

03

К гидротермодинамике обледенения профиля в воздушно-кристаллическом потоке

© А.В. Кашеваров,¹ В.С. Левченко,¹ А.Б. Миллер,^{1,2} Ю.Ф. Потапов,¹ А.Л. Стасенко^{1,2}

¹Центральный аэрогидродинамический институт,
140180 Жуковский, Россия

²Московский физико-технический институт,
141701 Долгопрудный, Россия
e-mail: a.v.kash@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 2 октября 2017 г.)

Создан экспериментально-теоретический комплекс для исследования физических процессов, сопровождающих взаимодействие потока воздуха, несущего кристаллы льда, с нагретой поверхностью обтекаемого тела. Найден эффективный коэффициент фазовых превращений (испарения и перехода — через плавление и отвердевание в жидкой пленке — в барьерный лед) массы кристаллов, бомбардирующих сухую или смоченную нагретую поверхность с учетом их частичного уноса обтекающим воздухом. Разработана физико-математическая модель гидротермодинамики жидкой пленки, получены численные данные по ее толщине, скорости и температуре, дополняющие результаты экспериментов.

DOI: 10.21883/JTF.2018.06.46009.2503

Введение

Экспериментальные и теоретические исследования физических процессов, сопровождающих обледенение летательных аппаратов в переохлажденных облаках, содержащих метастабильные капли воды, проводятся в течение более полувека, например [1–4]. Сравнительно недавно [5] была осознана опасность, связанная с наличием в высоких слоях атмосферы кристаллов льда в значительных количествах (до 20 g/m^3), приводящих к сбоям в работе авиационных турбореактивных двигателей и приемников воздушных давлений. К настоящему времени накоплена обширная библиография, посвященная исследованию отдельных аспектов этих явлений, например, [6–8]. В частности, в [8] экспериментально подтверждено, что аккреция кристаллов льда начинается, когда поверхностная температура обтекаемого тела уменьшается до температуры плавления льда.

Однако необходимость учета целого комплекса явлений (образование жидкой пленки на поверхностях, испарение воды, срыв и унос капель, столкновение кристаллов с сухой или смоченной поверхностью) делает проблему обледенения элементов конструкции летательного аппарата в кристаллических и смешанных облаках далекой от окончательного решения.

В настоящей работе описан экспериментально-теоретический комплекс, предназначенный для исследования обледенения нагретой поверхности в воздушно-кристаллическом потоке. Несмотря на то что обледенение в кристаллических облаках актуально для внутренних течений (в канале двигателя, в трубке приемника воздушных давлений и т.п.), натекание кристаллов в настоящей работе рассмотрено для случая внешнего потока, обтекающего профиль крыла с нагретой поверхностью. Предлагаемый подход значительно упрощает

наблюдения и измерения, а также облегчает понимание физики обледенения в кристаллических условиях. Экспериментальные исследования обледенения модели были проведены в условиях натекания потока, несущего кристаллы льда и капли воды, в широком диапазоне параметров: скорости, кристаллической водности ($\text{Ice Water Content} \equiv \text{IWC} [\text{g/m}^3]$), размеров кристаллов, температур потока и поверхности. В теоретических исследованиях моделировалась жидкая пленка на нагретой стенке, несущая кристаллы льда. На основе разработанной физико-математической модели были проведены вычисления эволюции толщины пленки, ее скорости и температуры вдоль передней полуцилиндрической кромки экспериментальной модели для набора параметров, характерных для выполненных экспериментов.

Отметим, что динамика тонких пленок жидкости, ускоряемых силами различной физической природы, теоретически исследуется в течение длительного времени (например, [9,10]). Проблема обледенения осложнена процессами теплообмена, испарения, кристаллизации, а также полидисперсностью набегающего на тело потока и самой пленки, если она несет кристаллы льда [11].

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования проводились на стенде искусственного обледенения [12] на модели профиля крыла (хорда 205 mm , ширина 150 mm) с нагретой передней кромкой (полуцилиндр радиусом $R = 15 \text{ mm}$) (рис. 1). Барьерный лед образовывался за зоной нагрева на верхней и нижней плоских поверхностях профиля, причем верхняя поверхность представляла собой съемную пластину, что позволяло измерять

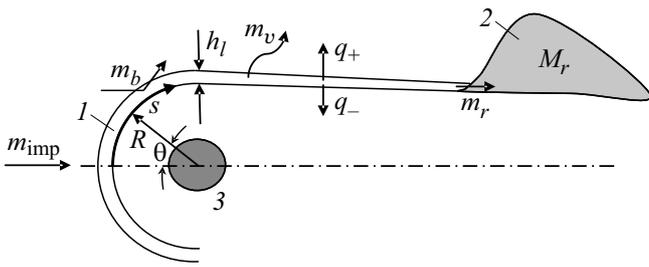


Рис. 1. Схема образования барьерного льда (2) в воздушно-кристаллическом потоке при наличии поверхностной пленки воды (1) и подогревателя (3).

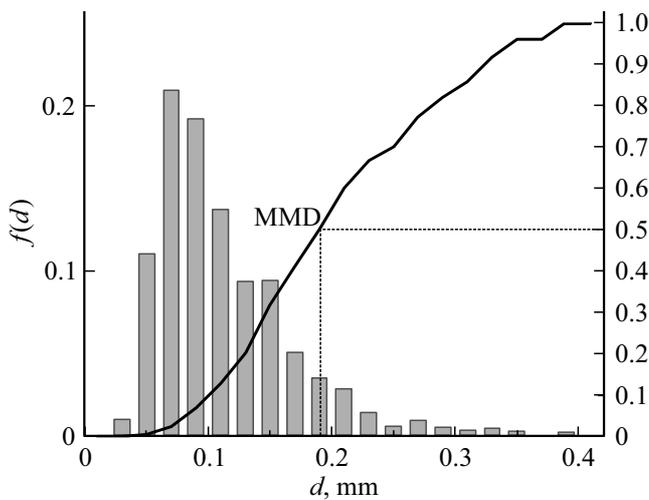


Рис. 2. Распределение кристаллов по диаметрам и кривая накопления массы (MMD = 0.18 mm).

массу образовавшегося льда непосредственно после эксперимента.

Алгоритм проведения испытаний заключался в следующем. Модель устанавливалась в рабочей части стенда. После установления требуемой скорости потока воздуха на нагреватель модели подавалось напряжение, кромка крыла разогревалась до некоторого выбранного значения температуры в диапазоне от 0 до 25°C. После стабилизации температурного поля кромки в аэродинамический канал стенда подавались кристаллы. Эксперимент продолжался до появления заметного ледяного барьера, при этом его высота доводилась до значения не более 5 mm, чтобы не допустить слишком большого капельного уноса воды. После формирования барьера подача кристаллов прекращалась, модель охлаждалась воздушным потоком с малой скоростью, верхняя пластина с барьером отсоединялась от модели, помещалась в контейнер для предотвращения сублимации и взвешивалась, что позволяло найти долю кристаллов, осажденных на поверхности и прилипших к ней.

Аналогичная процедура проводилась при испытаниях с созданием жидкой пленки. Пленка толщиной 35–70 μm создавалась при помощи вихревой форсунки,

расположенной выше модели по потоку и снизу от нее. В эксперименте первоначально определялась масса барьерного льда M_{r1} , образующегося при замерзании пленки без добавления кристаллов. Затем эксперимент повторялся, но в поток при тех же условиях добавлялись кристаллы и снова измерялась масса льда M_{r2} . Разность масс $M_{r2} - M_{r1}$ позволяла (с учетом испарения и уноса) найти массу кристаллов, захваченных пленкой.

При соударении кристаллов с поверхностью, нагретой до положительной температуры, происходят следующие процессы. Некоторые кристаллы могут отскакивать от поверхности без расплавления. Часть из них прилипает к поверхности и полностью расплавляется. Некоторые кристаллы расплавляются частично, при этом оставшаяся доля таких кристаллов уносится с поверхности. Расплавившаяся доля формирует пленку воды, которая частично испаряется, частично затекает на участки поверхности с отрицательной температурой, формируя барьерный лед (рис. 1). При течении воды по поверхности и формировании барьерного льда происходит унос воды с поверхности за счет срыва капель и испарения в поток.

Вводится суммарный коэффициент фазовых превращений потока кристаллов (в барьерный лед и пар)

$$K = \frac{\dot{m}_r + \dot{m}_v}{u_{\infty} RIWC \cdot CE}, \quad (1)$$

где в числителе выписаны два упомянутых канала уноса массы, а в знаменателе — погонная (в расчете на единицу ширины профиля) плотность потока массы кристаллов, приходящаяся на половину миделя профиля.

Здесь \dot{m}_r [kg/(m · s)] — скорость образования барьерного льда (runback ice), \dot{m}_v — интенсивность испарения (vaporization), u_{∞} — скорость невозмущенного потока, CE (collection efficiency) — доля частиц, столкнувшихся с обтекаемым телом (от величины потока массы кристаллов на его мидель). Эта терминология и обозначения приняты в теории обледенения [1–8].

Поскольку для рассматриваемого набора параметров число Стокса (отношение времени скоростной релаксации к характерному газодинамическому времени R/u_{∞}) $Stk = 2\rho_p a^2 u_{\infty} / (9\mu_a R) \gg 1$ (ρ_p — плотность материала частицы, a — ее радиус, μ_a — вязкость воздуха), искривлением траекторий частиц можно пренебречь и $CE \approx 1$.

В экспериментах исследовалась зависимость коэффициента K от IWC, u_{∞} , T_{∞} , T_s и MMD кристаллов льда (T_{∞} и T_s — температуры набегающего потока и поверхности тела, MMD — масс-медианный диаметр кристаллов). Количество испарившейся воды оценивалось на основе модели, принятой в [2]. Коэффициент K находился из (1), анализировалась его зависимость от разности температур T_s и T_{∞} .

Испытания для случая натекания кристаллов на изначально сухую нагретую поверхность проводились для трех значений скорости потока u_{∞} : 20, 45 и 80 m/s в диапазоне его температур T_{∞} от –5.5 до –18°C, диапазона водности $IWC = 3.3 - 18.1$ g/m³ и средней

Таблица 1. Результаты испытаний в случае изначально сухой поверхности модели

u_∞ , m/s	T_∞ , °C	IWC, g/m ³	T_s , °C	MMD, mm	τ , s	M_r , g	\dot{m}_{imp} , g/(m·s)	\dot{m}_r , g/(m·s)	\dot{m}_v , g/(m·s)	K
20	-5.7	18.1	-2.1	0.15	120	0	5.249	0	0.002	0.0004
20	-5.7	18.1	0.6	0.15	120	0	5.249	0	0.004	0.0008
20	-8.8	8.3	3.3	0.43	180	0.7	2.393	0.026	0.009	0.0144
45	-8	3.3	9.3	0.43	375	0.23	2.153	0.004	0.037	0.019
45	-8	12	6.8	1.3	45	0.39	7.83	0.058	0.028	0.011
45	-18	9.7	15	1.3	56	0.61	6.329	0.073	0.071	0.0228
80	-11.8	5	21.1	1.3	60	0	5.8	0	0.125	0.0216
80	-11.2	5	3.5	1.3	50	0	5.8	0	0.029	0.005
80	-9.4	10	6.1	1.3	128	0.49	11.6	0.026	0.039	0.0056

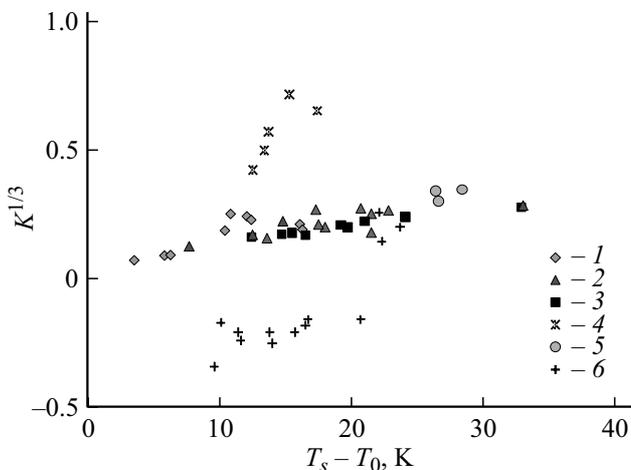


Рис. 3. Зависимость коэффициента K от разности температур $\Delta T = T_s - T_\infty$ при различных скоростях воздушного потока u_∞ и для различного состояния поверхности. Первоначально сухая нагретая поверхность: 1 — $u_\infty = 20$, 2 — 45, 3 — 80 m/s; поверхность, покрытая жидкой пленкой: 4 — $u_\infty = 20$, 5 — 45, 6 — 80 m/s.

температуры влажной передней кромки модели T_s от -6 до $+21^\circ\text{C}$. Типичные результаты экспериментов приведены в табл. 1 (τ — время взаимодействия модели с воздушно-кристаллическим потоком, M_r — полная масса образовавшегося барьерного льда, \dot{m}_{imp} — погонный поток массы прибывающих кристаллов).

На рис. 2 приведен пример распределения диаметров кристаллов при $MMD = 0.18$ mm и соответствующая кривая накопления массы, на рис. 3 даны зависимости коэффициента K от $\Delta T = T_s - T_\infty$ для случаев как изначально сухой, так и покрытой жидкой пленкой поверхности для различных скоростей потока.

Рассмотрим случай наименьшей скорости потока 20 m/s и изначально сухой поверхности. Как следует из табл. 1 и рис. 3, при отрицательной температуре наружного воздуха небольшой подогрев лобовой поверхности модели приводит к прилипанию кристаллов к поверхности, начиная с величины $T_s = -2.1^\circ\text{C}$ ($\Delta T = T_s - T_\infty = 3.5^\circ\text{C}$). Прилипание усиливалось по

мере повышения T_s , и при $T_s = 0.6^\circ\text{C}$ ($\Delta T = 6.3^\circ\text{C}$) на лобовой поверхности модели стала образовываться пленка воды, которая полностью испарялась и уносилась с лобовой поверхности без затекания на плоский участок модели (барьерный лед не образовывался).

При $T_s = 1.3^\circ\text{C}$ ($\Delta T = 10.4^\circ\text{C}$) значительно увеличилась толщина пленки воды и часть воды стала затекать на плоский участок модели, образуя барьерный лед. При дальнейшем увеличении T_s на границе между цилиндрической и плоской частями модели стала резко увеличиваться толщина пленки воды, что вызвало усиление уноса воды, которое, в свою очередь, привело к снижению массы барьерного льда и уменьшению коэффициента K . Так, в диапазоне $\Delta T = 10.8 - 16.3^\circ\text{C}$ значение коэффициента K понизилось от 0.013 до 0.007.

Таким образом, можно выделить четыре температурные области, характерные для процесса прилипания кристаллов, образования и течения пленки воды.

Первая область — кристаллы прилипают к поверхности без образования видимой пленки воды. При этом наблюдается отскок большей части массы кристаллов.

Вторая область — происходит усиление прилипания кристаллов к поверхности, образование пленки воды, ее испарение и унос в зоне прилипания кристаллов.

Третья область — наблюдается дальнейшее усиление прилипания кристаллов к поверхности, утолщение пленки воды, ее частичное испарение, капельный унос массы и течение по поверхности с образованием барьерного льда на плоском участке модели. Масса барьерного льда растет с увеличением температуры поверхности.

Четвертая область — срыв капель воды усиливается вследствие увеличения толщины пленки воды. Масса барьерного льда уменьшается.

На рис. 3 показано также влияние скорости потока. В области $\Delta T = 12 - 30^\circ\text{C}$ коэффициент K имеет тенденцию к уменьшению при увеличении скорости воздушного потока от 20 до 80 m/s, поскольку увеличивается унос кристаллов и капель с поверхности жидкой пленки. При $\Delta T = 5 - 11^\circ\text{C}$ данная тенденция нарушается, что связано, по всей видимости, с хаотическим характером процессов прилипания и сдува кристаллов с поверхности.

Таблица 2. Экспериментальные результаты и значения K для случая нагретой поверхности модели, покрытой жидкой пленкой

u_∞ , m/s	T_∞ , °C	IWC, g/m ³	T_s , °C	MMD, mm	τ , s	M_r , g	\dot{m}_{imp} , g/(m·s)	\dot{m}_r , g/(m·s)	\dot{m}_v , g/(m·s)	K
20	-13.3	0	6	—	60	3.31	0	0.368	0.013	—
20	-13.4	10	0	1.3	60	6.44	2.9	0.716	0.011	0.124
45	-15	0	18.7	—	61	4.32	0	0.472	0.079	—
45	-15	15	11.4	1.3	65	7.95	9.788	0.815	0.046	0.04
45	-14	4.7	15.8	0.18*	60	0.51	3.067	0.057	0.063	0.039
80	-10.9	0	1.4	—	60	5.5	0	0.611	0.025	—
80	-10.8	11	-1.2	1.3	60	0.82	12.76	0.091	0.015	-0.04

Примечание: * В этом пуске жидкая пленка не создавалась, барьерный лед образовался только благодаря кристаллам.

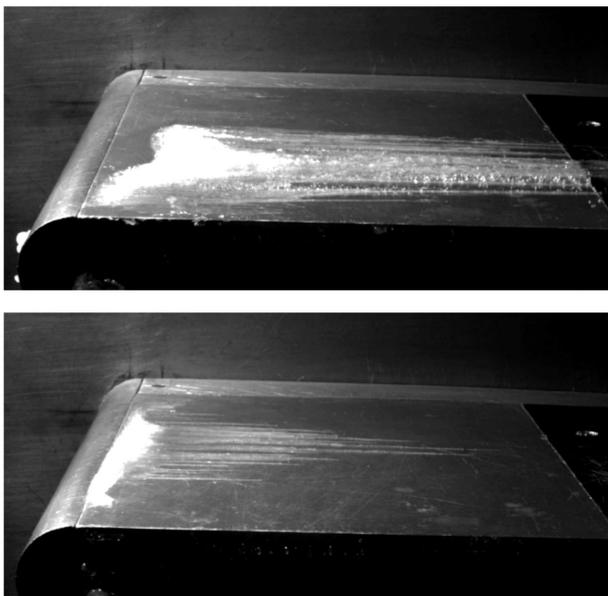


Рис. 4. Характерный вид барьерного льда на режиме со скоростью потока 80 m/s: *a* — замерзание жидкой пленки без кристаллов, *b* — замерзание жидкой пленки с захваченными кристаллами, масса льда меньше, чем в случае *a* из-за разрушения пленки кристаллами.

Результаты испытаний в случае натекания кристаллов на нагретую поверхность с жидкой пленкой для перечисленных выше значений скорости представлены в табл. 2 и на рис. 3.

При скорости потока 20 m/s при добавлении кристаллов в поток барьерного льда образуется всегда больше, чем при течении одной только пленки. Эксперименты в широком диапазоне изменения IWC показали, что при увеличении концентрации кристаллов в потоке масса барьерного льда уменьшается. Увеличение водности потока, так же как и увеличение скорости, приводит к возрастающему потоку кристаллов на поверхность пленки, что, как показали эксперименты, уменьшает массу барьерного льда.

При скорости потока 45 m/s наблюдались как режимы с увеличением массы барьерного льда при добавлении кристаллов, так и обратный эффект.

Во всех исследованных случаях при скорости воздушного потока 80 m/s общая масса барьерного льда уменьшалась, когда кристаллы добавлялись в поток. Характерный вид барьерного льда на поверхности модели показан на рис. 4, *a* (только жидкая пленка) и 4, *b* (жидкая пленка и натекающие кристаллы). Масса барьерного льда, формирующегося в течение 60 s эксперимента, уменьшилась в этом случае более чем в шесть раз при добавлении кристаллов в поток (см. две последние строки табл. 2). Уменьшение MMD кристаллов от 1.3 до 0.18 mm приводит к небольшому увеличению K , при этом масса барьерного льда остается меньше, чем при течении одной только жидкой пленки без кристаллов при одной и той же мощности нагревателя.

Заметим, что величина K может стать отрицательной в случае, когда добавление кристаллов приводит к уменьшению массы образующегося льда.

Таким образом, если плотность потока массы натекающих кристаллов не достигает определенного порога, жидкая пленка эффективно захватывает кристаллы. В этом случае масса барьерного льда больше, чем при его образовании благодаря только одной пленке или только кристаллам. В то же время тенденция к уменьшению коэффициента K с увеличением скорости потока наблюдается как в случае сухой поверхности, так и в случае наличия на ней жидкой пленки. В случае сухой поверхности наиболее вероятной причиной этого служат эффекты уноса как кристаллов, так и пленки, усиливающиеся по мере увеличения скорости воздушного потока. В случае наличия жидкой пленки эффект может быть также вызван охлаждением модели кристаллами и их разрушающим воздействием на пленку (возбуждение волн, разбрызгивание, унос воды при отскоке от поверхности). Это показывает, что взаимодействие множества кристаллов с поверхностью существенно отличается от случая взаимодействия с ней одиночного кристалла.

Результаты численного исследования гидротермодинамики поверхностной пленки воды

Для оценки параметров, не измерявшихся в эксперименте (скорости и температуры), разработана [11]

математическая модель гидротермодинамики пленки, несущей проникшие в нее кристаллы. Модель учитывает зависимость эффективной вязкости суспензии от массовой доли дисперсной фазы в отвердевающей пленке и конечное время таяния кристаллов. Расчеты в рамках разработанной модели проведены в [11] для случая, когда пленка образуется в результате введения воды через горизонтальную щель, совпадающую с передней критической линией цилиндра. В настоящей работе модель была модифицирована для случая создания пленки каплями воды, распыленными форсункой.

Использовались уравнения пограничного слоя, осредненные по толщине пленки h_l . Система уравнений включает уравнения непрерывности, количества движения и энергии пленки. Последнее в отличие от [11] принимает вид

$$c_l \partial \rho_l h_l \langle u_l T_l \rangle / \partial s = \dot{q}_+ - \dot{q}_w - \dot{m}_v L_v + \dot{m}_{\text{имп}} (V_p^2 / 2 + c_l T_p).$$

Здесь ρ_l — плотность жидкой пленки, h_l — ее толщина $\langle u_l T_l \rangle$ — среднее значение произведения скорости течения пленки на ее температуру, s — координата вдоль поверхности, $\dot{m}_{\text{имп}}$ — плотность потока прибывающей массы воды в пленку за счет прилетающих жидких частиц, \dot{q}_+ , \dot{q}_w — плотности тепловых потоков на внешней и внутренней границах пленки, L_v — удельная теплота испарения, V_p — абсолютная величина скорости жидкой частицы при соударении с пленкой, c_l — удельная теплоемкость воды, T_p — температура прилетающих капель.

Отметим, что на поверхности полуцилиндра пограничный слой воздуха, так же как и течение пленки, является ламинарным [13,14] даже для полномасштабных летательных аппаратов [2]. Численная реализация разработанной модели для ламинарного течения подробно изложена в [11].

Плотности потоков энергии представляются в виде

$$\dot{q}_+ = \alpha_a (T_\infty - T_l^+), \quad \dot{q}_w = \alpha_l (T_l^+ - T_w),$$

где α_a , α_l — коэффициенты теплоотдачи от поверхности пленки к воздушному потоку и от стенки к пленке, T_l^+ , T_w — температуры внешней границы пленки и стенки.

Как и ранее [11], для α_a использовалось выражение из [15], полученное из расчета местного коэффициента теплоотдачи цилиндра в области безотрывного ламинарного течения. Поверхность цилиндра предполагалась адиабатической, массовая концентрация ρ_p капель в основном потоке соответствовала расходу воды в пленке у вершины цилиндра ($\theta = \pi/2$) в 1 г/с. Значение температуры капель было таким, чтобы начальная температура стенки T_w равнялась 276 К.

Вычисления проведены для двух значений скорости набегающего воздушного потока $u_\infty = 20$ и 80 м/с, реализованных в эксперименте. На рис. 5,а показаны численные результаты для толщины пленки и скорости

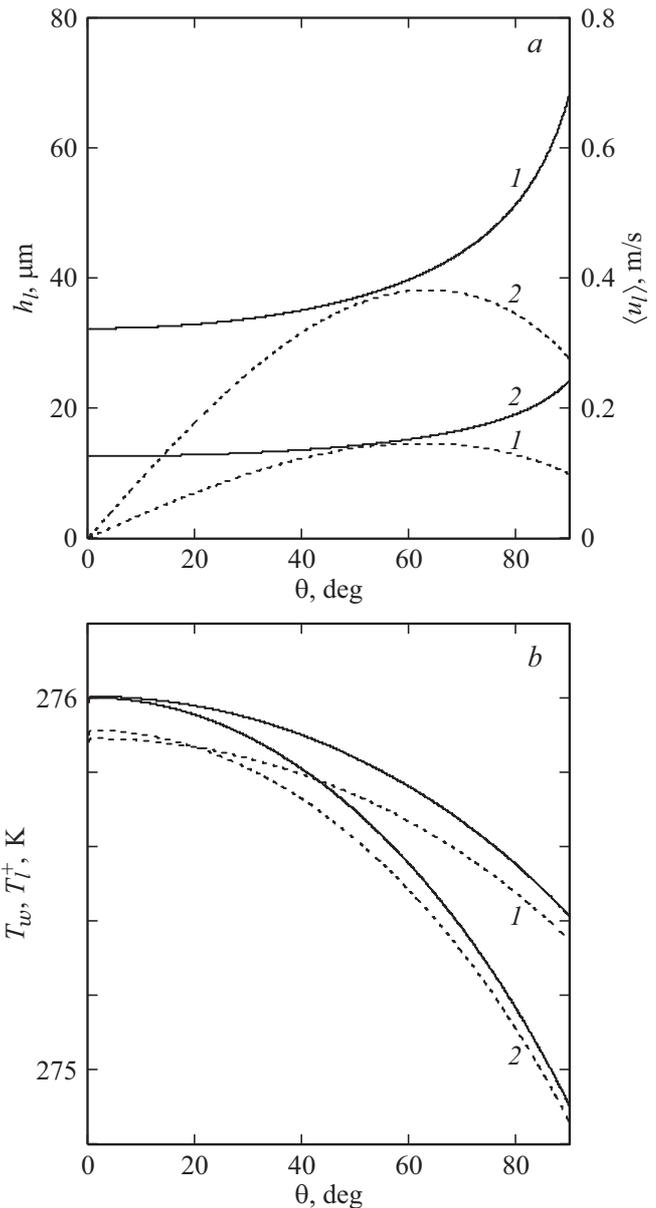


Рис. 5. Изменение вдоль обвода цилиндра *a* толщины (сплошные кривые) и средней скорости (штриховая) пленки *b* температуры пленки (сплошные линии — температура нижней границы пленки (стенки) T_w , штриховые — верхняя граница T_l^+) при различных скоростях набегающего воздушного потока: 1 — 20, 2 — 80 м/с.

ее течения. Видно, что толщина пленки постоянно возрастает, но остается тонкой, что не позволяет ожидать образования воднокристаллической суспензии. Вычисленная толщина пленки в последнем случае хорошо согласуется с измерениями, которые дают толщину в диапазоне 35–70 мкм.

На рис. 5, *b* дано распределение температуры пленки. Видно, что при использованном наборе управляющих параметров пленка не достигает температуры замерзания в лобовой части цилиндра.

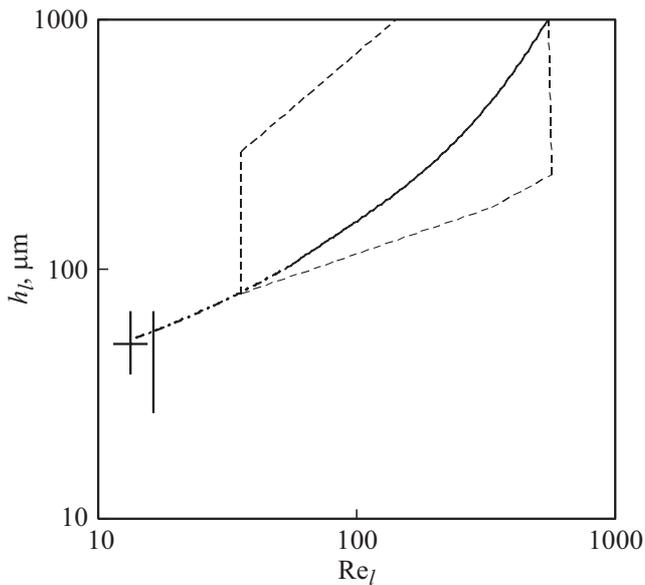


Рис. 6. Зависимость толщины пленки от ее числа Рейнольдса: замкнутая штриховая линия — граница области экспериментальных исследований других авторов; крест и вертикальный отрезок — экспериментальные и расчетно-теоретические исследования настоящей работы; сплошная линия и ее штрихпунктирная экстраполяция — граница капельного уноса массы.

Анализ результатов

Проведенные экспериментальные и теоретические исследования позволили оценить границу срыва капель с пленки в широкой области параметров.

На рис. 6 приведена карта условий экспериментов с жидкими пленками (без кристаллов в потоке), проведенных как другими исследователями [10], так и в настоящей работе. На этом рисунке $Re_l = h_l \langle u_l \rangle / \nu_l$ — число Рейнольдса пленки ($\langle u_l \rangle$ — среднее по толщине значение ее скорости, ν_l — кинематический коэффициент вязкости жидкости). Сплошная линия — граница капельного уноса воды с плоской пленки, найденная в экспериментах [10], см. многоугольник справа вверху. Ее экстраполяция в область более тонких пленок и меньших чисел Re_l (характерных для наших экспериментов), в которых также наблюдался срыв капель, показана штрихпунктирной линией.

Крест слева обозначает диапазон толщины пленки воды на полуцилиндрической носовой части модели при $\theta = 45^\circ$, а также разброс соответствующих значений Re_l . Расположенный рядом вертикальный отрезок — результат численного исследования параметров пленки при угловой координате $\theta = 90^\circ$ (рис. 5), на которой полуцилиндр стыкуется со следующим за ним плоским участком поверхности модели. В этом месте происходит скачкообразное изменение кривизны профиля (от $1/R$ до нуля) и возникает пик значений тангенциальной компоненты скорости газа, способствующие срыву капель.

На основе приведенных данных можно рекомендовать следующую интерполяцию для границы срыва капель:

$$\lg(h_l, \mu\text{m}) \approx A \lg^m Re_l + B,$$

$$A = 0.2, \quad m = 2, \quad B = 1.48.$$

Эта интерполяция позволяет сделать вывод, что унос массы в экспериментах происходит не только при отражении кристаллов, но и срывом капель с образовавшейся пленки.

Заключение

Исследовано взаимодействие ледяных кристаллов с моделью профиля крыла для случая изначально сухой нагретой поверхности и при наличии на ней текущей водяной пленки толщиной 35–70 μm . В первом случае только 0.2–2.2% массы соударяющихся кристаллов о поверхность превращается в воду, которая участвует в процессах испарения и формирования барьерного льда. Для оценки эффективности такого превращения введен безразмерный коэффициент K . Остальная часть массы кристаллов уносится с поверхности либо до плавления, либо после — при течении по поверхности в виде пленки воды.

При создании пленки воды на лобовой поверхности модели при MMD кристаллов 1.3 mm максимальное значение K увеличивается приблизительно в 18 раз при скорости 20 m/s, в 2 раза при скорости потока 45 m/s, а при 80 m/s значения K , наоборот, были меньше, чем в случае изначально сухой поверхности. При уменьшении MMD при всех скоростях потока наблюдалось увеличение коэффициента K . Это свидетельствует о том, что дополнительная пленка воды способствует удержанию кристаллов льда на поверхности, причем более мелкие кристаллы удерживаются более интенсивно.

Коэффициент K уменьшается с увеличением скорости потока как в случае сухой поверхности, так и в случае наличия на ней жидкой пленки. В обоих случаях наиболее вероятной причиной этого служит капельный унос воды, усиливающийся с увеличением скорости воздушного потока.

На основе развитой физико-математической модели проведены расчеты эволюции толщины, скорости и температуры пленки вдоль передней кромки экспериментальной модели, поперечно обтекаемой воздушным потоком. Вычисленные значения толщины пленки находятся в хорошем соответствии с измеренными.

Предложена полуэмпирическая интерполяция границы капельного уноса массы в широкой области значений толщины пленки и ее числа Рейнольдса.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10472).

Список литературы

- [1] *Messinger R.L.* // J. Aeronaut. Sci. 1953. Vol. 20. N 1. P. 29–42; doi:10.2514/8.2520
- [2] *Тенишев Р.Х., Строганов Б.А., Савин В.С., Кординов В.К., Тесленко А.И., Леонтьев В.Н.* Противообледенительные системы летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1967. 320 с.
- [3] *Стасенко А.Л., Толстых А.И., Ширококов Д.А.* // Изв. РАН. МЖГ. 2002. № 5. С. 180–190. (*Stasenko A.L., Tolstykh A.I., Shirobokov D.A.* Fluid Dynamics. 2002. N 5. P. 825–833); doi:10.1023/A:1021340923791
- [4] *Myers T.G., Charpin J.P.F., Chapman S.J.* // Phys. Fluids. 2002. Vol. 14. N 8. P. 2788–2803; doi:10.1063/1.1416186
- [5] *Mason J.G., Strapp J.W., Chow P.* / 44th AIAA Aerospace Sci. Meeting and Exhibit. 2006. AIAA-2006-206. 21 p; doi: 10.2514/6.2006-206
- [6] *Nilamdeen S., Habashi W.G.* // J. Propulsion and Power. 2011. Vol. 27. N 5. P. 959–969; doi:10.2514/1.834059
- [7] *Roisman I.V., Tropea C.* // Proc. Roy. Soc. A. 2015. Vol. 471. N 2183. P. 20150525. doi:10.1098/rspa.2015.0525
- [8] *Löwe J., Kintea D., Baumert A., Bansmer S., Roisman I.V.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. Vol. 745. N 3. P. 032013.
- [9] *Капица П.Л.* // ЖЭТФ. 1948. Т. 18. № 1. С. 3–18.
- [10] *Дейч М.Е., Филиппов Г.А.* Газодинамика двухфазных сред. М.: Энергоиздат, 1981. 472 с.
- [11] *Кашеваров А.В., Стасенко А.Л.* // ПМТФ. 2017. Т. 58. № 2. С. 103–114 *Kashevarov A.V., Stasenko A.L.* J. Appl. Mech. Techn. Phys. 2017. Vol. 58. N 2. P. 275–284. doi:10.1134/S0021894417020110
- [12] *Miller A.B., Potapov Yu.F., Stasenko A.L.* / 29th Congress Intern. Council Aeronaut. Sci. (ICAS). 2014. Paper 2014_0576. 3 p.
- [13] *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1979. 848 с.
- [14] *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 712 с.
- [15] *Жукаускас А.А.* Конвективный перенос в теплообменниках. М.: Наука, 1982. 472 с.