. 11 приведены

Таблица 3

Характеристики жесткости монослоев материала CYCOM [17]

E_{11+}, ГПа	E_{22+}, ГПа	G_{12}, ГПа	ν_{12}	δ, мм	γ, г/см^3
164,83	8,05	4,37	0,32	0,197	1,58

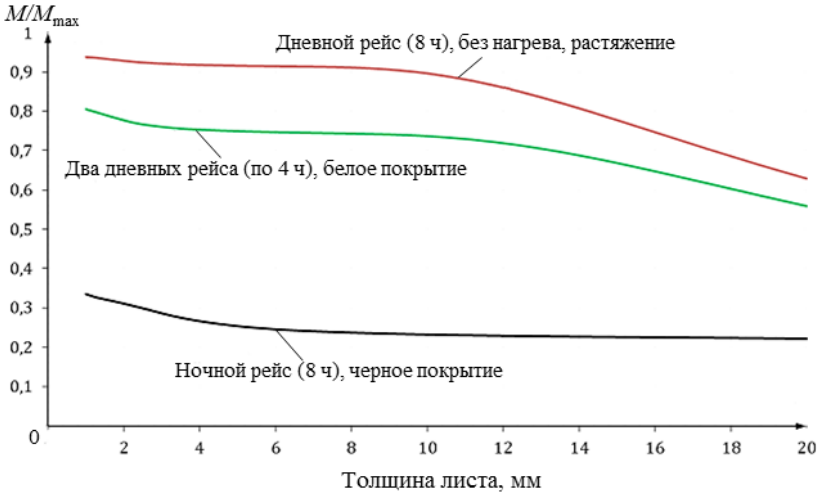

Рис. 12. Совместное влияние различных факторов на уровень влагонасыщения, достигаемый в процессе эксплуатации авиационной техники

зависимости максимального влагопоглощения пластин от их толщины для различных случаев нагрева. Необходимо отметить, что во время полета самолета нагрев за счет солнечной радиации незначителен благодаря значительному конвективному теплообмену. В результате цвет покрытия играет ключевую роль в уровне влагонасыщения при хранении незатененных конструкций. Практические исследования [16] подтвердили, что при натурной экспозиции уровень влагопоглощения образцов под навесом выше уровня влагопоглощения незатененных образцов, подверженных нагреву за счет солнечной радиации.

Учет деформаций конструкции

Наибольшее влияние климатических факторов наблюдается во время наземной стоянки. Нагрузки в панелях крыла во время стоянки зависят от конструктивно-силовой схемы крыла, расположения опор шасси, расположения двигателей и других факторов. Определение критических зон в конструкции, как и нагрузок во время стоянки, является сложной задачей и выходит за рамки данной работы. Для определенности будем считать, что максимальные напряжения в растянутых зонах составляют 50 МПа. В табл. 3 приведены механические характеристики монослоя материала марки CYCOM [17], такие как продольный и поперченный модули упругости (E_{11+}, E_{22+}) в случае растяжения, модуль сдвига (G), коэффициент Пуассона (ν), толщина (δ) и плотность монослоя (γ).

Расчет влияния нагрузки на диффузионные свойства проведен для пакета материала с укладкой $\{-45/0/45/0/0/90/0/0/45/0/-45\}_3$. В процессе расчетов параметров жесткости пакета материала использованы параметры монослоя, представленные в табл. 3. При проведении расчетов использовались соотношения, подробно описанные в литературе [18–20], связывающие диффузионные параметры со значениями механических деформаций. Как показали расчеты, растягивающие напряжения 50 МПа вызывают повышение коэффициента диффузии на 1%, а также влагоемкости – на 0,5%. Вышеописанные растягивающие нагрузки во время стоянки могут наблюдаться в верхних панелях крыла, расположенных за стойками основных опор шасси. Нижние панели крыла во время стоянки испытывают сжимающие нагрузки, что может приводить к обратному эффекту – к понижению значений влагоемкости и коэффициентов диффузии. Зачастую во время стоянки напряжения значительно ниже использованных в данном расчете, поэтому влияние нагрузок на влагонасыщение будем считать незначительным.

Синергетический эффект

Ранее в статье рассмотрены по отдельности факторы, влияющие на влагонасыщение, в этом разделе описано их совместное влияние. На рис. 12 представлены зависимости максимального влагопоглощения пластин от их толщин при совместном влиянии различных факторов на процесс

влагонасыщения. Определим факторы, приводящие к наибольшему влагопоглощению. Как отмечалось ранее, эксплуатация в дневное и стоянка в ночное время суток приводят к росту максимального влагопоглощения конструкций из ПКМ. Помимо этого, растягивающие нагрузки также увеличивают уровень влагопоглощения. Верхняя кривая (рис. 12) иллюстрирует зависимость при совместном влиянии вышеперечисленных факторов. Нагрев конструкции с черным покрытием в дневное время суток в сочетании с ночными рейсами приводит к значительному снижению влагопоглощения, что проиллюстрировано нижней кривой на рис. 12. Как показали исследования спутниковых фотографий аэропортов мира, в подавляющем большинстве случаев горизонтальные поверхности самолетов окрашены белым или светло-серым покрытием. Поэтому для сравнения на рис. 12 представлена кривая влагонасыщения для двух четырехчасовых ежедневных рейсов (10:00–14:00 и 18:00–22:00) при использовании белого покрытия. В результате уровень влагонасыщения конструкций находится в достаточно широком диапазоне значений.

На протяжении срока службы самолета условия эксплуатации могут значительно изменяться. Может изменяться как расписание рейсов, так и климатическая зона эксплуатации. Цвет покрытия самолета также может быть изменен. Крайне маловероятно, что самолет будет непрерывно эксплуатироваться в неблагоприятных климатических условиях на протяжении всего срока службы. В результате необходим вероятностный подход к определению уровня влагонасыщения при эксплуатации авиационной техники для определения влияния влаги на конструкцию. В данной работе не затрагиваются вопросы, связанные с изменением климата. Анализ метеоданных показал незначительное изменение среднегодовой температуры и влажности воздуха на протяжении 30 лет наблюдений, поэтому метеоданные использованы для прогнозирования климатического влияния в будущем.

Заключения

– Результаты численного моделирования диффузионных процессов с использованием закона Фика хорошо согласуются с результатами влагонасыщения в условиях влажного субтропического климата (г. Сочи).

– Среди рассмотренных случаев максимальное влагопоглощение достигается при экспозиции в Порт-Харкорт (Нигерия), причем для листов в диапазоне толщин от 3 до 10 мм наблюдается максимальное влагонасыщение на уровне 85% от M_{max}.

– При влагонасыщении тонких пластин эксплуатация может приводить как к повышению, так и понижению уровня предельного влагонасыщения. В случае влагонасыщения толстых пластин эксплуатация снижает этот уровень.

– Нагрев конструкций в дневное время суток за счет солнечного излучения приводит к значительному снижению влажности воздуха, контактирующего с нагретой поверхностью. В результате материал подвергается сушке, что приводит к снижению уровня влагонасыщения.

– Анализ, проведенный автором, показал, что диффузионные процессы могут подвергаться влиянию эксплуатационных нагрузок. Так, растягивающие напряжения 50 МПа вызывают повышение коэффициента диффузии на 1%, а также влагоемкости – на 0,5%.

– Одновременное влияние вышеперечисленных факторов может как повысить, так и понизить уровень влагонасыщения конструкции, поэтому этот уровень может находиться в достаточно широком диапазоне.

ЛИТЕРАТУРА

1. Langton R., Clark C., Hewitt M., Richards L. Aircraft fuel systems. John Wiley & Sons, 2009. 345 p.
2. Веселов В.М., Прибыльская И.Р. Специализированные массивы данных для климатических исследований // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2014. Вып. 177. URL: http://meteo.ru/125-trudy-vniigmi/trudy-vniigmi-mtsd-vypusk-177-2014-g/518-spetsializirovannye-massivy-dannykh-dlya-klimaticheskikh-issledovanij (дата обращения: 07.07.2017).
3. Collings T.A. The effect of observed climatic conditions on the moisture equilibrium level of fibre-reinforced plastics // Composites. 1986. Vol. 17. No. 1. P. 33–41.
4. Salazar A., Sanchez-Lavega A. Measurements of the Thermal Diffusivity Tensor of Polymer–Carbon Fiber Composites by Photothermal Methods // International Journal of Thermophysics. 1998. Vol. 19. No. 2. P. 625–636.
5. Vodicka R. Accelerated environmental testing of composite materials. Defence Science and Technology Organisation Canberra, 1998. No. DSTO-TR-0657. 50 p.
6. Колесник К.А. Кромочный эффект при экспериментальном определении диффузионных характеристик полимерных композиционных материалов // Машиностроение и инженерное образование. 2016. №3. С. 24–28.
7. Клочков В.В., Гусманов Т.М. Проблемы прогнозирования спроса на перспективные гражданские самолеты российского производства // Проблемы прогнозирования. 2007. №2. С. 16–31.
8. Nash J. Measurement of upper-air pressure, temperature and humidity: Instruments and Observing Methods Report No. 121. Geneva: World Meteorological Organization, 2015. 87 p.
9. Tenney D.R., Unnam J. Analytical prediction of

moisture absorption in composites // Journal of Aircraft. 1978. Vol. 15. No. 3. P. 148–154.
10. Dexter H.B., Baker D.J. Flight service environmental effects on composite materials and structures // Advanced Performance Materials. 1994. Vol. 1. No. 1. P. 51–85.
11. Petersen D., Rolfes R., Zimmermann R. Thermomechanical design aspects for primary composite structures of large transport aircraft // Aerospace Science and Technology. 2001. Vol. 5. Is. 2. P. 135–146.
12. Priye K.A., Tarilanyo J.A. Estimation of hourly solar radiation on an incline south facing surface in Port Harcourt city, Nigeria // International Journal of Scientific & Engineering Research. 2012. Vol. 3. Is. 12.
13. Henninger R.H. NASA's Energy-Cost Analysis Program // Part II-Engineering Manual, Report No. NASA CR-2590. 1975.
14. Bosen J.F. An Approximation Formula to Compute Relative Humidity from Dry Bulb and Dew Point Temperatures // Monthly Weather Review. 1958. Vol. 86. 486 p.
15. Fagbenle R.L., Karayiannis T.G. On the wind energy resource of Nigeria // International Journal of Energy Research. 1994. Vol. 18. P. 493–508.
16. Vodicka R. Environmental exposure of boron-epoxy composite material. Aeronautical and Maritime Research Lab. Melbourn, Australia. 2000. Report No. DSTO-TN-0309.
17. Гришин В.И., Дзюба А.С., Дударьков Ю.И. Прочность и устойчивость элементов и соединений авиационных конструкций из композитов. М.: Изд-во физ.-мат. лит-ры, 2013. 272 с.
18. Youssef G., Fréour S., Jacquemin F. Stress-dependent moisture diffusion in composite materials // Journal of Composite Materials. 2009. Vol. 43. No. 15. DOI: 10.1177/0021998309339222.
19. Neumann S., Marom G. Free-volume dependent moisture diffusion under stress in composite materials // Journal of Materials Science. 1986. Vol. 21. P. 26–30.
20. Neumann S., Marom G. Prediction of moisture diffusion parameters in composite materials under stress // Journal of Composite Materials. 1987. Vol. 21. P. 13. DOI: 10.1177/002199838702100105.