

УДК 621.45.9

Логинов В.В., Кислов О.В.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ОБЛЕДЕНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ВХОДНОГО УСТРОЙСТВА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Харьковский университет Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба, НАКУ "ХАИ"

На современных силовых установках летательных аппаратов (ЛА) для предотвращения попадания в газотурбинный двигатель (ГТД) посторонних предметов на входе устанавливаются защитные решетки [1], однако при полете в благоприятных для обледенения зонах эти решетки становятся самым уязвимым элементом входного канала в отношении обледенения [2,3]. Решетка является центром кристаллизации и поэтому покрываясь льдом может закрыть значительную часть проходного сечения входного канала, что приводит к уменьшению массового расхода воздуха через компрессор [1].

Образование льда во входном устройстве искажает воздушный поток на входе в двигатель, что вызывает срывы и завихрения потока и может привести к помпажу или даже к останову двигателя. Если не предусмотрено мер по обогреву решетки, то время пребывания в зоне обледенения для ЛА с такими двигателями должно быть ограничено, иначе будет повышаться температура газов перед турбиной, что в свою очередь может создать опасность быстрого перегрева лопаток турбины и разрушения [4]. Практически эту опасность можно ликвидировать только уменьшением числа оборотов двигателя, но это повлечет за собой уменьшение тяги со всеми вытекающими отсюда последствиями.

Целью данной статьи является разработка подхода для оценки возможного обледенения защитной сетки входного устройства ГТД.

Особенность обледенения входных устройств двигателя связана с изменением температуры и влажности воздуха во входном канале, вследствие изменения в нем температуры входящего потока воздуха. Если внешние поверхности ЛА при температурах выше 0 °С не обледеневают, то элементы входного канала могут подвергаться обледенению при температурах до +5 °С и даже несколько выше [3,5]. Такое явление может наблюдаться в случае расширения (понижения давления) потока воздуха при движении его вдоль входного канала двигателя, так как при этом происходит понижение его температуры, которое зависит от конфигурации канала и от скорости воздуха на входе в компрессор [2,6]. Чем выше скорость, тем значительнее понижение температуры.

Благоприятные для такого явления условия обычно имеют место при работе двигателя на земле, а также при полете ЛА с небольшой скоростью, но при высоких оборотах двигателя (набор высоты самолета, режим "висения" вертолета). На этих режимах даже при положительных температурах окружающего воздуха температура на входе в компрессор может упасть до отрицательной величины и вследствие конденсации влаги, особенно при повышенной влажности воздуха, может происходить обледенение входных элементов двигателя.

Число случаев обледенения при низких температурах резко уменьшается и большинство случаев обледенения имеет место в диапазоне температур от 0 °С до -15 °С [7]. Различают три степени интенсивности обледенения: слабое (до 0.5 мм/мин), умеренное (0.5–1 мм/мин) и сильное (более 1 мм/мин). Интенсивность обледенения зависит от аэродинамических характеристик ЛА и метеорологических условий: от влажности облака, размера капель, температуры окружающего воздуха и поверхности ЛА, плотности отлагающегося льда, воздушной скорости, формы и размеров обледеневающих частей ЛА.

Из анализа литературы следует, что строгие критерии обледенения отсутствуют [7,8]. Но существуют приближенные подходы к определению обледенения, которые можно разделить на два направления [3,9]:

- 1) по температуре поверхности (при температуре поверхности больше 0 °С обледенение отсутствует);
- 2) по приближенным формулам в узком диапазоне начальных атмосферных условий.

Так, для скоростей полета от 100 до 500 км/ч при температуре ниже –5 °С интенсивность обледенения I (скорость нарастания толщины льда) определяется по формуле:

$$I = \frac{\omega \cdot V}{100}, \quad (1)$$

где ω – водность, г/м³; V – скорость полета, км/час.

Чем больше скорость полета, тем больше водяных капель ударяется о ЛА в единицу времени, значит, тем интенсивнее обледенение. Однако это положение справедливо для небольших скоростей полета. Наиболее интенсивное и опасное обледенение наблюдается в облаках и осадках при температурах от 0 °С до –10 °С.

Из изложенного следует, что для оценки возможности обледенения необходимо знать скорость потока, температуру обтекаемых поверхностей и водность набегающего потока. Водность потока зависит от водности облаков и размеров капель в них, а также от условий в канале входного устройства [9,10]. Обледенение связано с определенной совокупностью указанных выше параметров, но с точки зрения повторяемости в полетах, его можно рассматривать как явление случайное [11,12].

Выбор расчетных условий обледенения должен производиться путем обработки достаточно обширных метеорологических данных, анализа влияния температуры, водности и размера капель на обледенение элементов входного устройства в полете. От сочетания водности и размеров капель в основном зависит количество льда, образующегося на поверхности при обледенении [12]. С понижением температуры облака уменьшается водность и уменьшается вероятность встречи этой водности при обледенении.

Одним из главных факторов, определяющих процесс обледенения решетки, расположенной во входном устройстве ГТД, является её температура. Для определения температуры решётки классическим путем необходимо решить задачу сопряженного теплообмена потока газа с поверхностью решетки [13,14]. Система уравнений, описывающих это явление, состоит из:

- дифференциального уравнения количества движения газового потока;
- дифференциального уравнения энергии газового потока, для которого граничным условием на поверхности решетки является искомая температура решетки;
- уравнения неразрывности газового потока;
- уравнения состояния газового потока;
- дифференциального уравнения теплопроводности для решетки с граничным условием $T = T_{ст}$, где $T_{ст}$ – искомая температура стенки.

Однако практически реализовать этот способ чрезвычайно трудно вследствие сложности расчетной области и несоизмеримости характерных размеров области течения газового потока и обтекаемой решетки. В частности, малые размеры сетки приводят к необходимости чрезмерного измельчения расчетной сетки вокруг нее, а присущее всем численным методам ограничение, требующее обеспечения размеров ячеек величиной одного порядка, приводит к необходимости покрытия расчетной области сеткой с очень большим количеством ячеек. Поэтому представляется целесообразным принять

некоторые допущения, которые, не сильно искажая физическую картину процесса, позволяют применить инженерные методы. Принятые допущения:

1. Поскольку диаметр сетки мал в сравнении с размерами расчетной области и размерами ячеек, можно пренебречь наличием сетки при расчете газового потока. Это допущение позволяет определить параметры потока p, T, ρ, u, v, w в области сетки с помощью численного метода, изложенного ниже.

2. Вследствие малых размеров ячеек решетки, можно перейти от дифференциального уравнения теплопроводности к системе алгебраических уравнений, представляющих баланс теплоты в каждом узле решетки. На рис. 1 изображена решетка с характерным элементарным узлом i в виде креста.

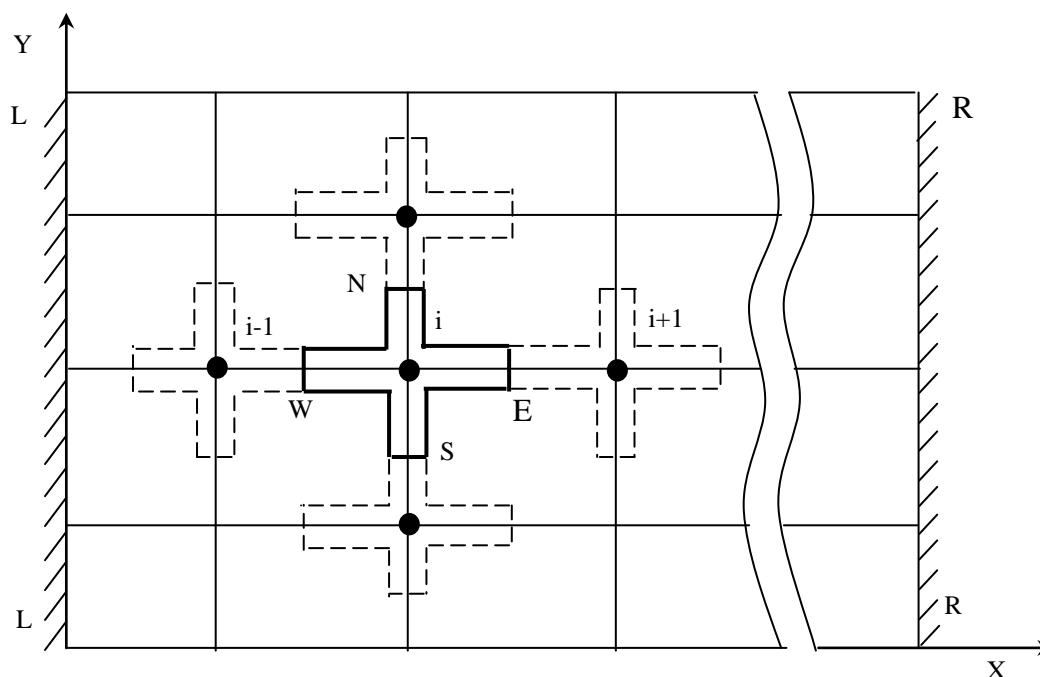


Рисунок 1 – Схема узлов решетки

Баланс теплоты для узла записывается в виде $Q_W + Q_N + Q_E + Q_S - Q_{\text{кто}} = 0$, т.е. сумма потоков теплоты на границах узла с соседними узлами и теплового потока, обусловленного конвективным теплообменом с омывающим решетку потоком, равна нулю.

Для расчета тепловых потоков в точках W, E, N, S используется закон Фурье:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dX_i} \quad (2)$$

В инженерных расчетах производную $\frac{dT}{dX_i}$ можно определять приближенно путем замены дифференциалов dT и dX_i конечными приращениями ΔT и ΔX_i . В частности,

$$\left(\frac{dT}{dX_i} \right)_W = \frac{T_i - T_{i-1}}{X_i - X_{i-1}}; \quad (3)$$

$$\left(\frac{dT}{dX_i} \right)_E = \frac{T_{i+1} - T_i}{X_{i+1} - X_i} \text{ и т.д.}, \quad (4)$$

где X – координата соответствующего узла сетки.

Для расчета конвективного теплового потока $Q_{\text{кто}}$ необходимо использовать формулу Ньютона-Рихмана для плотности теплового потока

$$q = \bar{\alpha}(T_i - T_{T_i}), \quad (5)$$

где T_i – температура узла сетки i ; T_{T_i} – температура теплоносителя, омывающего элементарный узел i ; $\bar{\alpha}$ – средний коэффициент теплоотдачи, определяемый с помощью критериальных уравнений.

Критериальное уравнение имеет вид:

$$\bar{Nu} = A Re^n Pr^m. \quad (6)$$

Для ламинарного обтекания решетки при $Re=5...10^3$ [14], критерий Нуссельта определяется по уравнению

$$\bar{Nu} = 0.5 Re^{0.5} Pr^{0.38} \left(\frac{Pr}{Pr_{\text{ст}}} \right)^{0.25}. \quad (7)$$

В случае обтекания воздухом (7) упрощается и имеет вид

$$\bar{Nu} = 0.43 Re^{0.5}. \quad (8)$$

При $Re=10^3 \dots 2 \cdot 10^5$ и при обтекании решетки воздухом критерий Нуссельта равен

$$\bar{Nu} = 0.216 Re^{0.6}. \quad (9)$$

При обтекании цилиндрических прутков решетки под углом $<90^\circ$, необходимо ввести поправочный коэффициент ε_φ и вычислять $\bar{\alpha} = \varepsilon_\varphi \cdot \bar{\alpha}_{90^\circ}$. Значения ε_φ приведены в таблице 1 [13].

Таблица 1 – Значения поправочных коэффициентов

φ , град	90	80	70	60	50	40	30	20	10
ε_φ	1	1	0.98	0.95	0.87	0.77	0.67	0.6	0.55

Для перехода от плотности тепловых потоков q к тепловым потокам Q необходимо умножить q на соответствующие площади поверхностей.

Число уравнений, отражающих баланс теплоты, соответствует числу неизвестных температур узлов. Поэтому эта система имеет единственное решение, которое может быть найдено с помощью стандартных численных методов решения систем алгебраических уравнений.

Граничными условиями могут быть заданные значения температур стенок на левой (L-L) и правой (R-R) границах. На границах L-R выполняются условия периодичности.

Дальнейшее решение возможно, если допустить, что температуры прутков решетки не изменяются вдоль линий L-L и R-R. При этом допущении отсутствуют тепловые потоки Q_{N_i} и Q_{S_i} , поэтому уравнение баланса теплоты упрощается и примет вид:

$$Q_{W_i} + Q_{E_i} - Q_{\text{кто}} = 0. \quad (10)$$

Система алгебраических уравнений такого вида может быть решена методом прогонки, поскольку ее главная матрица является трехдиагональной. Но для определения температуры стенки необходимо знать параметры течения в области решетки, в частности, температуру воздушного потока. Эти параметры можно найти с помощью численного расчета течения [15].

Таким образом, разработан подход, позволяющий оценивать обледенение защитной решетки входного устройства ГТД с помощью определения температуры ее поверхности.

Литература

1. Теория авиационных двигателей / Под редакцией Ю.Н. Нечаева. – М.: Машиностроение. –1984. –634 с.
2. Астапенко П.Д., Баранов А.М., Шварев И.М. Погода и полеты самолетов и вертолетов. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 280 с.
3. Володько А.М. Безопасность полетов вертолетов. – М.: Транспорт, 1981. – 224 с.
4. Баранов А.М. Облака и безопасность полетов. Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 231 с.
5. Трунов О.К. Обледенение самолетов и средства борьбы с ним. М.: Машиностроение, 1965. – 247 с.
6. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.:Наука, 1984. –867с.
7. Трунов О.К. Физико-аэродинамическое исследование проблемы обледенения самолетов. – Труды ГосНИИГА 1981, вып.206. – С. 3–39.
8. Мазин И.П. Физические основы обледенения самолетов. – М.: Гидрометеиздат, 1957. – 120 с.
9. Кравченко И.В. Летчику о метеорологии. М.: Воениздат, 1982. –256 с.
10. Володько А.М. Эксплуатация самолетов и вертолетов в усложненных природных условиях. – М.: Транспорт, 1981. – 157 с.
11. Абрамович К.Г. Прогноз обледенения самолетов. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 27 с.
12. Облака и облачная атмосфера. Справочник / Под ред. Мазина И.П., Хргиана А.Х., Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 647 с.
13. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. М.: Высшая школа, 1980. – 469 с.
14. Юдаев Б.Н. Техническая термодинамика. Теплопередача. М.: Высшая школа, 1988. – 479 с.
15. Кислов О.В., Коткин В.В., Логинов В.В. Методика расчёта трёхмерных вязких потоков // Вестник Харьковского Государственного политехнического университета. – №12. –1998. – С. 139–142.

УДК 621.45.9

Логінов В.В., Кіслов О.В.

ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ЗЛЕДЕНІННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ВХІДНОГО ПРИСТРОЮ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА

Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, НАКУ “ХАІ”

Розроблено підхід, який дозволяє оцінювати зледеніння захисної решітки вхідного пристрою ГТД за допомогою визначення температури її поверхні.