

9 Трацевская, Е. Ю. Характеристики пластичности супесчаных неводонасыщенных грунтов юго-востока Беларуси / Е. Ю. Трацевская // Литосфера. – 2018. – № 1 (48). – С. 12–17.

10 Трацевская, Е. Ю. Демпфирующие свойства слабосвязных трехфазных грунтов / Е. Ю. Трацевская // Литосфера. – 2019. – № 2(51). – С. 115–121.

11 Трацевская, Е. Ю. Экспериментальное исследование параметров автотранспортного вибродинамического воздействия на массивы грунтов / Е. Ю. Трацевская // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2020. – № 1 (40). – С. 58–61.

12 Журавков, М. А. Математические модели механики твердого тела / М. А. Журавков, Э. И. Старовойтов. – Минск : БГУ, 2021. – 535 с.

13 Zhuravkov, M. A. Mechanics of Solid Deformable Body / M. A. Zhuravkov, Lyu Yongtao, E. I. Starovoitov. – Singapore : Springer, 2022. – 317 p.

14 Абдусаттаров, А. Деформирование и повреждаемость упругопластических элементов конструкций при циклических нагрузениях / А. Абдусаттаров, Э. И. Старовойтов, Н. Б. Рузиева. – Ташкент : IDEAL PRESS, 2023. – 381 с.

15 Vakhneev, S. Damping of circular composite viscoelastic plate vibration under neutron irradiation / S. Vakhneev, E. Starovoitov // Journal of Applied Engineering Science. – 2020. – 18(4). – P. 699–704.

16 Pronina, P. F. Study of the radiation situation in Moscow by investigating elastoplastic bodies in a neutron flux taking into account thermal effects / P. F. Pronina, O. V. Tushavina, E. I. Starovoitov // Periódico Tchê Química. – 2020. – Vol. 17, no. 35. – P. 753–764.

УДК 536.24

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СПОСОБЫ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

*О. В. ТУШАВИНА*

*Московский авиационный институт (НИИ), Российская Федерация*

Рассматриваются перспективные способы тепловой защиты летательных аппаратов путем использования новых композиционных материалов (КМ) с помощью комбинирования как существующих, так и разрабатываемых материалов. Наиболее перспективными являются КМ на основе углеродных нитей (наполнителей КМ), пропитанных углеродными смолами или парами пиролитического графита. К таким ТЗМ относятся углерод-углеродные КМ и углерод-керамические КМ. Однако эти материалы быстро окисляются уже при температуре 700 К, хотя сублимирует углерод при температурах 3000–3500 К. Поэтому для защиты от окисления и эрозии должны быть разработаны пленочные композиции, состоящие из карбидов переходной (IV) группы материалов таблицы Д. И. Менделеева – карбидов кремния, бора, циркония, гафния и т. п. Если они в своем составе содержат кремний, то при его оплавлении жидкое стекло «залечивает» поры, образуемые при окислении основного ТЗМ, состоящего из углерод-углеродных или углерод-керамических КМ. Здесь рассматривается тепловая защита с использованием заградительной пленки. Другим направлением разработки тепловой защиты для высокоскоростных ЛА является проектирование тепловой защиты на основе анизотропных материалов с теплофизическими характеристиками (ТФХ), позволяющими отводить тепловые потоки и температуры от наиболее теплонапряженных лобовых частей фюзеляжей и несущих поверхностей в хвостовые части конструкции, а также использование материала с сильной зависимостью теплопроводности от температуры, что позволяет «запирать» таковые потоки и температуры на определенной глубине конструкции, хотя к границе может подводиться бесконечно большое количество теплоты.

В работе предложен и обоснован новый эффективный способ тепловой защиты носовых частей высокоскоростных ЛА путем использования теплозащитных анизотропных материалов с высокой степенью продольной анизотропии (отношение продольного коэффициента теплопроводности к поперечному), позволяющей «канализировать» тепловые потоки и температуры. Такой отвод существенно снижает температуру лобовых затуплений высокоскоростных ЛА, с одной стороны, и существенно повышает температуры хвостовых частей конусов (клиньев) – с другой, что влечет значительное уменьшение тепловых потоков к поверхности носовых частей высокоскоростных ЛА за счет уменьшения перепада температур от газа к телу. Обоснование такого способа тепловой защиты осуществляется на основе разработки комплексной математической модели сопряженного теплообмена между вязким газодинамическим потоком и анизотропным телом. Кроме этого, повышение температуры поверхности хвостовых частей конуса (клина) уменьшает плотность газа и увеличивает его динамическую плотность газа и увеличивает его динамическую вязкость, что ведет к уменьшению местных чисел Рейнольдса, к ламинаризации течения и к уменьшению тепловых потоков.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (Грант РНФ № 23-19-00684), выданного Московскому авиационному институту.*