

ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

2.9.1 – Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте;

2.9.4. – Управление процессами перевозок;

2.9.6 – Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники;

2.9.8 – Интеллектуальные транспортные системы

УДК 629.7.07

DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-4-8-20

Определение наиболее опасных режимов полета летательных аппаратов в условиях обледенения

С.Р. Боков¹, В.В. Ефимов¹

*¹Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия*

Аннотация: В данной работе объектом исследования является обледенение поверхностей воздушных судов при полете в атмосфере. На многих легких летательных аппаратах, а также на беспилотных воздушных судах массой менее 30 кг отсутствуют бортовые противобледенительные системы. Тем не менее с данными летательными аппаратами происходят авиационные события, которые являются следствием их обледенения. Поэтому определение наиболее опасных режимов полета летательных аппаратов в условиях обледенения является актуальной задачей. Ввиду высокой стоимости проведения летных испытаний и невозможности охвата всех возможных событий из-за их потенциальной опасности, сложности создания условий полета воздушных судов в условиях обледенения на земле в настоящем исследовании был использован метод математического моделирования. Для решения поставленной задачи в рамках работы проведен анализ норм летной годности гражданских легких самолетов, самолетов транспортной категории, винтокрылых аппаратов нормальной и транспортной категории, проведено исследование влияния различных параметров на толщину нарастания льда с помощью вычислительного эксперимента, проведенного на разработанном авторами статьи программном обеспечении. На основе результатов вычислительного эксперимента были получены зависимости толщины льда от различных параметров обледенения, была разработана методика определения сочетания высот и скоростей полета воздушного судна, при которых на поверхности летательных аппаратов при прочих равных условиях образуется лед наибольшей толщины. Обладание данной информацией позволит экипажу летательного аппарата и специалистам по управлению воздушным движением избегать наиболее опасных режимов полета с точки зрения обледенения.

Ключевые слова: обледенение воздушных судов, математическая модель, вычислительный эксперимент, летная эксплуатация.

Для цитирования: Боков С.Р., Ефимов В.В. Определение наиболее опасных режимов полета летательных аппаратов в условиях обледенения // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 4. С. 8–20. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-4-8-20

Determination of the most dangerous flight modes of aircraft in icing conditions

S.R. Bokov¹, V.V. Efimov¹

¹Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

Abstract: In this paper, the object of research is the icing of aircraft surfaces during flight in the atmosphere. On many light aircraft, as well as on unmanned aircraft weighing less than 30 kg, there are no on-board de-icing systems. Nevertheless, aviation events occur with these aircraft, which are a consequence of their icing. Therefore, determining the most dangerous flight modes of

aircraft in icing conditions is an urgent task. In view of the high cost of conducting flight tests and the impossibility of covering all possible events due to their potential danger, the complexity of creating flight conditions for aircraft in icing conditions on the ground, the mathematical modeling method was used in this study. To solve this problem, the analysis of the airworthiness standards of civil light aircraft, transport category aircraft, rotorcraft of normal and transport category was carried out within the framework of the work, the influence of various parameters on the thickness of ice build-up was investigated using a computational experiment conducted on the software developed by the authors of the article. On the basis of the results of the computational experiment, the dependences of the ice thickness on various icing parameters were obtained, a method was developed for determining the combination of heights and flight speeds of an aircraft, at which ice of the greatest thickness is formed on the surface of aircraft, other things being equal. Possession of this information will allow the aircraft crew and air traffic control specialists to avoid the most dangerous flight modes in terms of icing.

Key words: icing, mathematical model, computational experiment, flight operation.

For citation: Bokov, S.R., Efimov, V.V. (2023). Determination of the most dangerous flight modes of aircraft in icing conditions. Civil Aviation High Technologies, vol. 26, no. 4, pp. 8–20. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-4-8-20

Введение

Обледенение летательных аппаратов (ЛА) на протяжении всей истории их эксплуатации, включая настоящее время, является одним из наиболее опасных факторов [1–8]. Образование льда на поверхностях ЛА может привести к различным неблагоприятным последствиям. Обледенение несущих поверхностей ЛА приводит к изменению их обтекания и, как следствие, к изменению аэродинамических характеристик ЛА, его устойчивости и управляемости, дальности и продолжительности полета, а также к увеличению расхода топлива. Ледообразование на воздухозаборниках авиационных газотурбинных двигателей может приводить к изменению газодинамических параметров во всех узлах двигателя и повреждению конструкции двигателя вследствие попадания отколовшегося льда в проточную часть. Обледенение датчиков, установленных на ЛА, приводит к получению летным экипажем ложных параметров полета.

Для предотвращения обледенения частей ЛА в полете разработаны бортовые противообледенительные системы (ПОС). При работе ПОС, в зависимости от ее типа, потребляет электрическую или механическую энергию. В обоих случаях для надежной работы системы необходимо увеличивать расход топлива, что снижает эффективность эксплуатации. Поэтому в настоящее время на самолетах транспортной категории пытаются отказываться от использования ПОС за счет улучшения аэродинамических характеристик, например на самолете Ту-204 [9], что не проти-

воречит требованиям, изложенным в нормах летной годности как самолетов, так и винтокрылах аппаратов транспортной категории^{1,2}.

Существуют также ЛА, не оборудованные ПОС^{3,4}, которые могут непреднамеренно совершать полеты в условиях обледенения, например легкие самолеты и вертолеты, многие типы беспилотных ЛА.

В связи с этим актуальной задачей является прогнозирование обледенения при заданных погодных условиях, то есть определение режимов полета, при которых обледенение будет наиболее интенсивным, чтобы при планировании по возможности избегать выполнения полета на данных режимах.

Для получения информации о влиянии параметров полета на обледенение в прогнозируемых погодных условиях можно использовать экспериментальный и теоретический подходы.

Недостатками первого подхода являются высокая стоимость проведения летных испытаний и невозможность охвата всех возможных событий из-за их потенциальной опасно-

¹ Авиационные правила, часть 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории. СПб.: СЗ РЦАИ, 2015. 292 с.

² Авиационные правила, часть 29. Нормы летной годности винтокрылых аппаратов транспортной категории. М.: Авиаиздат, 2003. 130 с.

³ Авиационные правила, часть 23. Нормы летной годности гражданских легких самолетов. М.: Авиаиздат, 2014. 195 с.

⁴ Авиационные правила, часть 27. Нормы летной годности винтокрылых аппаратов нормальной категории. М.: Авиаиздат, 2014. 125 с.

сти. В связи с этим наиболее эффективным представляется рациональное сочетание экспериментального и теоретического подходов. Под теоретическим подходом имеется в виду математическое моделирование. Настоящая работа посвящена определению наиболее опасных режимов полета ЛА с точки зрения обледенения с применением метода математического моделирования.

Методы и методология исследования

Обледенение ЛА вызвано наличием в атмосфере воды в капельно-жидком состоянии (в виде облака) и отрицательной температурой воздуха.

Основными метеорологическими параметрами, влияющими на обледенение, являются [10–17]:

- температура;
- влажность воздуха (масса воды в виде капель, содержащихся в единице объема воздуха);
- размер водяных капель;
- размеры облака (зоны обледенения).

Рассмотрим тепловые потоки у поверхности (подложки), подверженной обледенению, без учета работы ПОС и других мероприятий.

Существует множество математических моделей обледенения, описанных, например, в работах [10–12, 15–18]. В настоящей работе использована модель Майерса, описанная в работе [19].

Количественно тепловые потоки будем оценивать плотностями тепловых потоков Q , то есть тепловыми потоками, отнесенными к единице площади поверхности и имеющими, соответственно, размерность $Вт/м^2$. На рис. 1 показана схема тепловых потоков, рассматриваемых в вышеупомянутой модели Майерса.

Подвод тепла к поверхности обеспечивается за счет:

- перехода кинетической энергии прибывающих капель воды в тепло – Q_k ;
- выхода скрытой теплоты кристаллизации воды – Q_l ;
- аэродинамического нагрева (за счет трения в пограничном слое) – Q_a .

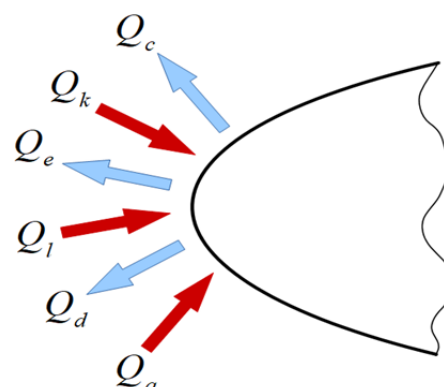


Рис. 1. Схема тепловых потоков на поверхности в условиях обледенения

Fig. 1. Heat transfer scheme next to surface in icing conditions

Отвод тепла от поверхности обеспечивается за счет:

- конвективного теплового потока от поверхности в воздух – Q_c ;
- испарения воды (или сублимации льда, если на поверхности имеется лед без слоя воды на нем) – Q_e ;
- охлаждения за счет прибывающих капель воды – Q_d .

Таким образом, уравнение теплового баланса можно записать так:

$$Q_k + Q_l + Q_a - Q_c - Q_e - Q_d = 0. \quad (1)$$

В настоящей работе рассматривается только процесс нарастания льда на подложке с заданной и неизменной температурой при условии попадания на нее капель воды, причем в одномерной постановке в соответствии с математической моделью Майерса. Модель Майерса позволяет моделировать процесс нарастания льда во времени в зависимости от множества параметров (влажность, скорость набегающего потока воздуха, температура воздуха, и др.). При этом принимается, что сначала частицы воды, попадая на подложку, мгновенно застывают, образуя ледяной слой, который имеет пористую структуру. Такой лед будем называть, соответственно, пористым. Спустя какое-то время поступающие капли воды из-за ограниченной теплопроводности льда не могут сразу перейти в твердую фазу и остаются некоторое время на

поверхности льда в виде воды, которая постепенно превращается в стекловидный лед.

В расчетах следует учитывать, что если выполняется следующее условие, то лед вообще не образуется:

$$T_f - T_s \leq 0, \quad (2)$$

где T_f, T_s – температура фазового перехода и подложки соответственно, [K].

Ниже рассматриваются только случаи, когда данное условие (2) не выполняется.

Тогда на первом этапе, как указано выше, образуется пористый лед, толщину которого можно определить по формуле

$$B = \frac{\beta W G}{\rho_i} t, \quad (3)$$

где $\beta = \frac{m_b}{W G c_{max}}$ – коэффициент улавливания;

m_b – масса воды, попавшей на единицу длины (например, размаха крыла) в секунду, [кг/(с·м)];

W – скорость набегающего потока воздуха, [м/с];

G – водность воздуха, [кг/м³];

c_{max} – максимальная толщина тела по вертикали (например, максимальная толщина профиля крыла), [м];

ρ_i – плотность пористого льда, [кг/м³];

t – время экспозиции, [с].

Далее необходимо проверить следующее условие:

$$\beta W G L_F + [Q_a + Q_k - (q_c + q_d + q_e)(T_f - T_a)] \leq 0, \quad (4)$$

где L_F – скрытая теплота кристаллизации, [Дж/кг];

$Q_a = \frac{r \bar{H}_{aw} W^2}{2 c_a}$ – плотность теплового потока из-за аэродинамического нагрева, [Вт/м²];

r – коэффициент восстановления, который отражает неравномерность аэродинамического нагрева обтекаемой поверхности ($r < 1$);

\bar{H}_{aw} – коэффициент теплопередачи между воздухом и поверхностью воды, [Вт/(м²·К)];

c_a – удельная теплоемкость воздуха, [Дж/(кг·К)];

$Q_k = \frac{\beta G W^3}{2}$ – плотность теплового потока из-за перехода кинетической энергии прибывающих капель воды в тепло, [Вт/м²];

$q_c = \bar{H}_{aw}$ – относительная плотность конвективного теплового потока от поверхности в воздух, [Вт/(м²·К)];

$q_d = \beta W G c_w$ – относительная плотность теплового потока из-за охлаждения за счет пребывающих капель воды, [Вт/(м²·К)];

c_w – удельная теплоемкость воды, [Дж/(кг·К)];

$q_e = \chi e_0$ – относительная плотность теплового потока из-за испарения воды, [Вт/(м²·К)];

χ – коэффициент испарения, [м/с];

e_0 – коэффициент в функции испарения, [Па/К];

T_a – температура воздуха, [K].

Если условие (4) выполняется, то будет образовываться только пористый лед без последующего появления воды на его поверхности, которая могла бы затем превратиться в стекловидный лед. Соответственно, в этом случае толщину льда в зависимости от времени экспозиции можно определить по формуле (3).

Если же условие (4) не выполняется, то в какой-то момент времени на поверхности пористого льда появится вода, которая потом будет замерзать и превращаться в стекловидный лед.

Толщину пористого льда в момент первого появления воды на его поверхности можно определить по формуле

$$B_g = \frac{k_i(T_f - T_s)}{\beta W G L_F + [Q_a + Q_k - (q_c + q_d + q_e)(T_f - T_a)]}, \quad (5)$$

где k_i – теплопроводность льда, [Вт/(м·К)].



Рис. 2. Распределение опасных скоростей по высоте полета
Fig. 2. Flight altitude dangerous velocities distribution

Для расчета общей толщины льда B (пористого и наросшего на нем стекловидного) в зависимости от времени экспозиции можно использовать следующее выражение:

$$B = \frac{1}{\rho_g L_F} \int_0^t \left(\frac{k_i(T_f - T_s)}{B} - k_w \rho_w \frac{Q_a + Q_k - (q_c + q_d + q_e)(T_f - T_a)}{k_w \rho_w + [\beta W G(t - t_g) - \rho_g(B - B_g)](q_c + q_d + q_e)} \right) dt, \quad (6)$$

где ρ_g, ρ_w – плотность стекловидного льда и воды соответственно, [кг/м³];

$t_g = \frac{\rho_i B_g}{\beta W G}$ – время от начала экспозиции до первого появления воды на наросшем пористом льду, [с];

k_w – теплопроводность воды, [Вт/(м·К)].

Адекватность данной математической модели подтверждается в работе Майерса [19].

Для удобства расчетов авторами настоящей работы было создано соответствующее программное обеспечение (ПО) ice_1D, позволяющее моделировать процесс обледенения в зависимости от заданных начальных условий, а также определять опасные скорости и высоты полета. Опасной скоростью полета на данной высоте будем считать такую скорость, при которой при прочих равных условиях толщина образовавшегося льда бу-

дет наибольшей, поэтому для каждой скорости полета, начиная с нуля, с заданным шагом в отдельном цикле рассчитывается наибольшая толщина льда, который образуется на подложке при заданных условиях и времени пребывания в зоне обледенения (времени экспозиции t). Таким образом, в результате вычислительного эксперимента получается зависимость опасных скоростей от высоты полета (рис. 2).

Приложение ice_1D позволяет также на заданной высоте полета определить диапазон наиболее опасных скоростей полета при заданной величине отклонения скорости от опасной (рис. 3).

Кроме того, данное ПО позволяет получить графическую зависимость толщины льда от времени экспозиции при заданных начальных условиях (рис. 4).



Рис. 3. Определение диапазона опасных скоростей полета
Fig. 3. Determination of the dangerous flight speeds range



Рис. 4. Зависимость толщины льда от времени экспозиции
Fig. 4. Dependence of ice thickness on exposure time

Результаты исследования и их обсуждение

Для проведения численного моделирования с помощью приложения ice_1D были взяты исходные данные, которые представлены ниже в табл. 1 и 2. Для табл. 1 данные взяты

из работы [19], для табл. 2 – из аэрологической диаграммы, публикуемой на интернет-ресурсе⁵, по состоянию на 1 января 2020 г.

⁵ Аэрологические диаграммы [Электронный ресурс] // flymeteo.org. URL: www.flymeteo.org (дата обращения: 03.11.2022).

Таблица 1
Table 1

Исходные данные
Initial data

№	Величина	Обозначение	Размерность	Значение
1	Удельная теплоемкость воздуха	c_a	Дж/(кг·К)	1014
2	Удельная теплоемкость воды	c_w	Дж/(кг·К)	4218
3	Коэффициент функции испарения	e_0	Па/К	27,03
4	Коэффициент теплопередачи между воздухом и поверхностью воды	\bar{N}_{aw}	Вт/(м ² ·К)	500
5	Теплопроводность льда	k_i	Вт/(м·К)	2,18
6	Теплопроводность воды	k_w	Вт/(м·К)	0,571
7	Скрытая теплота плавления льда (кристаллизации)	L_F	Дж/кг	334400
8	Коэффициент улавливания водяных капель исследуемой поверхностью	β	–	0,55
9	Плотность стекловидного льда	ρ_g	кг/м ³	917
10	Плотность пористого льда	ρ_i	кг/м ³	880
11	Плотность воды	ρ_w	кг/м ³	1000
12	Коэффициент испарения	χ	м/с	11
13	Температура фазового перехода	T_f	К	273,15
14	Коэффициент восстановления	r	–	0,5

Зондирование было проведено в Москве в 12:00 по московскому времени.

С использованием приложения ice_1D проведено определение:

- диапазона опасных скоростей для заданных высот;
- влияния высоты полета на толщину льда при прочих равных условиях;
- влияния температуры поверхности на зависимость толщины льда от скорости полета;
- влияния температуры поверхности на распределение опасных скоростей по высотам полета;
- влияния температуры поверхности на опасную скорость полета и наибольшую толщину льда;
- влияния влажности облака на толщину льда и опасные скорости полета;
- влияния влажности облака на распределение опасных скоростей по высотам полета;

- влияния времени нахождения в зоне обледенения на зависимость толщины льда от скорости полета при прочих равных условиях.

Результаты численного моделирования представлены на рис. 5–9.

Как было сказано ранее, скорость полета является одним из определяющих факторов, влияющих на толщину льда. В литературе приведены данные по повторяемости различных температур при обледенении [13, 14], на основе которых можно сделать вывод о том, что в диапазоне от –6 до –10 °С вероятность обледенения выше, чем при других температурах окружающего воздуха. Для исследования возьмем среднюю для данного диапазона температуру, которая реализуется на высоте 700 м над уровнем моря. Был выполнен расчет толщины льда на указанной высоте полета при изменении скорости полета от 0 до 300 м/с.

Таблица 2
Table 2

Исходные данные, полученные из аэрологической диаграммы от 1 января 2020 года (12:00)
Initial data from aerologic diagram from 01.01.2020 noon

№	Высота зондирования, м	Температура воздуха, °C
1	0	-5
2	156	-2,1
3	696	-7,9
4	1 349	-9,5
5	2 825	-17,7
6	5 260	-34,7
7	6 780	-45,1
8	8 660	-54,1
9	9 300	-57,9
10	9 820	-56,7
11	11 200	-56,1
12	12 000	-61,1
13	15 510	-63,5



Рис. 5. Влияние температуры поверхности на зависимость толщины льда от скорости на высоте 700 м
Fig. 5. Surface temperature influence on dependence of ice thickness on high speed at 700 m altitude

По полученному распределению (рис. 3) можно определить опасную скорость полета (209 м/с), при которой толщина льда будет максимальной (6,4 мм).

Как видно из распределения опасных скоростей по высоте (рис. 1), зависимость имеет нелинейный характер и точку экстремума. Нелинейность напрямую связана с распределением температуры воздуха по высоте. Этим же можно объяснить и наличие экстремума

(выше 9 300 м в рассматриваемый момент был отмечен рост температуры воздуха (табл. 2)).

Уменьшение температуры подверженной обледенению поверхности сдвигает экстремум зависимости толщины льда от скорости полета вправо вверх (рис. 5), а также при этом экстремум становится менее выраженным. Заметим, что данный фактор имеет наиболее выраженное действие до высоты

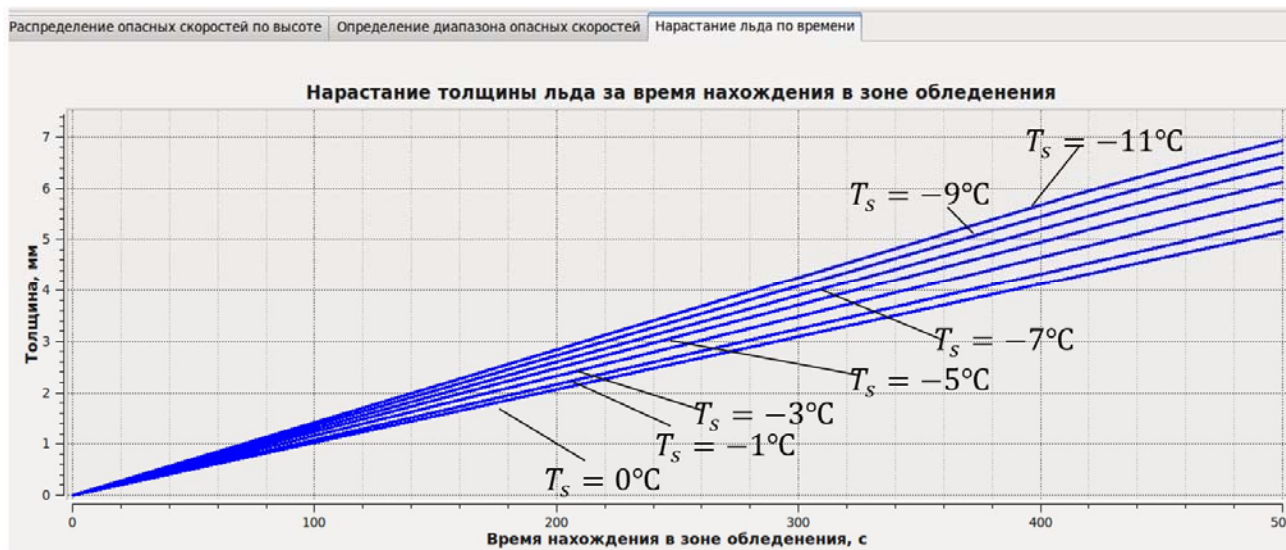


Рис. 6. Влияние температуры поверхности на скорость нарастания льда
Fig. 6. Surface temperature influence on ice growth rate

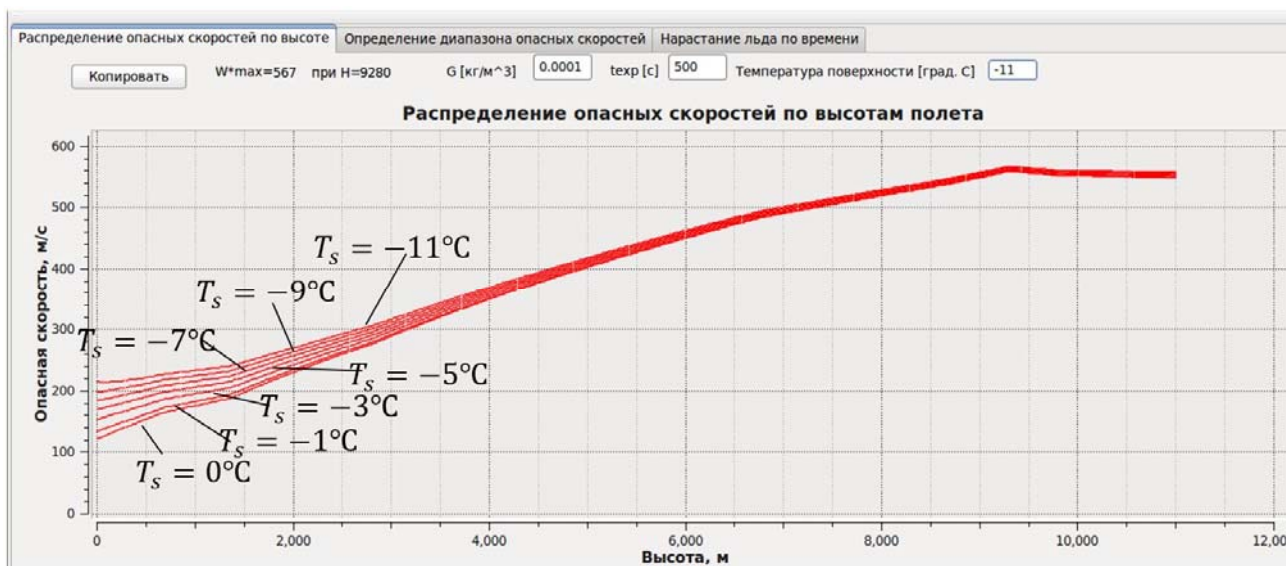


Рис. 7. Влияние температуры поверхности на распределение опасных скоростей по высотам полета
Fig. 7. Surface temperature influence on distribution of dangerous speeds by flight altitude

5 000 м. На рис. 6 видно, что при уменьшении температуры поверхности скорость нарастания льда $\frac{\partial B}{\partial t}$ увеличивается.

На рис. 7 представлено влияние температуры поверхности на распределение опасных скоростей по высотам полета. На высотах полета от 0 до 4 000 м температура поверхности оказывает наибольшее влияние на величину опасной скорости (чем температура поверх-

ности выше, тем ниже значение опасной скорости).

На рис. 8 представлена зависимость максимальной толщины льда и опасной скорости от температуры поверхности. Как видно из данного графика, при увеличении температуры поверхности опасная скорость полета и максимальная толщина льда уменьшаются. Это связано с тем, что при контакте с поверхностью капли воды замерзают при более

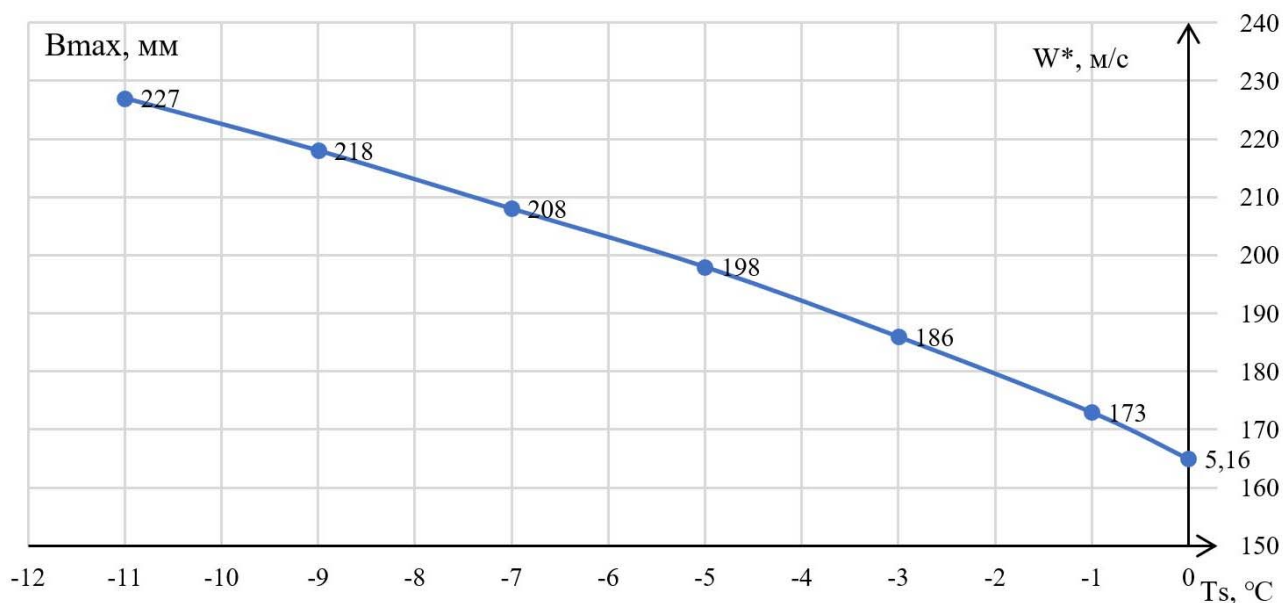


Рис. 8. Зависимость максимальной толщины льда и опасной скорости от температуры поверхности
Fig. 8. Dependence of the maximum ice thickness and dangerous speed on the surface temperature

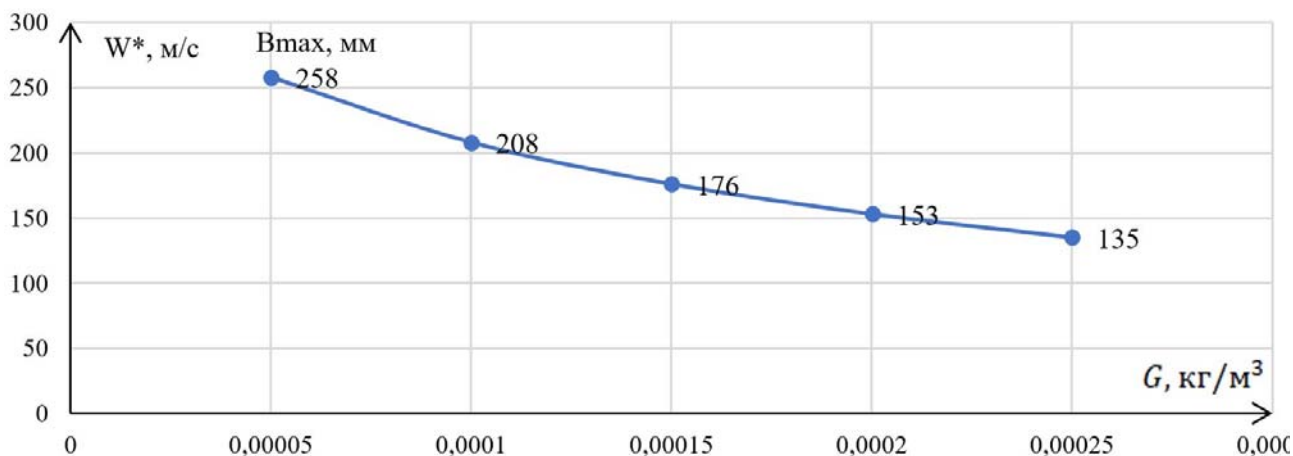


Рис. 9. Зависимость максимальной толщины льда и опасной скорости от водности облака
Fig. 9. Dependence of the maximum ice thickness and dangerous speed on cloud water content

низких температурах быстрее, поэтому лед образуется интенсивнее.

На рис. 9 представлена зависимость максимальной толщины льда и опасной скорости от водности облака. На данной зависимости видно уменьшение величины опасной скорости и уменьшение максимальной толщины льда при увеличении водности облака.

Заключение

На основе известной математической модели в рамках данного исследования было разработано программное обеспечение, позволяющее определять толщину льда на поверхностях летательных аппаратов, подверженных обледенению в различных условиях. В ходе исследования были получены графики

зависимости толщины льда от скорости воздушного потока. При анализе графиков было установлено существование скоростей полета, при которых достигается наибольшее значение толщины льда. Было принято решение такие скорости назвать опасными. Далее были проведены исследования по определению опасных скоростей на различных высотах полета и было получено их распределение по высотам в пределах тропосферы. Также были получены зависимости максимальной толщины льда, опасной скорости полета и опасной высоты полета от водности облака, в котором происходит полет ВС, продолжительности полета в зоне обледенения, температуры поверхности и от скорости полета. Предварительное построение указанных зависимостей рекомендуется выполнять перед каждым полетом ВС для определения опасных скоростей полета и последующего их избегания.

Список литературы

1. **Cao Y., Tan W., Wu Z.** Aircraft icing: An ongoing threat to aviation safety // *Aerospace Science and Technology*. 2018. Vol. 75. Pp. 353–385. DOI: 10.1016/j.ast.2017.12.028
2. **Bragg M.B., Perkins W.R., Sarter N.B. и др.** An interdisciplinary approach to inflight aircraft icing safety // 36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, NV, U.S.A., 12–15 January 1998. Pp. 12–15. DOI: 10.2514/6.1998-95
3. **Leckman P.R.** Qualification of light aircraft for flight in icing conditions // *SAE Transaction*. 1971. Vol. 80, Section 3: Papers 710368–710618. Pp. 1503–1525.
4. **Ratvasky T.P., Ranaudo R.J.** Icing effects on aircraft stability and control determined from flight data, preliminary results [Электронный ресурс] // 31st Aerospace Sciences Meeting. Reno, NV, USA, 11–14 January 1993. DOI: 10.2514/6.1993-398 (дата обращения: 03.11.2022).
5. **Ide R.** The measurement of aircraft performance and stability and control after flight through natural icing conditions / R. Ide, A. Reehorst, R. Ranaudo, K. Mikkelsen, R. Mcknight [Электронный ресурс] // 3rd Flight Testing Conference and Technical Display. Las Vegas, NV, U.S.A., 02–04 April 1986. DOI: 10.2514/6.1986-9758 (дата обращения: 03.11.2022).
6. **Cole J., Sand W.** Statistical study of aircraft icing accidents [Электронный ресурс] // 29th AIAA, Aerospace Sciences Meeting. Reno, NV, USA, 07–10 January 1991. DOI: 10.2514/6.1991-558 (дата обращения: 03.11.2022).
7. **Czernkovich N.** Understanding in-flight icing // Transport Canada Aviation Safety Seminar, 17 November 2004. Pp. 1–21.
8. **Vukits T.** Overview and risk assessment of icing for transport category aircraft and components [Электронный ресурс] // 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. Reno, NV, USA, 14–17 January 2002. P. 811. DOI: 10.2514/6.2002-811 (дата обращения: 03.11.2022).
9. **Кощеев А.Б., Платонов А.А., Хабров А.В.** Аэродинамика самолетов Ту-204/214. Москва: Туполев: Полигон-Пресс, 2009. 304 с.
10. **Алексеев С.В., Юшкевич О.П.** Обледенение аэродинамических поверхностей: моделирование форм крупных ледяных наростов // *Металознавство та термічна обробка металів*. 2018. № 4 (83). С. 16–24. DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.261218.16.560
11. **Алексеев С.В., Приходько А.А.** Численное моделирование обледенения цилиндра и профиля. Обзор моделей и результаты расчетов // *Ученые записки ЦАГИ*. 2013. Т. 44, № 6. С. 25–57.
12. **Гусев П.П., Антонов Н.В.** Влияние обледенения на полеты вертолетов // *Актуальные проблемы гуманитарных и социально-экономических наук*. 2016. Т. 10, № S1. С. 90–92.
13. **Матвеев Л.Т.** Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 753 с.
14. **Матвеев Л.Т., Смирнов П.И.** Основы авиационной метеорологии. М.: Воениздат, 1955. 336 с.
15. **Тенишев Р.Х., Строганов Б.А., Савин В.С. и др.** Противообледенительные системы летательных аппаратов. Основы про-

ектирования и методы испытаний. М.: Машиностроение, 1967. 320 с.

16. Тимофеева М.В., Титов Д.Е. Развитие моделей оценки ледяных отложений на проводах воздушных линий электропередачи // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2017. Т. 13, № 4. С. 37–45.

17. Шевяков В.И. К вопросу обеспечения безопасности полетов в условиях обледенения // Научный Вестник МГТУ ГА. 2011. № 172. С. 148–152.

18. Calvo-Schwarzwalder M., Myers T.G., Hennessy M.G. The one-dimensional Stefan problem with non-Fourier heat conduction [Электронный ресурс] // International Journal of Thermal Sciences. 2020. Vol. 150. ID: 106210. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2019.106210 (дата обращения: 03.11.2022).

19. Myers T.G. Extension to the Messinger model for aircraft icing // Aeronautics I Astronautics Journal. 2001. Vol. 39, no. 2. Pp. 211–218. DOI: 10.2514/2.1312

References

1. Cao, Y., Tan, W., Wu, Z. (2018). Aircraft icing: An ongoing threat to aviation safety. *Aerospace Science and Technology*, vol. 75, pp. 353–385. DOI: 10.1016/j.ast.2017.12.028

2. Bragg, M.B., Perkins, W.R., Sarter, N.B. et al. (1998). An interdisciplinary approach to inflight aircraft icing safety. In: *36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, NV, U.S.A., pp. 12–15. DOI: 10.2514/6.1998-95

3. Leckman, P.R. (1971). Qualification of light aircraft for flight in icing conditions. *SAE Transaction*, vol. 80, Section 3: Papers 710368–710618, pp. 1503–1525.

4. Ratvasky, T.P., Ranaudo, R.J. (1993). Icing effects on aircraft stability and control determined from flight data, preliminary results. In: *31st Aerospace Sciences Meeting*. Reno, NV, USA. DOI: 10.2514/6.1993-398 (accessed: 03.11.2022).

5. Ide, R., Reehorst, A., Ranaudo, R., Mikkelsen, K., Mcknight, R. (1986). The

measurement of aircraft performance and stability and control after flight through natural icing conditions. In: *3rd Flight Testing Conference and Technical Display*. Las Vegas, NV, U.S.A. DOI: 10.2514/6.1986-9758 (accessed: 03.11.2022).

6. Cole, J., Sand, W. (1991). Statistical study of aircraft icing accidents. In: *29th AIAA, Aerospace Sciences Meeting*, Reno, NV, USA. DOI: 10.2514/6.1991-558 (accessed: 03.11.2022).

7. Czernkovich, N. (2004). Understanding in-flight icing. In: *Transport Canada Aviation Safety Seminar*, pp. 1–21.

8. Vukits, T. (2002). Overview and risk assessment of icing for transport category aircraft and components. In: *40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit*. Reno, NV, USA, p. 811. DOI: 10.2514/6.2002-811 (accessed: 03.11.2022).

9. Koshcheev, A.B., Platonov, A.A., Khabrov, A.V. (2009). Aerodynamics of TU-204/214 aircraft. Moscow: Tupolev: Polygon-Press, 304 p. (in Russian)

10. Alekseenko, S.V., Yushkevich, O.P. (2018). Icing of aerodynamic surfaces: modeling the shape of large ice growths. *Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals*, no. 4 (83), pp. 16–24. DOI: 10.30838/J.PMHTM.2413.261218.16.560 (in Russian)

11. Alekseenko, S.V., Prikhodko, A.A. (2013). Cylinder and profile numerical simulation icing. Models and calculation results overview. *Uchenye zapiski TsAGI*, vol. 44, no. 6, pp. 25–57. (in Russian)

12. Gusev, P.P., Antonov, N.V. (2016). Icing effect on helicopter flights. Aktualnyye problemy gumanitarnykh i sotsialno-ekonomicheskikh nauk, vol. 10, no. S1, pp. 90–92. (in Russian)

13. Matveev, L.T. (1984). General meteorology course. Atmosphere physics. Leningrad: Gidrometeoizdat, 753 p. (in Russian)

14. Matveev, L.T., Smirnov, P.I. (1955). Aviation meteorology fundamentals. Moscow: Voenizdat, 336 p. (in Russian)

15. Tenishev, R.Kh., Stroganov, B.A., Savin, V.S. et al. (1967). Aircraft anti-icing systems. Design Fundamentals and Test Methods.

Moscow: Mashinostroyeniye, 320 p. (in Russian)

16. **Timofeeva, M.V., Titov, D.E.** (2017). Development of models for estimating ice deposits on power lines. *Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye komplekсы i sistemy*, vol. 13, no. 4, pp. 37–45. (in Russian)

17. **Shevyakov, V.I.** (2011). Relating to flight safety in ice conditions. *Civil Aviation High Technologies*, no. 172, pp. 148–152. (in Russian)

18. **Calvo-Schwarzwälder, M., Myers, T.G., Hennessy, M.G.** (2020). The one-dimensional Stefan problem with non-Fourier heat conduction. *International Journal of Thermal Sciences*. 2020, vol. 150, ID: 106210. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2019.106210 (accessed: 03.11.2022).

19. **Myers, T.G.** (2001). Extension to the Messinger model for aircraft icing. *Aeronautics I Astronautics Journal*, vol. 39, no. 2, pp. 211–218. DOI: 10.2514/2.1312

Сведения об авторах

Боков Сергей Романович, преподаватель кафедры аэродинамики, конструкции и прочности летательных аппаратов МГТУ ГА, s.bokov@mstuca.aero.

Ефимов Вадим Викторович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры аэродинамики, конструкции и прочности летательных аппаратов МГТУ ГА, v.efimov@mstuca.aero.

Information about the authors

Sergey R. Bokov, Lecturer of the Chair of Aerodynamics, Design and Strength of Aircraft, Moscow State Technical University of Civil Aviation, s.bokov@mstuca.aero.

Vadim V. Efimov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Chair of Aerodynamics, Design and Strength of Aircraft, Moscow State Technical University of Civil Aviation, v.efimov@mstuca.aero.

Поступила в редакцию	13.03.2023	Received	13.03.2023
Одобрена после рецензирования	26.03.2023	Approved after reviewing	26.03.2023
Принята в печать	20.07.2023	Accepted for publication	20.07.2023