

**Динамика и охлаждение пленки воды с тающими кристаллами
на поверхности обтекаемого цилиндра: К проблеме образования барьерного льда**

А.В. Кашеваров¹, А.Л. Стасенко^{1,2}

¹Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского

²Московский физико-технический институт (государственный университет)

Развита математическая модель течения и отвердевания пленки воды на поверхности поперечно обтекаемого цилиндра в потоке воздуха, несущего кристаллы льда. Рассматриваемая ситуация имеет место при полёте летательного аппарата в облаках, встречающихся на высотах до 13 км и содержащих кристаллы в значительном количестве. Отвердевание движущейся по поверхности тела плёнки воды, образующейся, например, в результате плавления части кристаллов на нагретых лопатках входной секции двигателя, приводит к образованию так называемого барьерного льда. Для предсказания координаты начала образования ледяного барьера необходимо решить задачу о достижении текущей плёнкой температуры замерзания. Особенность рассматриваемой проблемы состоит в том, что кристаллы, попадая в плёнку, могут изменить эффективную вязкость смеси (суспензии) и требуют определенного времени (и расстояния) для своего плавления, что делает модель нелокальной.

Для описания гидротермодинамики плёнки использованы уравнения пограничного слоя, осредненные по толщине пленки. Система уравнений включает уравнения неразрывности, импульсов, энергии пленки и уравнение эволюции концентрации частиц в ней. При этом принципиальным элементом является проблема Стефана для отдельного кристалла, описывающая его сопряженный теплообмен с окружающей пленкой через изменяющуюся со временем границу фазового раздела. Полученные ранее результаты [1] свидетельствуют о том, что характер изменения размера кристалла со временем близок к закону Срезневского.

Численные исследования течения водяной плёнки на основе развитой модели проведены для случая, когда она образуется в результате введения воды через горизонтальную щель, совпадающую с передней критической линией цилиндра. Такой способ создания пленки использовался в экспериментах в аэрохолодильной установке [2]. Расчёты проведены для набора определяющих параметров, характерных для этих экспериментов.

На рис. 1 приведены зависимости температуры внутренней и внешней границ пленки от азимутального угла θ , отсчитываемого от передней критической точки цилиндра при трёх значениях расхода воды через щель. Скорость набегающего потока составляла 50 м/с,

температура воздуха 263 К, начальная температура стенки 276 К. При значениях расхода 100 и 10 г/с в отсутствие кристаллов в потоке пленка остается «тёплой» (кривые 2, 3). Для тонкой пленки температура её нижней границы (стенки) достигает температуры замерзания воды при угле θ около 35° (кривая 1) и далее не изменяется. Следовательно, может начаться обледенение даже в отсутствие кристаллов льда в потоке. При наличии кристаллов они, проникая в пленку, могут понизить её температуру вплоть до температуры замерзания (кривая 3б), после чего тоже начинается образование барьерного льда.

Работа выполнена в рамках проекта НАИС (314314) 7-ой рамочной программы ЕС и при финансовой поддержке РФФИ, грант 13-01-00766.

Литература

1. *Кашевиков А.В., Стасенко А.Л.* Проблема Стефана в приложении к обледенению ЛА в водно-кристаллическом облаке // Труды 57-й научной конференции МФТИ. – 2014. – С. 87–89.

2. *Miller A.B., Potapov Yu.F., Stasenko A.L.* Experimental and theoretical investigations of aircraft icing in the case of crystal and mixed-phase flow // 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS). – 2014. – Paper 2014_0576.

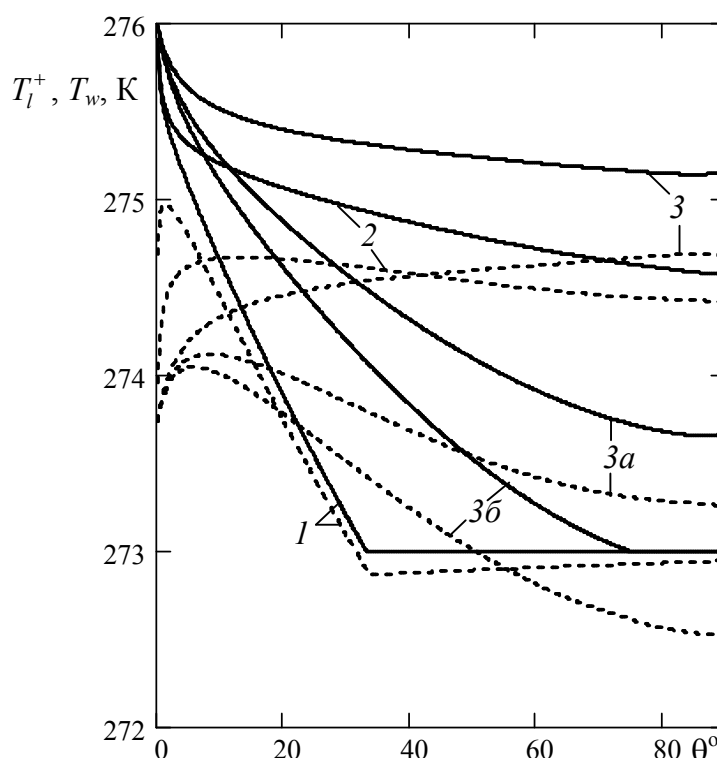


Рис. 1. Температура пленки по поверхности цилиндра. Сплошные линии – температура нижней границы (стенки) T_w , штриховые – верхняя граница T_l^+ . Кривые 1–3 в отсутствие кристаллов в набегающем потоке, 3а – массовая концентрация кристаллов в потоке 10 г/м^3 , 3б – 15 г/м^3 . Расход воды через щель: 1 – 1, 2 – 10, 3 – 100 г/с