

УДК 532.62:536.421.4

## Влияние ледяных кристаллов на эволюцию барьерного льда на модели крыла \*

А.В. Кашеваров<sup>1</sup>, А.Б. Миллер<sup>1,2</sup>, Ю.Ф. Потапов<sup>1</sup>, А.Л. Стасенко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского,  
Жуковский, Московская область

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Москов. обл.

E-mail: a.v.kash@yandex.ru

Численно исследуется влияние ледяных кристаллов в воздушном потоке на эволюцию барьерного льда на поверхности модели крыла для условий эксперимента в аэрохолодильной трубе. Результаты подтверждают, что отмеченное в эксперименте изменение массы отложений льда при введении кристаллов в поток связано с поглощением пленкой воды, образующейся на поверхности твердого тела, части массы кристаллов при низких скоростях потока и с расплескиванием пленки при больших скоростях. В первом случае масса барьерного льда увеличивается, во втором — уменьшается.

**Ключевые слова:** обледенение, барьерный лед, жидкая пленка, ледяные кристаллы

### Введение

В последнее время активно изучается ранее не принимавшийся во внимание режим обледенения элементов конструкции летательного аппарата за счет кристаллов льда, представляющий угрозу для стабильной работы авиационного двигателя [1–6]. При полете в кристаллических и смешанных облаках, а также при наличии снежных осадков возможна ситуация, когда на теплых поверхностях, как правило в ядре компрессора турбореактивного двухконтурного двигателя, образуется водяная пленка. Она способствует захвату кристаллов льда поверхностью, которые охлаждают пленку и приводят к образованию наледи ниже по потоку в виде барьера. Такой лед в отечественной литературе принято называть барьерным. Он может возникать также на внешних аэродинамических поверхностях, снабженных термическими противообледенительными системами. Взаимодействие кристаллов льда с водяной пленкой представляет собой весьма сложное явление. Насколько известно авторам, законченной физико-математической модели для его описания не существует.

В работе [7] экспериментально исследовался процесс падения множества кристаллов льда на пленку воды на поверхности твердого тела, обтекаемого воздушным потоком.

---

\* Работа выполнена в рамках проекта MUSIC-haic программы HORIZON 2020 ЕС при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», уникальный идентификатор проекта RFMEFI62818X0010.

При скорости потока 20 м/с присутствие кристаллов льда приводило к увеличению, а при 80 м/с к уменьшению образующегося барьерного льда. При скорости потока 45 м/с наблюдались режимы как с увеличением, так и с уменьшением массы барьерного льда.

В настоящей работе экспериментальные результаты, полученные в [7], подвергаются численному анализу на основе математической модели [8], описывающей гидротермодинамику тонкой пленки в отсутствие кристаллов льда в потоке. Авторы дополнили модель учетом влияния кристаллов на эволюцию пленки, что позволило теоретически подтвердить обнаруженное в эксперименте поведение барьерного льда при больших и малых скоростях.

### Экспериментальные исследования

Эксперименты [7] проводились в аэрохолодильной трубе на макете крыла шириной 150 мм с хордой 205 мм, показанном на рис. 1. Профиль макета представлял собой две полуокружности с радиусами  $R = 15$  и  $10$  мм, соединенные отрезками прямых. Внутри модели располагался омический нагреватель в виде спирали, намотанной на цилиндрическую трубку. Ось трубки находилась на расстоянии  $r_0 = 9$  мм от передней кромки модели. Водяная пленка создавалась искусственно с помощью форсунки, установленной снизу на некотором расстоянии перед экспериментальной моделью.

Типичный вид барьерного льда, получаемого в результате экспериментов, также приведен на рис. 1. Его можно характеризовать двумя параметрами: массой  $G$  намерзшего льда и расстоянием  $L$  от начала плоской части модели. Эксперименты проводились парами. Первый эксперимент каждой пары выполнялся без кристаллов в воздушном потоке, второй — при тех же условиях (скорости потока  $V_\infty$ , мощности нагревателя  $P$ , продолжительности пуска  $\tau = 60$  с, температуре, близкой к температуре окружающей среды  $T_\infty$ ), но с добавлением кристаллов в поток через Г-образную трубку. В экспериментах кроме массы  $G$  и расстояния  $L$  измерялась температура поверхности модели  $T_s$  с помощью термопар.

Полученные данные представлены в таблице. Параметры экспериментов и измеренные величины приведены в левой ее части. Цифрами со штрихами обозначены номера пусков с кристаллами в потоке. Кристаллы образовывались в результате измельчения ледяного блока и представляли собой частицы нерегулярной формы со средним диаметром шара идентичного объема  $0,99$  мм. Массовая концентрация кристаллов IWC в потоке в большинстве пусков составляла  $11$  г/м<sup>3</sup>, в пуске 3' IWC =  $5,4$  г/м<sup>3</sup>, в 5' —  $5$  г/м<sup>3</sup>.

Для наглядности некоторые данные таблицы изображены графически на рис. 2. Видно, что введение кристаллов в поток вне зависимости от его скорости приводило

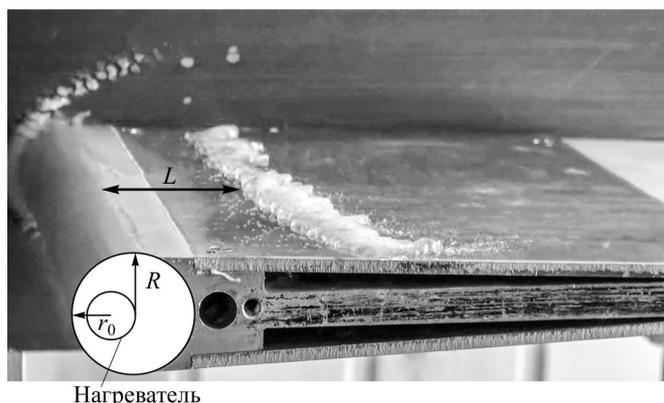


Рис. 1. Характерный вид барьерного льда на поверхности модели крыла.

Таблица

## Экспериментальные и расчетные данные

№ пусков	Экспериментальные данные						Величины, используемые или полученные в расчете					
	$V_{\infty}$ , м/с	$T_{\infty}$ , °C	$P$ , Вт	$T_s$ , °C	$L$ , мм	$G$ , г	$G$ , г	$T_{pl}$ , °C	$q_{10}^+$ , Вт/см <sup>2</sup>	$\rho_{pl}$ , г/м <sup>3</sup>	$\rho_{pl}$ , г/м <sup>3</sup>	$\kappa$
1	80	-11,7	250	13,4	46	3,3	3,3	18,5	0,88	1,4	0	7,3
1'		-11,9		8,8	16	2,0	2,6				0,087	
2		-9,9	233	12,7	55	2,9	2,9				0	
2'		-11,2		6,2	26	1,2	1,1				0,113	
3		-10,9	214	11,1	41	2,2	2,2				0	
3'	-10,9	5,8		25	1,2	0,5	0,079	8,0				
4	-10,5	199	8,5	41	3,9	3,9	0					
4'	-11,0		3,0	17	2,1	3,6	0,117	5,5				
5	20	-13,7	136	6,4	43	4,2	4,2	11,1	0,07	9,1	0	0
5'		-13,6		3,8	32	7,7	5,2				2,41	

к охлаждению поверхности экспериментальной модели и сдвигу ледяного барьера вперед (рис. 2а), масса же отложений льда изменялась по-разному. Она увеличивалась при скорости потока  $V_{\infty} = 20$  м/с и уменьшалась при  $V_{\infty} = 80$  м/с (рис. 2б). Такое поведение барьерного льда подтверждено на основе численных исследований, проведенных в рамках разработанной физико-математической модели, которая приводится ниже.

## Физико-математическая модель и численные исследования

В основе модели лежат уравнения пограничного слоя, осредненные по толщине пленки. Эта модель сначала разрабатывалась для пленки на поверхности кругового цилиндра, которая создавалась путем введения воды через горизонтальную щель, совпадающую с передней критической линией цилиндра [9]. Пленка при этом получалась достаточно толстой, способной нести полностью поглощенные ею частицы. В работе [7] модель была модифицирована для случая создания пленки каплями воды, распыленными

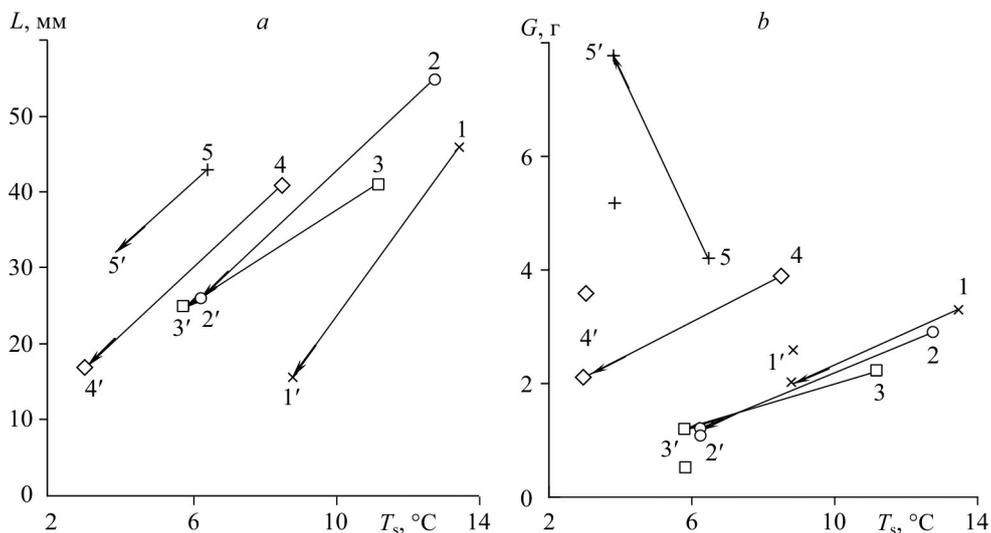


Рис. 2. Изменение расстояния барьера от начала плоского участка модели (а) и массы намерзшего льда (б) при введении кристаллов.

Цифры соответствуют номерам пусков из таблицы; линии со стрелками указывают изменения в эксперименте; отдельные маркеры на фрагменте «б» — результаты расчета.

форсункой. Дальнейшее развитие она получила в исследовании [8], где была прослежена эволюция барьерного льда в отсутствии кристаллов в потоке. В настоящей работе теоретическая модель [8] расширена учетом бомбардировки пленки кристаллами.

Приведенные в работе [8] численные результаты показали, что пленка на поверхности макета крыла, использованного в экспериментах [7], была довольно тонкой: ее толщина не превышала 50 мкм. Поэтому можно предполагать, что лишь небольшая доля массы кристаллов проникает в такую пленку при ударе, который вызывает ее расплескивание. Система уравнений [7] примет вид

$$\begin{aligned} \rho_l dh_1 \langle u_1 \rangle / ds &= -\rho_l \partial h_1(s, t) / \partial t - \dot{m}_v + \dot{m}_l + \dot{m}_i - \dot{m}_{sp}, \\ 0 &= -h_1 dp/ds + \tau_a - \tau_s + \dot{m}_l u_{pl} + (\dot{m}_i - \dot{m}_{sp}) u_{pi}, \\ \rho_l c_l dh_1 \langle u_1 T_1 \rangle / ds &= q_1^+ - q_a - \dot{m}_v L_v - c_l T_f \rho_l \partial h_1(s, t) / \partial t + \dot{m}_l (V_{pl}^2 / 2 + c_l T_{pl}) + \\ &+ \dot{m}_i (V_{pi}^2 / 2 + c_l T_{pi}) - \dot{m}_{sp} c_l T_1^+, \\ \frac{\partial h_1(s, t)}{\partial t} &= \begin{cases} 0, & T_1^- > T_f, \\ (|q_1^+| + |q_1^-|) / \rho_l L_i, & T_1^- = T_f, \end{cases} \\ h_1(s) &= \frac{\partial h_1(s, t)}{\partial t} \int_{s_f}^s \frac{ds}{\langle u_1 \rangle}, \end{aligned}$$

здесь  $\rho_l, \rho_i$  — плотности жидкости (воды) и льда,  $h_1, h_i$  — толщины пленки и наледи,  $\langle u_1 \rangle$  — средняя скорость пленки,  $s$  — криволинейная координата вдоль поверхности обтекаемого тела,  $t$  — время,  $\dot{m}_v, \dot{m}_l, \dot{m}_i, \dot{m}_{sp}$  — плотности потоков испаряющейся массы пленки, прибывающих в пленку капель, внедряющихся в нее обломков кристаллов льда и уноса массы пленки за счет расплескивания кристаллами;  $p$  — давление в пленке,  $\tau_a, \tau_s$  — сдвиговые напряжения на верхней и нижней границах пленки,  $u_{pl}, u_{pi}$  — касательные к поверхности компоненты скорости налетающих на тело частиц водяного распыла и кристаллов,  $c_l, c_i$  — теплоемкости воды и льда,  $\langle u_1 T_1 \rangle$  — осредненное по толщине пленки произведение ее скорости на температуру  $T_1$ ;  $q_a, q_1^+, q_1^-$  — соответственно плотности тепловых потоков в воздух с верхней границы пленки, с поверхности тела (или наледи) в пленку и из пленки в образующийся слой льда,  $L_v, L_i$  — теплоты фазовых переходов вода–пар и вода–лед,  $V_{pl}, V_{pi}$  — модули скоростей частиц воды и льда при ударе о пленку,  $T_{pl}, T_{pi}, T_f, T_1^+, T_1^-$  — температуры частиц водяного распыла и кристаллов, замерзания воды, верхней и нижней границ пленки;  $s_f$  — координата, при которой начинается замерзание пленки.

При определении плотности потоков  $\dot{m}_l$  и  $\dot{m}_i$ , как и в работе [8], предполагалось, что скорости  $V_{pl}$  и  $V_{pi}$  совпадают с  $V_\infty$ . Поэтому траектории частиц считаем прямыми, а плотности потоков масс принимаем отличными от нуля лишь на фронтальной полуцилиндрической части экспериментальной модели, тогда

$$\dot{m}_{l,i} = \rho_{pl,pi} V_\infty \cos(s/R), \quad s/R \leq \pi/2,$$

где  $\rho_{pl,pi}$  — массовые концентрации капель вблизи модели и обломков кристаллов, внедрившихся в пленку.

Для вычисления плотности потока испаряющейся массы воды использовалась тройная аналогия Рейнольдса. Плотности потоков разбрызганной и внедрившейся в пленку масс  $\dot{m}_{sp}$  и  $\dot{m}_i$  предполагались пропорциональными друг другу ( $\dot{m}_{sp} = \kappa \dot{m}_i$ ).

Было принято, что температура кристаллов  $T_{pi}$  равна температуре набегающего воздушного потока  $T_\infty$ . Необходимые для решения системы распределения  $\tau_a(s)$  и коэффициента теплоотдачи пленки в воздух  $\alpha_a(s)$ , от которого зависит  $q_a$ , были ранее найдены в работе [8].

Распределение теплового потока  $q_1^+(s)$  от нагревателя вдоль поверхности профиля задавалось по закону

$$q_1^+(s) = Q_0 \cdot (\mathbf{r}, \mathbf{n}) / r^2 \sim 1/r,$$

где  $\mathbf{r}$  — радиус-вектор, проведенный из центра нагревателя к контуру модели крыла,  $\mathbf{n}$  — нормаль к контуру модели крыла, значение  $Q_0$  мощности нагревателя на единицу его длины подбиралось при расчете. Работа подогревателя позволяет имитировать антиобледенительный режим передней кромки крыла. При этом температура поверхности ниже по течению остается отрицательной. Метод решения приведенной выше системы уравнений подробно описывался в работе [8].

Расчеты эволюции барьерного льда проведены для условий экспериментов, представленных в таблице. Температура  $T_s$  соответствует начальному значению  $T_1^-$  в теоретической модели. Остановимся на режиме со скоростью  $V_\infty = 80$  м/с без кристаллов в потоке (пуски 1–4). При проведении расчетов барьерного льда при значениях  $T_\infty$ , указанных в таблице, подбирались не измеряемые в эксперименте величины  $\rho_{pi}$ ,  $T_{pi}$  и  $q_{10}^+$  так, чтобы в результате вычислений получились значения  $G$ ,  $T_s$  и  $L$ , зафиксированные в эксперименте. Подобранные величины приведены в правой части таблицы. Отметим, что взаимодействие капель с нагретой поверхностью представляет собой сложное физическое явление. Здесь  $T_{pi}$  следует рассматривать как некоторую фиктивную величину, позволяющую регулировать температуру пленки.

После того, как значения  $T_{pi}$  и  $q_{10}^+$  в каждом пуске без кристаллов были найдены, при этих значениях проводились расчеты барьерного льда с кристаллами в потоке. В этой серии расчетов подбиралось значение концентрации внедрившихся в пленку кристаллов  $\rho_{pi}$  так, чтобы значение температуры  $T_s$  соответствовало экспериментальному. Если коэффициент расплескивания пленки  $\kappa = 0$ , то расстояние  $L$  оказывается больше, чем в эксперименте. Увеличение коэффициента  $\kappa$  приводит к смещению барьера вперед. Это позволяет найти такое значение  $\kappa$ , при котором экспериментальные и расчетные значения  $L$  совпадают.

Расчитанные профили барьерного льда для пусков 2, 2', для которых удалось получить наилучшее согласие между расчетом и экспериментом, представлены на рис. 3а. Масса отложений льда, найденная в предположении движения пленки по всему размаху

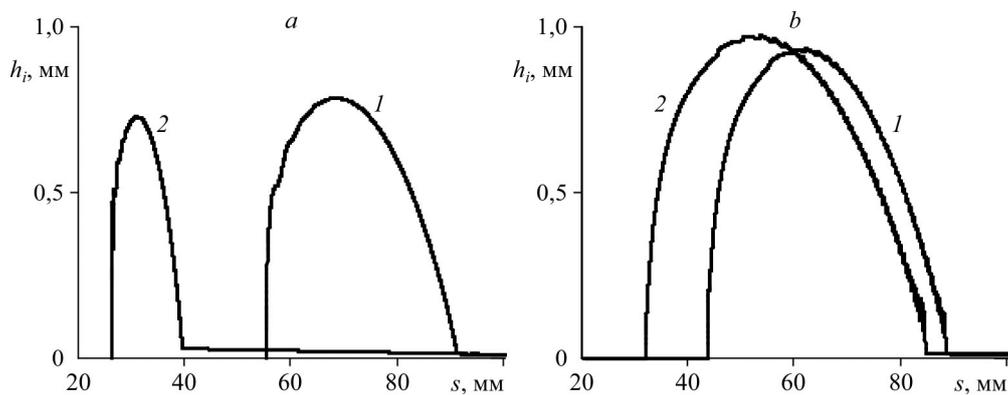


Рис. 3. Толщина слоя льда на поверхности модели в момент времени с начала пуска  $t = 60$  с при  $V_\infty = 80$  (а) и 20 (б) м/с без кристаллов (1) и с кристаллами (2) в потоке.

Координата  $s$  отсчитывается от начала плоского участка модели крыла.

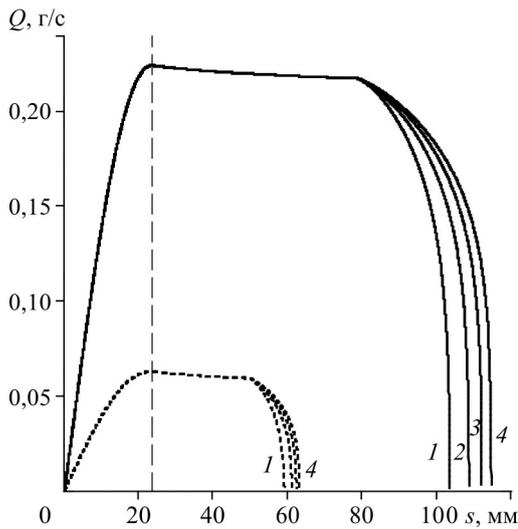


Рис. 4. Изменение массового расхода воды в пленке по обводу профиля для пусков 2, 2'. Момент времени с начала пуска:  $t = 15$  (1), 30 (2), 45 (3), 60 (4) с; сплошные кривые — поток без кристаллов, пунктирные — с кристаллами.

макета крыла, уменьшается по сравнению со случаем отсутствия кристаллов, но несколько отличается от измеренной в эксперименте (см. таблицу и рис. 2b). Это связано с неравномерностью намерзания барьерного льда вдоль размаха модели крыла (что сказывается на точности измерения  $L$ ) и с отсутствием данных о действительном распределении теплового потока по профилю.

На рис. 4–8 представлены результаты расчета параметров пленки как в отсутствии, так и при наличии кристаллов в потоке для пусков 2, 2'. На рис. 4 показано изменение расхода воды в пленке. Его значение максимально на передней границе плоской части профиля и составляет 0,22 для случая без кристаллов и 0,06 г/с для случая с кристаллами в потоке. Значительное уменьшение расхода объясняется расплескиванием пленки кристаллами. Как видно из рис. 4, после достижения максимального значения расход  $G$  медленно уменьшается, что связано с испарением воды с поверхности пленки. Дальнейшее резкое его уменьшение обусловлено замерзанием пленки.

На рис. 4–8 представлены результаты расчета параметров пленки как

в отсутствии, так и при наличии кристаллов в потоке для пусков 2, 2'. На рис. 5 показано изменение толщины пленки. Она растет на полусферической части модели за счет прибывающей массы капель, образующих пленку. Затем кривые резко обрываются вниз вследствие отвердевания пленки. Наличие кристаллов в потоке уменьшает толщину пленки. На рис. 6 представлено распределение скорости верхней границы пленки. Видны характерный максимум на лобовой части профиля и монотонное уменьшение скорости к кормовой части.

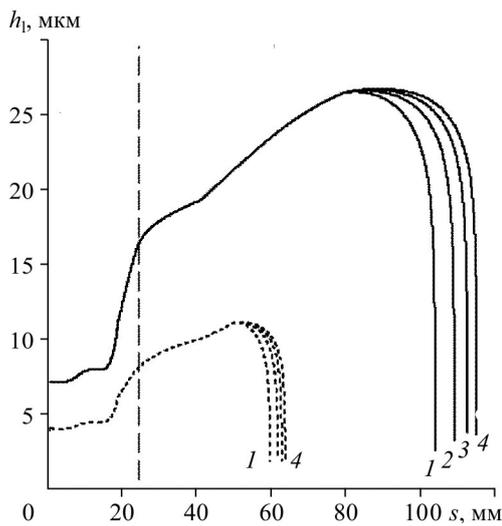


Рис. 5. Толщина пленки для пусков 2, 2'. Обозначения см. на рис. 4.

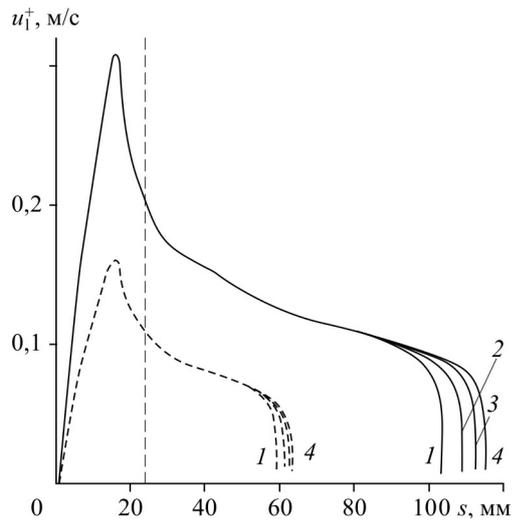


Рис. 6. Скорость верхней границы пленки для пусков 2, 2'. Обозначения см. на рис. 4.

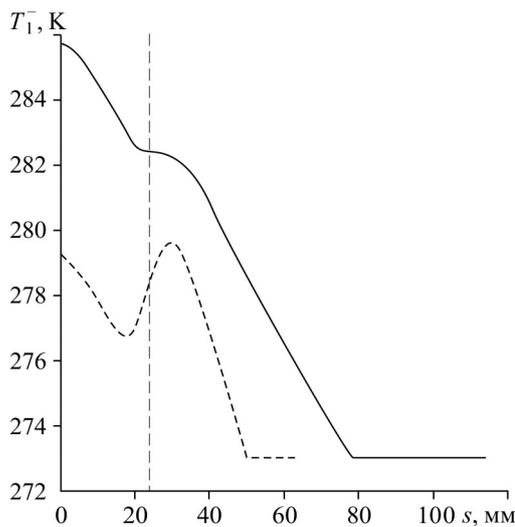


Рис. 7. Температура нижней границы пленки при  $t = 60$  с.

Сплошная кривая — поток без кристаллов, штриховая — с кристаллами.

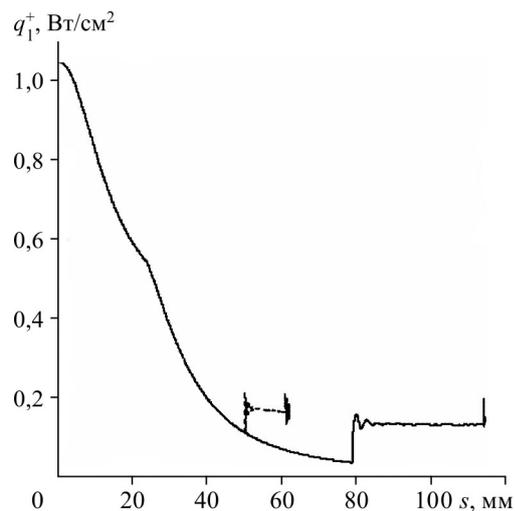


Рис. 8. Распределения по обводу профиля плотности теплового потока в пленку с поверхности профиля с наледью в момент времени  $t = 60$  с.

Всплеск на отрезке  $s \sim 50\text{--}60$  мм соответствует обледенению в присутствии кристаллов.

На рис. 7 показано изменение температуры нижней границы пленки в конце процесса образования барьерного льда. Бомбардировка пленки кристаллами приводит к понижению температуры пленки. Максимум температуры в начале плоского участка макета крыла вызван работой нагревателя. На рис. 8 приведено распределение плотности потока тепла в тот же момент времени что и на рис. 7. Плотность теплового потока постепенно уменьшается, а затем резко возрастает, что связано с выделением тепла кристаллизации при замерзании пленки.

Аналогичная процедура подбора параметров проводилась для пусков 5, 5' при  $V_\infty = 20$  м/с. Однако при расчете барьерного льда с кристаллами в потоке даже при  $\kappa = 0$  ледяной барьер сильно сдвигается вперед и рассчитанное значение  $L$  оказывается меньше экспериментального. Сдвиг барьера назад можно обеспечить, увеличив температуру  $T_{p1}$  с одновременным увеличением концентрации  $\rho_{p1}$  так, чтобы температура  $T_s$  осталась неизменной. При этом масса отложений льда  $G$  увеличивается. Рассчитанные профили барьерного льда для этого случая приведены на рис. 3b.

### Заключение

Расчеты показали, что при относительно большой скорости потока лишь небольшая доля массы кристаллов, соответствующая  $\rho_{p1} \approx 0,1$  г/м<sup>3</sup>, внедряется в пленку. Среднее значение коэффициента распыливания пленки  $\kappa \approx 7,5$  (см. последний столбец таблицы). При малых скоростях разбрызгивание пленки практически исчезает, и значительно большее количество кристаллов может проникнуть в пленку. Это можно объяснить ее большей толщиной.

Отметим, что при большом количестве кристаллических остатков, внедрившихся в пленку, которое наблюдается при малых скоростях воздушного потока, течение пленки следует рассматривать уже как двухфазный поток с тающими частицами льда (см. [9]). Это потребует усложнения использованной в настоящей работе теоретической модели.

### Список литературы

1. **Villedieu P., Trontin P., Aouizerate G., Bansmer S., Vanacore P., Roisman I., Tropea C.** MUSIC-Haic: 3D multidisciplinary tools for the simulation of in-flight icing due to high altitude ice crystals // SAE Int. J. Adv. and Curr. Prac. In Mobility. 2020. Vol. 2, No. 1. P. 78–89.
2. **Bucknell A., McGilvray M., Gillespie D., Jones G., Collier B.** A three-layer thermodynamic model for ice crystal accretion on warm surfaces: EMM-C // SAE Technical Paper. 2019. No. 2019-01-1963. 12 p.
3. **Bartkus T.P., Tsao J.C., Struk P.M.** Analysis of experimental ice accretion data and assessment of a thermodynamic model during ice crystal icing // SAE Technical Paper. 2019. No. 2019-01-2016. 19 p.
4. **Nilamdeen S., Rao V.S., Switchenko D., Selvanayagam J., Ozcer I., Baruzzi G.S.** Numerical simulation of ice crystal accretion inside an engine core stator // SAE Technical Paper. 2019. No. 2019-01-2017. 12 p.
5. **Trontin P., Villedieu P.** A comprehensive accretion model for glaciated icing conditions // Intern. J. Multiphase Flow. 2018. Vol. 108. P. 105–123.
6. **Norde E., van der Weide E.T.A., Hoesjmakers H.W.M.** Eulerian method for ice crystal icing // AIAA J. 2018. Vol. 56, No. 1. P. 222–234.
7. **Кашеваров А.В., Левченко В.С., Миллер А.Б., Потапов Ю.Ф., Стасенко А.Л.** К гидротермодинамике обледенения профиля в воздушно-кристаллическом потоке // Журнал технической физики. 2018. Т. 88, вып. 6. С. 808–814.
8. **Кашеваров А.В., Стасенко А.Л.** Эволюция пленки воды и барьерного льда на поверхности тела при плоском обтекании воздушным потоком // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26, № 2. С. 237–245.
9. **Кашеваров А.В., Стасенко А.Л.** Гидродинамика жидкой пленки с кристаллами на поверхности тела в потоке воздуха, содержащем частицы льда // Прикл. механика и технич. физика. 2017. Т. 58, № 2. С. 103–114.

*Статья поступила в редакцию 18 февраля 2020 г.,  
после доработки — 2 октября 2020 г.,  
принята к публикации 7 октября 2020 г.*