

**Моделирование влагонасыщения авиаконструкций в различных климатических зонах.**

К.А. Колесник

Московский физико-технический институт (государственный университет),

Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского

**Введение.**

В процессе эксплуатации авиаконструкции находятся в атмосфере с переменной температурой и влажностью воздуха. Причём эти изменения могут иметь как суточную периодичность, так и сезонную. Важной задачей является определение распределения влаги в конструкции в процессе длительной эксплуатации. В настоящее время при проведении ускоренного влагонасыщения авиаконструкций поддерживается относительная влажность воздуха  $RH=85\%$ . Решение поставленной задачи позволит скорректировать программу ускоренных климатических испытаний и выявить возможные резервы при применении конструкций с большим поперечным сечением конструктивных элементов. В настоящей работе общая продолжительность эксплуатации авиаконструкций была принята равной 30 годам. В результате, целью данной работы было определение эквивалентной влажности воздуха, при которой при экспозиции в постоянных условиях будет достигнуто равноценное влагосодержание во внутренних слоях материала.

**Постановка задачи.**

Как показали исследования [1], при натурной экспозиции образцов уровень влагопоглощения образцов под навесом выше уровня влагопоглощения незатенённых образцов, подверженных нагреву за счёт солнечной радиации. Исследования под руководством NASA [2] показали, что при наземной экспозиции наблюдается большее влагопоглощение по сравнению с влагопоглощением образцов размещённых на эксплуатируемом гражданском самолёте. Также в этой работе показано, что наблюдается хорошая корреляция между механическими свойствами образцов после наземной экспозиции и экспозиции на борту самолёта. Поэтому, при определении максимального уровня влагонасыщения материала, будем считать, что самолёт находится на наземном хранении и на материал воздействуют климатические факторы присущие выбранной климатической зоне, такие как влажность и температура воздуха в тени.

В данной работе для определения эквивалентной влажности воздуха в различных климатических зонах были использованы метеорологические данные 4 различных точек на территории РФ [3], а также 6 точек за пределами РФ [4], которые перечислены в таблице 1.

Таблица 1 – исследованные климатические зоны

№	Точка	Климат
1	Порт-Харкорт, Нигерия	тропический муссонный
2	Гуам	тропический муссонный
3	Сингапур	экваториальный
4	Мухаррак, Бахрейн	аридный
5	Сочи	влажный субтропический климат
6	Вудбридж, Англия	влажный континентальный
7	Шлезвиг-Гольштейн, Германия	морской
8	Владивосток	муссонный климат
9	Москва	умеренно-континентальный климат
10	Магадан	субарктический морской климат

Метеорологические данные содержали измерения влажности и температуры воздуха в тени с периодичностью 3 часа в течение 30 лет с 1985 по 2015 гг. При расчётах использовались следующие предположения:

- метеопараметры остаются постоянными между измерениями, т.е. на протяжении каждого 3х часового участка;
- в тонком поверхностном слое мгновенно устанавливается концентрация влаги,

- соответствующая текущим метеопараметрам;
- температура поверхности материала равна температуре окружающего воздуха;
- внутри листа отсутствует градиент температуры, т.е. при переходе к следующему участку с постоянными метеопараметрами температура устанавливается мгновенно.

Для доказательства справедливости последнего утверждения были проведены дополнительные исследования. Базируясь на рассматриваемых метеоданных, максимальный зафиксированный перепад температуры, при переходе от одного участка с постоянными метеопараметрами к другому, составил  $16^{\circ}\text{C}$ . Для оценочных расчётов, коэффициент температуропроводности в направлении перпендикулярном плоскости листа был принят равным  $k_z=0.4\text{ мм}^2/\text{сек}$  [5]. Считалось, что температура выровнялась, когда различия температуры не превышали  $1^{\circ}\text{C}$ . Тогда время для выравнивания температуры для листа толщиной  $20\text{ мм}$  составляет 5 минут. Следовательно, для листов с толщинами до  $20\text{ мм}$  можно считать, что температура устанавливается мгновенно.

#### Методы решения задачи.

Метеорологические данные были использованы 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 [6]:

$$D(T) = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \quad (1)$$

где  $D_0$  – константа для материала,  $E_a$  – энергия активации диффузии,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T$  – абсолютная температура. Предельное влагосодержание или влагоёмкость отражает установившуюся концентрацию влаги в материале при постоянных внешних условиях, таких как влажность и температура воздуха. В соответствии с [6] влагоёмкость материала имеет степенную зависимость от влажности окружающего воздуха  $RH$ , % и не зависит от температуры:

$$M = M_{\max} \cdot \left(\frac{RH}{100\%}\right)^b, \quad (2)$$

где  $M_{\max}$  – предельная влагоёмкость при  $RH=100\%$ ,  $b$  – экспериментальная константа. В таблице 2 представлены диффузионные параметры исследуемого материала, которые были получены в результате экспериментальных исследований. В таблице 3 перечислены механические характеристики монослоя материала CYCOM [7], такие как модули Юнга, модуль сдвига, коэффициент Пуассона, толщина и плотность монослоя.

Таблица 2 – диффузионные свойства материала CYCOM

$D_0, \text{мм}^2/\text{с}$	$E_a, \text{кДж/моль}$	$M_{\max}$	$b$
18.5	48.1	0.012	1

Таблица 3 – характеристики жёсткости монослоёв материала CYCOM [7]

$E_{11+}, \text{кгс/мм}^2$	$E_{22+}, \text{кгс/мм}^2$	$G_{11+}, \text{кгс/мм}^2$	$\nu_{12}$	$\delta, \text{мм}$	$\gamma, \text{г/см}^3$
16483	805	437	0,32	0,197	1,58

Моделирование диффузионных процессов было выполнено с использованием специально разработанной компьютерной программы расчёта влагонасыщения. Предполагалось, что диффузионные процессы подчиняются второму закону Фика. Численное моделирование проводилось методом элементарных балансов. Также в процессе расчёта предполагалось, что обе поверхности листа композиционного материала контактирует с атмосферой, поэтому при проведении расчётов использовалось свойство геометрической симметрии. Предполагалось отсутствие диффузионного потока в плоскости листа, т.е. рассматривалась одномерная диффузия в направлении перпендикулярном плоскости листа. Использовалась расчётная сетка, которая сгущается у поверхности листа для моделирования суточных и сезонных колебаний концентрации влаги в

поверхностных слоях материала.

Помимо прямого численного моделирования диффузионных процессов, эффективная температура  $T_{ГОСТ}$  и эффективная влажность воздуха  $RH_{ГОСТ}$  была определена в соответствии с ГОСТ 15150-69 [8]:

$$T_{ГОСТ} = \frac{-E}{2.303 \left( \lg \left[ \sum_{i=1}^N \exp \left( -\frac{E}{T_i} \right) \right] - \lg[N] \right)} \quad (3)$$

$$RH_{ГОСТ} = 10^{\frac{1}{n} \left( \lg \left[ \sum_{i=1}^N \exp \left( -\frac{E}{T_i} \right) \cdot RH_i \right] + \frac{E}{T_{ГОСТ}} - \lg[N] \right)}$$

где  $E=E_a/R$ ,  $E_a$  – энергия активации диффузии,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $N$  – количество измерений,  $T_i$  (K),  $RH_i$  (%) – значения температуры и влажности воздуха, полученные при данном наблюдении в естественных условиях,  $n=2 \div 8$  – экспериментальная константа для материала. В вышеуказанном ГОСТ для диффузии влаги в полиэтилене приводится значение коэффициента  $n=4$ .

### Результаты расчётов.

В результате численного моделирования были определены суточные и сезонные колебания влаги. На рисунке 1 представлено изменение относительного влагосодержания на протяжении 30 лет экспозиции в климате г. Сочи листов различной толщины. Колебания влагосодержания в тонком листе имеют значительную амплитуду по сравнению с более толстым листом. Поэтому влагосодержание тонких листов достигает больших значений. На рисунке 2 представлено изменение относительного влагосодержания на протяжении 30 лет листов толщиной 10 мм экспонированных в различных климатических зонах на территории РФ. Диффузионные процессы в условиях субтропического климата г. Сочи протекают заметно быстрее за счёт высокой среднегодовой температуры.

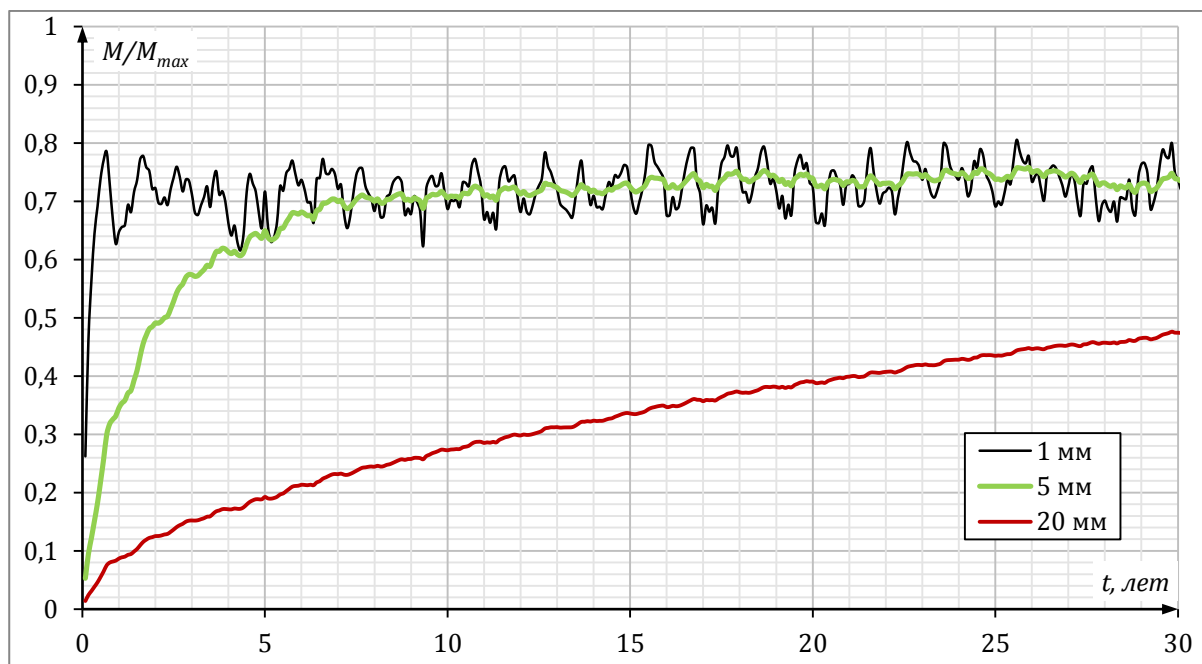


Рисунок 1 – колебания влагосодержания в листах различной толщины при экспозиции в климате города Сочи

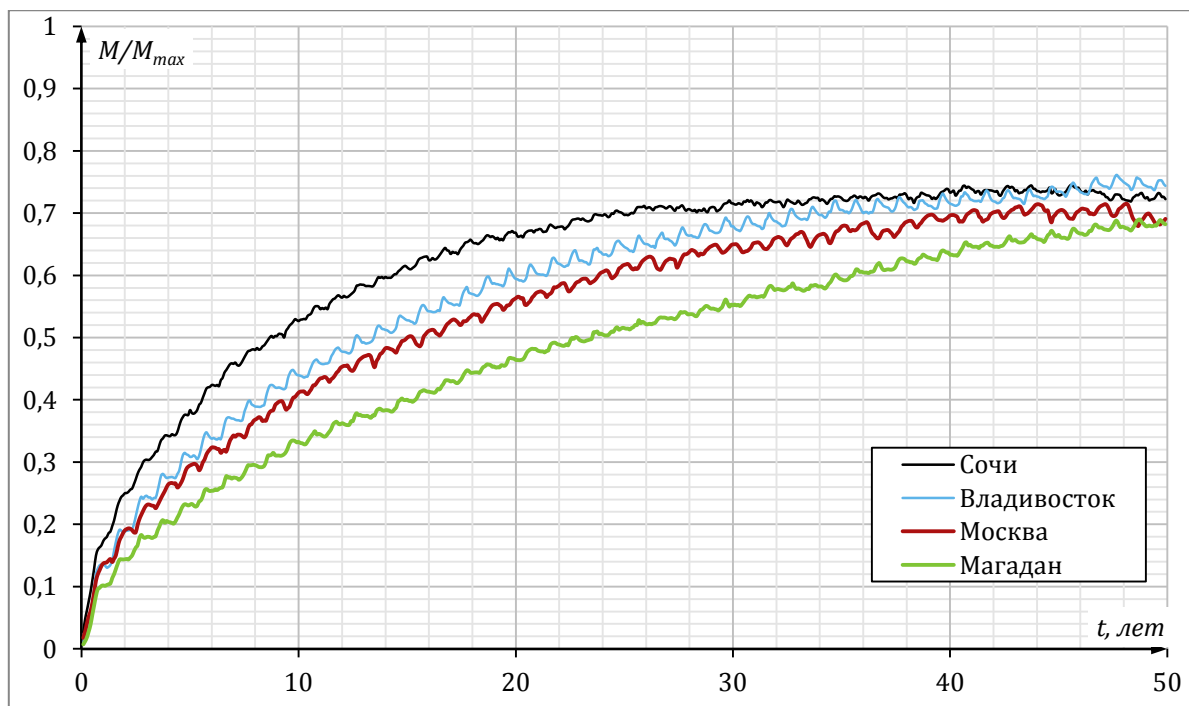


Рисунок 2 – колебания влагосодержания в листах толщиной 10 мм при экспозиции в различных климатических зонах РФ

В результате численного моделирования были определены суточные и сезонные колебания влаги. На рисунке 3 представлены распределения минимальной (min) и максимальной (max) относительной концентраций 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. Легко видеть, значительным изменениям подвержена концентрация влаги лишь в поверхностном слое толщиной в 1 мм.

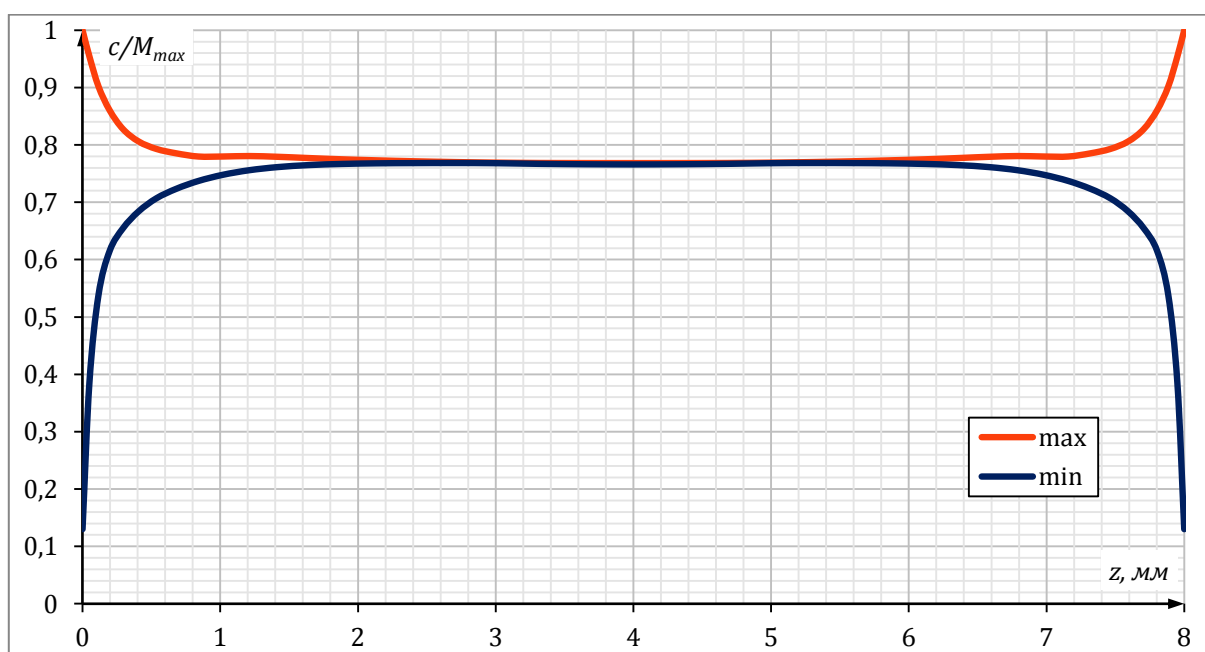


Рисунок 3 – колебания влаги в листе из углепластика на протяжении года,  $c/c_0$  – относительная концентрация влаги,  $z$  – ось перпендикулярная плоскости листа

Зависимость максимальной относительной массы влаги, достигаемой на протяжении 30 лет экспозиции, от толщины экспонируемого листа представлена на рисунке 4. Результаты расчётов 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  $RH=85\%$  и используется при проведении ускоренных климатических испытаний. Для листов толщиной более 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.

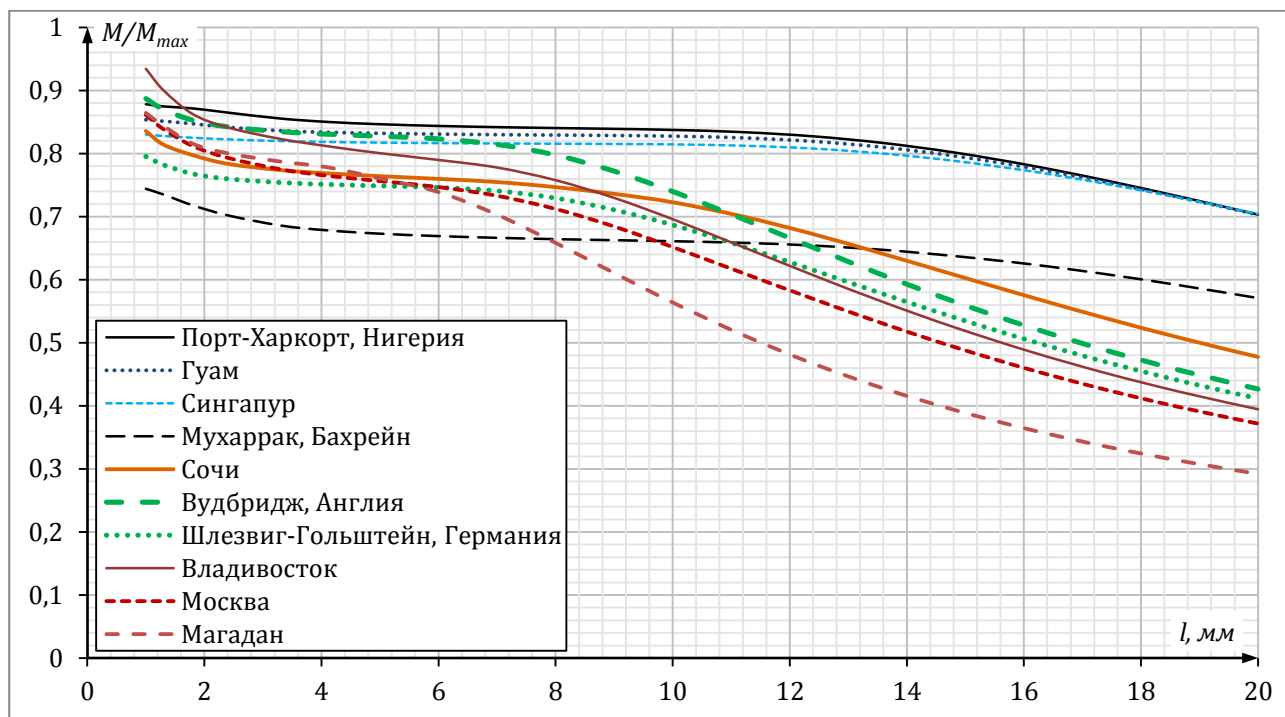


Рисунок 4 – максимальная относительная масса влаги  $m/m_0$  в листе в зависимости от его толщины  $l$ , мм

Рассматривая климатические условия на территории РФ, в результате длительной экспозиции тонких листов в условиях муссонного и субарктического морского климатов достигаются бóльшие значения максимальной относительной массы влаги по сравнению с экспозицией в условиях влажного субтропического климата г. Сочи, несмотря на низкую среднегодовую температуру.

Приведённые результаты расчётов относятся к случаю экспозиции конструкции в заданной климатической зоне. В процессе практической эксплуатации, зачастую авиаконструкции подвергаются поочерёдной экспозиции в различных климатических зонах. В процессе расчётов, фактов повышения максимальной относительной концентрации влаги за счёт синергического эффекта выявлено не было.

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 были использованы для прогнозирования климатического влияния в будущем.

#### **Учёт деформации конструкции в процессе влагонасыщения.**

При влагонасыщении в лабораторных условиях конструкция экспонируется в ненагруженном состоянии, поэтому также необходимо учитывать влияние деформаций конструкции на диффузионные процессы при эксплуатации. Наибольшее влияние климатических факторов наблюдается во время наземной стоянки. Нагрузки в кессоне 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 определённости будем считать, что максимальные напряжения в растянутых зонах составляют  $10 \text{ кгс/мм}^2$ . В отличие от растягивающей нагрузки, нагрузка на сжатие приводит к снижению величины влагоёмкости, поэтому такая нагрузка

рассматриваться не будет.

Расчёт влияния нагрузки на диффузионные свойства был проведён для пакета с укладкой  $\{-45/0/45/0/0/90/0/0/45/0/-45\}_3$ . В процессе расчётов параметров жёсткости пакета были использованы параметры монослоя, представленные в таблице 3. При проведении расчётов использовались соотношения, подробно описанные в литературе [9 – 11], связывающие диффузионные параметры с механическими деформациями. Как показали расчёты, растягивающие напряжения  $10 \text{ кгс/мм}^2$  вызывают повышение коэффициента диффузии на 1.9 %, а также повышение влагоёмкости на 1.1 %. Поэтому при определении эффективной влажности необходим учёт нагрузок.

#### **Заключение.**

В настоящей работе численным расчётом было подтверждено, при эксплуатации значительным изменениям подвержена концентрация влаги лишь в поверхностном слое. По результатам моделирования было установлено, эффективная влажность воздуха зависит не только от диффузионных характеристик материала, но и от толщин конструктивных элементов. Максимальное влагопоглощение было достигнуто при экспозиции в Порт-Харкорт, Нигерия. Для листов с толщинами от 3 до 10 мм наблюдается максимальное влагонасыщение на уровне 85% от  $M_{max}$ . Тогда как для листов толщиной более 15 мм максимальное влагопоглощение значительно ниже 85%. Как показали исследования, при определении эффективной влажности воздуха при эксплуатации углепластиков использование средней влажности воздуха, а также ГОСТ 15150-69 приводит к ошибочным результатам, а также не целесообразен учёт градиентов температуры при численном моделировании диффузионных процессов. В результате анализа влияния эксплуатационных нагрузок на диффузионные процессы было установлено, при определении эффективной влажности необходим их учёт.

В настоящей работе описан лишь общий подход к определению эффективной влажности воздуха для кессона крыла. Для практического применения методики необходимо:

- детальное изучение климата предполагаемых зон эксплуатации;
- определение диффузионных характеристик материалов;
- определение длительных нагрузок при эксплуатации.

#### **Литература**

1. *Vodicka R. Environmental exposure of boron-epoxy composite material // Aeronautical and Maritime Research Lab. Melbourne, Australia: Report DSTO-TN-0309, 2000.*
2. *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.*
3. *Веселов В.М., Прибыльская И.Р. Специализированные массивы для климатических исследований // ВНИИГМИ-МЦД. Режим доступа: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR>.*
4. *Collings T.A. The effect of observed climatic conditions on the moisture equilibrium level of fibre-reinforced plastics // Composites. 1986. Vol. 17. I. 1. P. 33-41*
5. *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.*
6. *Vodicka R. Accelerated environmental testing of composite materials // Aeronautical and Maritime Research Lab. Melbourne, Australia: Report DSTO-TR-0657. 1997. 60.*
7. *Гришин В.И., Дзюба А.С., Дударьков Ю.И. Прочность и устойчивость элементов и соединений авиационных конструкций из композитов. М.: Издательство физико-математической литературы. 2013. 272 с.*
8. *ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. – М.: Стандартинформ, 2006.*
9. *Youssef G., Fréour S., Jacquemin F. Stress-dependent moisture diffusion in composite materials // Journal of COMPOSITE MATERIALS. 2009. Vol. 43. No. 15.*
10. *Neumann S., Marom G. Free-volume dependent moisture diffusion under stress in composite materials // Journal of MATERIALS SCIENCE. 1986. Vol. 21. P. 26-30.*
11. *Neumann S., Marom G. Prediction of moisture diffusion parameters in composite materials under stress // Journal of COMPOSITE MATERIALS. 1987. Vol. 21. P. 13.*