

Методика и алгоритмы расчета гофров самолетных противообледенителей воздушно-тепловых систем

Государственное предприятие «АНТОНОВ»

Разработана методика расчета гофров самолетных противообледенителей воздушно-тепловых систем как в режиме высокоточных поверочных расчетов, так и в режиме проекторочного расчета.

Ключевые слова: противообледенители, гофры, коэффициенты сопротивлений, диаметры выходных отверстий.

Общие положения

Разработанная методика расчета гофров ВТ ПОС позволяет выполнять расчеты гофров для воздушно-тепловых противообледенительных систем (ВТ ПОС), представленных на рис.1.

Предусмотрены два варианта расчетов: поверочный и проекторочный.

Поверочный расчет позволяет:

1) По значениям суммарного расхода воздуха, соотношению воздуха на верхней и нижней поверхностях, замеренному давлению воздуха в камере, замеренному динамическому напору потока воздуха (перепаду давления) в каждом выходном отверстии в гофрах, диаметрам замеренных отверстий и геометрии гофров ВТ ПОС, рассчитать:

- замеренные расходы воздуха через каждое выходное отверстие (по заданному перепаду давления в отверстии);
- суммарный расход воздуха на каждый гофр (по замеренному расходу);
- расчетный расход воздуха на каждый гофр (по заданному давлению воздуха в камере);
- суммарные замеренные расходы воздуха на все верхние и нижние гофры;
- суммарные расчетные расходы воздуха на все верхние и нижние гофры;
- сравнить рассчитанные расходы воздуха через каждый гофр с заданными расходами;
- сравнить рассчитанные суммарные расходы воздуха на все верхние и нижние гофры с заданными расходами;
- коэффициенты расхода воздуха для каждого отверстия каждого гофра;
- коэффициенты потерь (суммарных, путевых и выходных) для замеренных отверстий.

2) По заданным значениям суммарного расхода воздуха, соотношению воздуха на верхней и нижней поверхностях и заданному давлению воздуха в камере рассчитать:

- расходы воздуха;
- коэффициенты потерь (суммарных, путевых и выходных) для требуемых (расчетных) выходных отверстий;
- диаметры требуемых отверстий;
- расходы воздуха для доработанных отверстий (если таковые имеются);

- коэффициенты потерь (суммарных и выходных) для доработанных отверстий.

Проектировочный расчет позволяет по заданным суммарному расходу воздуха, соотношению воздуха на верхней и нижней поверхности заданному давлению воздуха в камере и параметрам гофров рассчитать:

- расходы воздуха;
- диаметры выходных отверстий и соответствующие им площади;
- коэффициенты потерь: суммарных, путевых и выходных;
- ожидаемые перепады давлений на выходных отверстиях;
- расходы воздуха для доработанных (заданных) выходных отверстий (если таковые имеются);
- коэффициенты потерь для доработанных отверстий.

При проведении расчетов учитывается метод замера перепадов давлений в выходных отверстиях и тип задания исходных коэффициентов сопротивления воздуха в отверстиях.

1. Поверочный расчет

1.1. Общие положения поверочного расчета

1.1.1. Поверочный расчет расхода воздуха в гофрах выполняется после проведения гидравлических испытаний гофров холодным воздухом и является необходимым приложением к испытаниям. Испытания проводятся на гидравлическом стенде. По данным замеров на мерном устройстве (сопло Вентури, труба Вентури) рассчитывается расход воздуха на агрегат, этот расход называется замеренным - $G_{зам}$.

Датчиком абсолютного давления замеряется давление воздуха в камере $P_{кам_{зам}}$. В подводящей воздух трубе замеряется температура воздуха $t_в$.

Задается геометрия гофров и выходных отверстий.

Этих данных достаточно, чтобы провести *приближенный поверочный расчет* расходов воздуха на каждый гофр. Приближенность расчета заключается в осреднении гидравлического сопротивления для каждого гофра

Этот вариант поверочного расчета реализован в методике проектировочного расчета, описанной в разделе 3.

1.1.2. *Точный поверочный расчет* расхода воздуха через каждый гофр может быть выполнен по результатам замера динамического напора в каждом выходном отверстии мерным устройством.

1.1.3. Для замера динамического напора в выходных отверстиях используются следующие *типы мерных устройств*:

- Т-образник, где замер перепада давления выполняется непосредственно в отверстии;
- мерный насадок - специальное мерное устройство, которое замеряет перепад давления на выходе из мерного устройства (насадок предварительно тарируется: определяется зависимость коэффициента расхода μ от замеренного перепада давления на выходе из насадка), результаты тарировки и внутренний диаметр насадка включаются в паспорт, который прилагается к насадку.

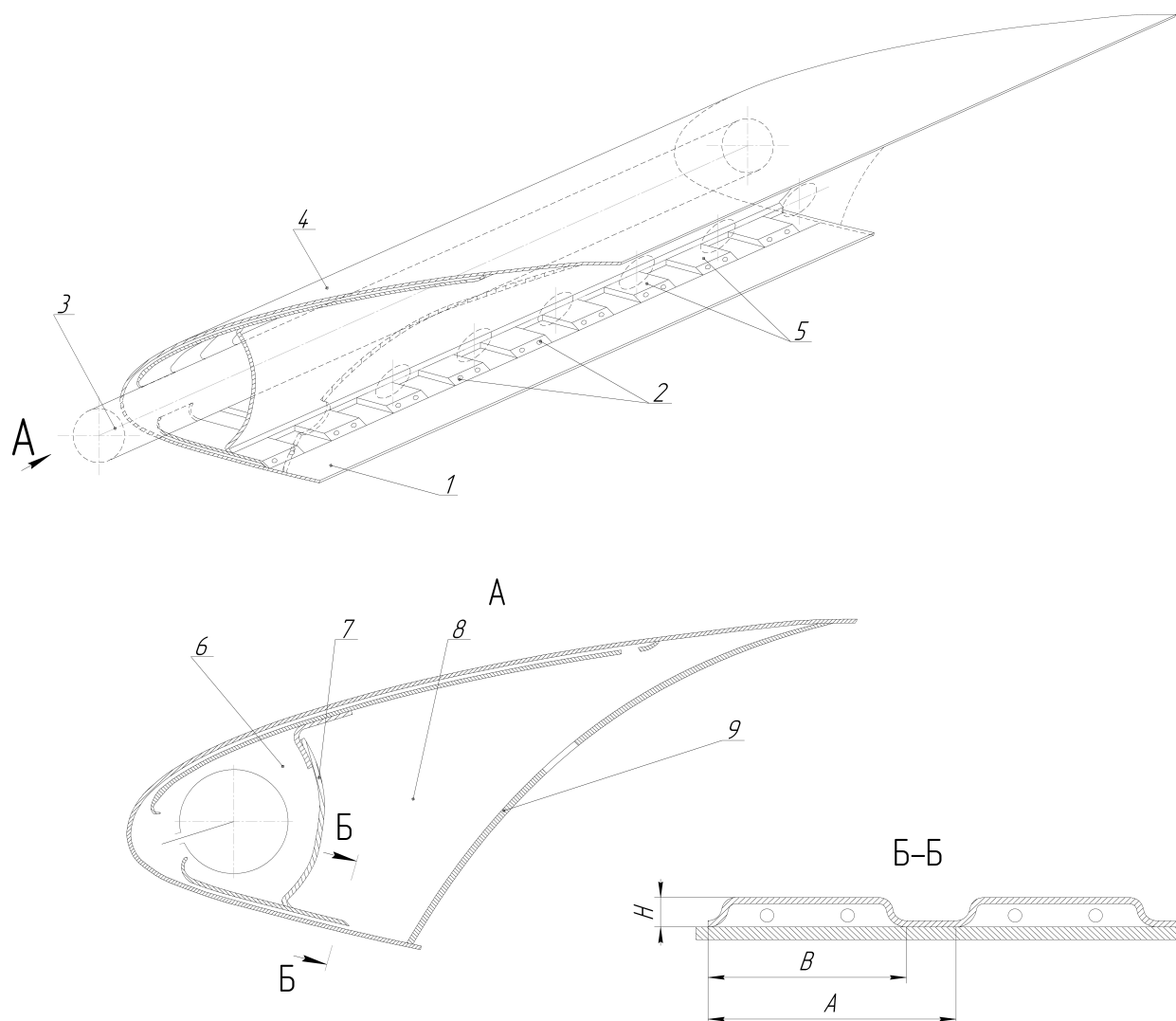


Рис. 1. Расчетный элемент.

Параметры гофров: A – шаг; B – ширина; H – высота

Агрегаты, входящие в расчетный элемент:

- | | |
|----------------------------------|--------------------|
| 2 – выходные отверстия гофров; | 6 – камера; |
| 3 – распределительная труба; | 7 – стенка камеры; |
| 4 – обшивка противообледенителя; | 8 – канал; |
| 5 – гофр; | 9 – стенка канала |

Примечание. На верхней поверхности показан выход воздуха из гофра через боковое отверстие, на нижней – через торцевое-(сечБ-Б)

1.1.4. Методикой предусматривается два варианта поверочного расчета:

- первый вариант поверочного расчета выполняет расчет расхода воздуха через каждый гофр, выполненный по результатам испытаний и сравнение с требуемыми расходами;
- второй вариант поверочного расчета, который является продолжением первого варианта, выполняется для того, чтобы определить значения диаметров отверстий, обеспечивающих заданное давление воздуха в камере по заданному расходу.

Примечания: В используемой терминологии и обозначениях подразумеваются:

- под замеренными - параметры, вычисленные по замеренному значению воздуха в камере ($P_{кам\ зам}$);
- под заданными - параметры, вычисленные по значению воздуха в камере, которое нужно обеспечить ($P_{кам\ зад}$).

Ссылки на диаграммы, указывают на диаграммы, которые приведены в книге Идельчик И.Е., «Справочник по гидравлическим сопротивлениям», Москва, 1992г. Диаграммы, указанные в ссылках, приведены в приложении 1.

Если в обозначениях указан:

- индекс k , то расчет выполняется для верхней и нижней поверхности;
- индекс i , то расчет выполняется для каждого гофра поверхности;
- индекс j , то расчет выполняется для каждого отверстия гофра.

1.2. Первый вариант поверочного расчета

1.2.1. Общие положения первого варианта поверочного расчета

1.2.1.1. Первый вариант поверочного расчета предназначен для определения расхода воздуха через каждый гофр и сравнения с требуемыми расходами (из условия равномерности раздачи воздуха, либо из условия обеспечения повышенных расходов на определенных участках противообледенителя).

Для этого варианта по перепаду давления, замеренному в каждом выходном отверстии в гофрах $\Delta P_{отв\ зам_{k,i,j}}$, выполняются:

- расчет расхода воздуха через каждое выходное отверстие;
- расчет расхода воздуха через каждый гофр;
- расчет суммарных расходов воздуха на все верхние и нижние гофры;
- сравнение рассчитанных расходов воздуха через каждый гофр с заданными расходами;
- сравнение рассчитанных суммарных расходов воздуха на все верхние и нижние гофры с заданными расходами;
- расчет коэффициентов расхода воздуха в каждом выходном отверстии;
- расчет скорости воздуха в каждом выходном отверстии каждого гофра;
- расчет скорости воздуха в каждом гофре.

1.2.1.2. Выполнение этого варианта поверочного расчета обеспечивается следующими значениями исходных параметров:

- величина замеренного давления в камере - больше нуля ($P_{кам\ зам} > 0$),
- величина заданного давления в камере - равна нулю ($P_{кам\ зад} = 0$),
- величина перепада давления в каждом отверстии в гофрах больше нуля ($\Delta P_{отв\ зам_{k,i,j}} > 0$).

1.2.2. Алгоритм вычислений первого варианта поверочного расчета

1.2.2.1. По значению замеренного давления воздуха в камере $P_{камзам}$ определяется замеренный перепад давления в камере, $кг/м^2$:

$$\Delta P_{камзам} = P_{камзам} - P_{атм} \quad (1.1)$$

1.2.2.2. Определяется замеренный удельный вес воздуха в камере, $кг/м^3$:

$$\gamma_{зам} = \frac{P_{камзам}}{29.3 \cdot (273 + t_g)} \quad (1.2)$$

где t_g - температура воздуха, °С.

1.2.2.3. Определяется суммарная площадь всех замеренных отверстий для каждого i -го гофра (при одинаковых диаметрах отверстий), $м^2$.

$$F_{отв_{замk,i\Sigma}} = F_{отв_{замk,i,j}} \cdot n_j \quad (1.3)$$

где

$F_{отв_{замk,i,j}}$ - площадь одного отверстия i -го гофра, $м^2$,

$$F_{отв_{замk,i,j}} = \frac{3.14 \cdot d_{отв_{замk,i,j}}^2}{4}$$

$d_{отв_{замk,i,j}}$ - диаметр одного отверстия i -го гофра, $м$;

n_j - количество отверстий в гофре на k -ой поверхности;

1.2.2.4. Определяется замеренный расход воздуха в каждом отверстии каждого гофра $G_{отв_{замk,i,j}}$, $кг/ч$, в зависимости от метода его измерения.

1.2.2.4.1. Если перепад давления на выходе из каждого отверстия замеряется специальным мерным устройством (насадком), то расход воздуха через отверстие определяется по формуле:

$$G_{отв_{замk,i,j}} = 3600 \cdot \mu_{м/у_k} \cdot F_{м/у_k} \cdot \sqrt{\Delta P_{м/у_{k,i,j}}} \cdot 2 \cdot g \cdot \gamma_{атм} \quad (1.4)$$

где

$F_{м/у_k}$ - площадь калибровочного отверстия мерного устройства (диаметром $d_{м/у_k}$), в котором производится замер динамического напора, $м^2$

$$F_{м/у_k} = \frac{3.14 \cdot d_{м/у_k}^2}{4}$$

$\mu_{м/у_k}$ - коэффициент расхода воздуха из мерного устройства. Зна-

чения $\mu_{м/у_k}$ определяется (методом линейной интерполяции) по тарировочной кривой этого устройства как функция $\mu = F(\Delta P)$, которая получена по предварительной тарировке данного мерного устройства.

$\gamma_{атм}$ - удельный вес воздуха при атмосферном давлении (на выходе из Т-образника), $кг/м^3$

$$\gamma_{атм} = \frac{P_{атм}}{29.3 \cdot (273 + t_g)}$$

1.2.2.4.2. Если замер перепада давления производится Т-образником, т. е. непосредственно в отверстии, то расход воздуха через отверстие определяется по формуле:

$$G_{отв\ зам_{k,i,j}} = 3600 \cdot M_{отв\ зам_{k,i,j}} \cdot F_{отв\ зам_{k,i,j}} \cdot \sqrt{\Delta P_{отв\ зам_{k,i,j}} \cdot 2 \cdot g \cdot \rho_{атм}} \quad (1.5)$$

где

$M_{отв\ зам_{k,i,j}}$ - коэффициент расхода воздуха в выходных отверстиях, определяемый по формуле Дарси-Вейсбаха

$$M_{отв\ зам_{k,i,j}} = 0.63 + 0.37 \cdot \left(\frac{F_{отв\ зам_{k,i,j}}}{F_{гоф_{k,i}}} \right)^3 \quad (1.6)$$

где $F_{гоф_{k,i}}$ - площадь гофра, m^2 , равна

$$F_{гоф_{k,i}} = B_{гоф_{k,i}} \cdot H_{гоф_{k,i}} \quad (1.7)$$

где

$B_{гоф_{k,i}}$ - ширина гофра, м;

$H_{гоф_{k,i}}$ - высота гофра, м.

1.2.2.4.3. При отсутствии замеров перепадов давлений воздуха в отверстиях расход воздуха через отверстие, определяется по формуле

$$G_{отв\ зам_{k,i,j}} = 0.95 \cdot 3600 \cdot M_{отв\ зам_{k,i,j}} \cdot F_{отв\ зам_{k,i,j}} \cdot \sqrt{\Delta P_{кам\ зам} \cdot 3 \cdot g \cdot \gamma_{атм} \cdot \frac{1}{1.4}} =$$

$$G_{отв\ зам_{k,i,j}} = 0.983 \cdot 3600 \cdot M_{отв\ зам_{k,i,j}} \cdot F_{отв\ зам_{k,i,j}} \cdot \sqrt{\Delta P_{кам\ зам} \cdot 2 \cdot g \cdot \gamma_{атм}} \quad (1.8)$$

где

$M_{отв\ зам_{k,i,j}}$ - коэффициент расхода воздуха на выходе из отверстия, определяемый методом интерполяции как функция

$$\mu_{отв} = F(\varepsilon_H),$$

где $\varepsilon_H = \frac{P_{атм}}{P_{кам\ зам}}$

Значения функции $\mu_{отв} = F(\varepsilon_H)$ представлены в табл. 1

Табл. 1

ε_H	.035	.529	.559	.606	.641	.676	.722	.837	.946	1.00
$\mu_{вых\ отв}$	.850	.740	.730	.710	.700	.680	.650	.630	.630	.630

1.2.2.5. Определяется замеренная скорость воздуха на выходе из отверстий каждого гофра, м/с

$$V_{отв\ зам_{k,i,j}} = \frac{G_{отв\ зам_{k,i,j}}}{3600 \cdot F_{отв\ зам_{k,i,j}} \cdot \gamma_{зам}} \quad (1.9)$$

1.2.2.6. Определяется суммарный замеренный расход воздуха для каждого гофра, кг/ч

$$G_{\text{гофр зам } k,i} = \sum_{j=1}^{N_{\text{отв } k,i}} G_{\text{отв зам } k,i,j} \quad (1.10)$$

1.2.2.7. Определяется замеренная скорость воздуха в гофре, м/с

$$V_{\text{гофр зам } k,i} = \frac{G_{\text{гофр зам } k,i}}{3600 \cdot F_{\text{гофр } k,i} \cdot \gamma_{\text{зам}}} \quad (1.11)$$

1.2.2.8. Определяется суммарный замеренный расход воздуха для всех гофров для каждой поверхности, кг/ч

$$G_{\text{гофр зам } k\Sigma} = \sum_{i=1}^{N_{\text{гофр } k}} G_{\text{гофр зам } k,i} \quad (1.12)$$

1.2.2.9. Определяется суммарный замеренный расход воздуха для двух поверхностей, кг/ч

$$G_{\text{гофр зам } \Sigma} = G_{\text{гофр зам } 1\Sigma} + G_{\text{гофр зам } 2\Sigma} \quad (1.13)$$

1.2.2.10. Определяется заданный расход воздуха на каждый гофр, кг/ч

$$G_{\text{гофр зад } k,i} = \frac{G_{\Sigma} \cdot \bar{G}_k}{\sum_{i=1}^{N_{\text{гофр } k}} (F_{\text{гофр } k,i} \cdot K_{G_{k,i}})} \cdot F_{\text{гофр } k,i} \cdot K_{G_{k,i}} \quad (1.14)$$

где

$K_{G_{k,i}}$ - коэффициент изменения расхода на гофр, (задается при необходимости компенсации перетоков тепла на концевых участках);

$\sum_{i=1}^{N_{\text{гофр } k}} (F_{\text{гофр } k,i} \cdot K_{G_{k,i}})$ - сумма произведений площади гофра на коэффициент

изменения расхода для рассчитываемой поверхности.

1.2.2.11. Находятся разности между заданными и замеренными суммарными расходами воздуха для всех гофров на каждой поверхности, кг/ч

$$\Delta G_{\text{гофр } k\Sigma} = G_{\text{гофр зад } k\Sigma} - G_{\text{гофр зам } k\Sigma} \quad (1.15)$$

1.3. Второй вариант поверочного расчета

1.3.1. Общие положения второго варианта поверочного расчета

1.3.1.1. 2-ой вариант поверочного расчета выполняется с целью определения параметров выходных отверстий из гофров, необходимых для обеспечения заданного расхода воздуха при заданном давлении воздуха в камере $P_{\text{кам зад}}$, и по его значению заданные расходы на гофр.

2-ой вариант поверочного расчета является продолжением 1-го варианта и обеспечивается следующими значениями исходных параметров:

- величина замеренного давления в камере - больше нуля ($P_{\text{кам зам}} > 0$);
- величина заданного давления в камере - больше нуля ($P_{\text{кам зад}} > 0$).

1.3.1.2. В этой части расчета для каждого отверстия каждого гофра определяются:

- 1) По замеренным значениям $P_{кам\ зам}$ и $\Delta P_{отв\ зам\ k,i,j}$
 - коэффициенты потерь для замеренных (рассчитанных по $P_{кам\ зам}$) отверстий (суммарных, путевых и выходных).
- 2) По заданным значениям $P_{кам\ зад}$
 - коэффициенты потерь для заданных (рассчитанным по $P_{кам\ зад}$) отверстий (суммарных и выходных);
 - площади и диаметры заданных отверстий;
- 3) По значениям $P_{кам\ зад}$ для доработанных отверстий (если таковые заданы):
 - расходы воздуха доработанных отверстий;
 - коэффициенты потерь через доработанные отверстия (суммарных и выходных);
 - диаметры доработанных отверстий.

1.3.2. Алгоритм вычислений второго варианта поверочного расчета

1.3.2.1. Определение гидравлических сопротивлений по замеренному давлению воздуха в камере $P_{кам\ зам}$

Гидравлические сопротивления для каждого гофра каждой поверхности: суммарные, замеренные и путевые, рассчитанные по $P_{кам\ зам}$, определяются, исходя из условия

$$\xi_{\Sigma\ зам\ k,i} = \xi_{пут\ k,i} + \xi_{вых\ зам\ k,i} \quad (1.16)$$

где

- $\xi_{\Sigma\ зам\ k,i}$ - суммарное гидравлическое сопротивление;
- $\xi_{пут\ k,i}$ - гидравлический коэффициент путевых потерь;
- $\xi_{вых\ зам\ k,i}$ - замеренное гидравлическое сопротивление выхода из гофра.

Расчет выполняется в описанной ниже последовательности.

- 1.3.2.1.1. По значениям замеренного перепада давления воздуха в камере $\Delta P_{кам\ зам}$, определяется замеренное суммарное гидравлическое сопротивление каждого гофра $\xi_{\Sigma\ зам\ k,i}$ по формуле

$$\xi_{\Sigma\ зам\ k,i} = \frac{\Delta P_{кам\ зам} \cdot 2 \cdot g}{\gamma_{зам} \cdot V_{гоф\ зам\ k,i}^2} \quad (1.17)$$

- 1.3.2.1.2. Определяется гидравлическое сопротивление выхода из каждого гофра ($\xi_{вых\ зам\ k,i}$) как функция $\xi_{вых\ зам\ k,i} = f(\bar{F}_{зам\ k,i})$,

$$\text{где } \bar{F}_{зам\ k,i} = \frac{F_{отв\ зам\ k,i\Sigma}}{F_{гоф\ k,i}} \quad (1.18)$$

Вычисление $\xi_{вых\ зам\ k,i}$ выполняется в зависимости от расположения отверстий в гофрах и значений $\xi_{вых\ исх\ k}$:

- для бокового расположения отверстий (в случае $\xi_{\text{вых}_{\text{исх } k}} = 0$) по диаграмме Д11-25;
- для торцевого расположения (в случае $\xi_{\text{вых}_{\text{исх } k}} = -1$) по диаграммам Д11-22, Д11-24 и Д4-19;
- в случае, если $\xi_{\text{вых}_{\text{исх } k}} > 0$, $\xi_{\text{вых}_{\text{зам } k, i}}$ принимается равным $\xi_{\text{вых}_{\text{исх } k}}$.

где $\xi_{\text{вых}_{\text{исх } k}}$ - значение гидравлического сопротивления выхода из гофра для k-ой поверхности, заданное в исходной информации.

Ниже приведен алгоритм вычисления $\xi_{\text{вых}_{\text{зам } k, i}}$ для каждого указанного расчетного случая.

1.3.2.1.3. При боковом расположении, отверстия круглого сечения, используется диаграмма Д11-25 для одного отверстия ($\xi_{\text{вых}_{\text{исх } k}} = 0$). $\xi_{\text{вых}_{\text{зам } k, i}}$ вычисляется интерполяцией сплайном по значениям $\bar{F}_{\text{зам } k, i}$. Функция $\xi_{\text{вых}} = f(\bar{F})$, для этого случая, представлена в табл. 2.

Табл. 2.

$\xi_{\text{вых}}$	300.	65.7	45.0	30.0	16.4	10.0	7.30	5.50	4.48	3.67	3.16	2.44
\bar{F}	0.00	0.20	0.25	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.0	1.20

1.3.2.1.4. При торцевом расположении отверстий ($\xi_{\text{вых}_{\text{исх } k}} = -1$), расчет

$\xi_{\text{вых}_{\text{зам } k, i}}$ выполняется:

- по диаграмме Д11-22, если $Re \geq 10^5$;
- по диаграммам Д11-24 и Д4-19, если $Re < 10^5$.

Для этого расчетного случая используется следующий алгоритм вычисления $\xi_{\text{вых}_{\text{зам } k, i}}$:

1) Определяется $Re_{\text{зам } k, i}$ по формуле

$$Re_{\text{зам } k, i} = \frac{G_{\text{отв } \text{зам } k, i \Sigma} \cdot d_{\text{отв } \text{зам } k, i \Sigma}}{3600 \cdot F_{\text{отв } \text{зам } k, i \Sigma} \cdot \mu \cdot g}$$

где μ - коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$

$$\mu = 1.7336 \cdot \sqrt{1 + 0.003665 \cdot t_g} \cdot (1 + 0.0008 \cdot t_g)^2 \cdot 10^6$$

2) Определяется $\xi_{\text{кв } k, i}$ (диаграмма Д11-22) по формуле

$$\xi_{\text{кв } k, i} = \frac{(1 + 0.5 \cdot (1 - \bar{F}_{\text{зам } k, i})^{0.75} + 1.41 \cdot (1 - \bar{F}_{\text{зам } k, i})^{0.375})}{\bar{F}_{\text{зам } k, i}^2}$$

3) Если $Re_{зам_{k,i}} \geq 10^5$, принимается

$$\xi_{вблх_{зам_{k,i}}} = \xi_{кв_{k,i}}$$

4) Если $Re_{зам_{k,i}} < 10^5$, то $\xi_{вблх_{зам_{k,i}}}$ находится в соответствии с диаграммами Д4-19 и Д11-24 в следующей последовательности:

- по полученным значениям $Re_{зам_{k,i}}$ (в соответствии с диаграммой Д4-19) путем интерполяции сплайном определяются значения $\varepsilon_{0_{зам_{k,i}}}$ как функция $\varepsilon_{0_{Re}} = F(Re)$ (табулированные значения функции приведены в табл. 3);
- по значениям $\bar{F}_{зам_{k,i}}$, вычисленным по формуле 1.18, и полученным значениям $\varepsilon_{0_{зам_{k,i}}}$ путем интерполяции сплайном определяются $\xi_{\varphi_{зам_{k,i}}}$, как функция $\xi_{\varphi} = F(\varepsilon_{\varphi}, \bar{F})$; табулированные значения функции приведены в таблицы 4;
- в соответствии с диаграммой Д11-24 определяются значения $\xi_{вблх_{зам_{k,i}}}$ по формуле

$$\xi_{вблх_{зам_{k,i}}} = \xi_{\varphi_{зам_{k,i}}} \cdot \frac{1}{\bar{F}_{зам_{k,i}}^2} + \varepsilon_{0_{зам_{k,i}}} \cdot \xi_{кв_{k,i}}$$

Табл. 3

Re	25	4·10	6·10	10 ²	2·10	4·10	·10 ³	2·10	4·10	10 ⁴	2·10	10 ⁵	2·10	·10 ⁶
$\varepsilon_{0_{Re}}$	.34	.36	.37	.40	.42	.46	.53	.59	.64	.74	.81	.94	.96	.98

Табл. 4

\bar{F}	Значения ξ_{φ}													
0.00	1.94	1.38	1.14	0.89	0.69	0.64	0.39	0.30	0.22	0.15	0.11	0.04	0.01	0.00
0.20	1.78	1.36	1.05	0.85	0.67	0.57	0.36	0.26	0.20	0.13	0.09	0.03	0.01	0.00
0.30	1.57	1.16	0.88	0.75	0.57	0.43	0.30	0.22	0.17	0.10	0.07	0.02	0.01	0.00
0.40	1.35	0.99	0.79	0.57	0.40	0.28	0.19	0.14	0.10	0.06	0.04	0.02	0.01	0.00
0.50	1.10	0.75	0.55	0.34	0.19	0.12	0.07	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00
0.60	0.85	0.56	0.30	0.19	0.10	0.06	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
0.70	0.58	0.37	0.23	0.11	0.06	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.80	0.40	0.24	0.13	0.06	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.90	0.20	0.13	0.08	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.95	0.03	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

1.3.2.1.5. Если в исходной информации задано $\xi_{вблх_{уцх_{k,i}}} > 0$, то принимается

$$\xi_{вблх_{зам_{k,i}}} = \xi_{вблх_{уцх_{k,i}}} \tag{1.19}$$

1.3.2.1.6. По полученным значениям замеренного суммарного гидравлического сопротивления $\xi_{\Sigma_{зам_{k,i}}}$ и замеренного гидравлического сопротивления выхода из гофра $\xi_{вблх_{зам_{k,i}}}$ определяется гидравлический коэффициент путевых потерь в каждом гофре

$$\xi_{нум_{k,i}} = \xi_{\Sigma_{зам_{k,i}}} - \xi_{вых_{зам_{k,i}}} \quad (1.20)$$

1.3.2.2. Определение гидравлических сопротивлений и диаметров отверстий по заданному давлению воздуха в камере $P_{кам\ зад}$.

Для обеспечения требуемых расходов через гофр по заданному давлению воздуха в камере $P_{кам\ зад}$ (с учетом расхода воздуха через гофр $G_{гоф\ зад_{k,i}}$, рассчитанного ранее), для каждого гофра каждой поверхности определяются:

- коэффициент заданного суммарного гидравлического сопротивления $\xi_{\Sigma_{зад_{k,i}}}$;
- коэффициент заданного гидравлического сопротивления выхода $\xi_{вых_{зад_{k,i}}}$;
- параметры заданных (расчетных) выходных отверстий: суммарные площади и диаметры отверстий $F_{отв_{зад_{k,i,\Sigma}}}$ и $d_{отв_{зад_{k,i,\Sigma}}}$, площади и диаметры одного отверстия, $F_{отв_{зад_{k,i,j}}}$ и $d_{отв_{зад_{k,i,j}}}$.

Ниже приводится алгоритм вычисления указанных параметров.

1.3.2.2.1. Определяется заданный перепад давления воздуха в камере, $кг/м^2$:

$$\Delta P_{кам\ зад} = P_{кам\ зад} - P_{атм} \quad (1.21)$$

1.3.2.2.2. Определяется заданный удельный вес воздуха в камере $\gamma_{зад}$, $кг/м^3$, в

$$\gamma_{зад} = \frac{P_{кам\ зад}}{29.3 \cdot (273 + t_e)} \quad (1.22)$$

1.3.2.2.3. По значению заданного расхода воздуха в каждом гофре $G_{гоф\ зад_{k,i}}$, вычисленному по формуле 1.14, определяется заданный расход для каждого отверстия каждого гофра в предположении, что диаметры отверстий в каждом гофре равны, $кг/ч$

$$G_{отв_{зад_{k,i,j}}} = \frac{G_{гоф\ зад_{k,i}}}{n_{отв_k}} \quad (1.23)$$

где $n_{отв_k}$ - кол-во отверстий в гофрах на k -ой поверхности

1.3.2.2.4. Определяется заданная скорость воздуха в гофре, $м/с$

$$V_{гоф\ зад_{k,i}} = \frac{G_{гоф\ зад_{k,i}}}{3600 \cdot F_{гоф_{k,i}} \cdot \gamma_{зад}} \quad (1.24)$$

1.3.2.2.5. Гидравлические сопротивления для каждого гофра каждой поверхности:

суммарные, замеренные и путевые, рассчитанные по $P_{кам\ зад}$ определяются, исходя из условия

$$\xi_{\Sigma_{зад_{k,i}}} = \xi_{нум_{k,i}} + \xi_{вых_{зад_{k,i}}}$$

где

$\xi_{\Sigma \text{зад } k,i}$ - суммарное гидравлическое сопротивление;

$\xi_{\text{вых } \text{зад } k,i}$ - гидравлическое сопротивление выхода из гофра;

$\xi_{\text{нум } k,i}$ - гидравлический коэффициент путевых потерь,

Ниже описывается алгоритм вычисления $\xi_{\Sigma \text{зад } k,i}$ и $\xi_{\text{вых } \text{зад } k,i}$.

1.3.2.2.6. Определяется суммарное заданное (определенное по значению $\Delta P_{\text{КАМ } \text{зад}}$) гидравлическое сопротивление каждого гофра

$$\xi_{\Sigma \text{зад } k,i} = \frac{\Delta P_{\text{КАМ } \text{зад}} \cdot 2 \cdot g}{\gamma_{\text{зад}} \cdot V_{\text{гоф } \text{зад } k,i}^2} \quad (1.25)$$

1.3.2.2.7. Определяется заданный гидравлический коэффициент сопротивления выхода

$$\xi_{\text{вых } \text{зад } k,i \Sigma} = \xi_{\Sigma \text{зад } k,i} - \xi_{\text{нум } k,i} \quad (1.26)$$

1.3.2.2.8. Диаметры заданных отверстий $d_{\text{отв } \text{зад } k,i,j}$ находятся методом последовательных приближений: определяется такое значение $d_{\text{отв } \text{зад } k,i,j}$, при котором выполняется условие $d_{\text{отв } \text{зад } k,i \Sigma} = f(\xi_{\text{вых } \text{зад } k,i \Sigma})$, где значение $\xi_{\text{вых } \text{зад } k,i \Sigma}$ равно значению, вычисленному в п. 1.3.2.2.7.

Алгоритм вычислений, основан на определении функции $\xi_{\text{вых } \text{зад } k,i} = f(\bar{F}_{\text{зад } k,i})$ в зависимости от расположения отверстий в гофрах и выполняется в следующей последовательности:

1. В качестве начального значения $d_{\text{отв } \text{зад } k,i,j}^1$ (в 1-ом приближении) принимается $d_{\text{отв } \text{зад } k,i,j}^1 = d_{\text{отв } \text{исх } k,i,j}$

где $d_{\text{отв } \text{исх } k,i,j}$ - исходные значения диаметров отверстий в гофрах.

2. По значению $d_{\text{отв } \text{зад } k,i,j}^1$ определяются заданные суммарные площади отверстий $F_{\text{отв } \text{зад } k,i \Sigma}^1 = \frac{3.14 \cdot (d_{\text{отв } \text{зад } k,i,j}^1)^2 \cdot n_{\text{отв } k}}{4}$

3. Определяется значение $\bar{F}_{\text{зад } k,i}^1$ по формуле

$$\bar{F}_{\text{зад } k,i}^1 = \frac{F_{\text{отв } \text{зад } k,i \Sigma}^1}{F_{\text{гоф } k,i}}$$

4. По вычисленному значению $\bar{F}_{\text{зад } k,i}^1$ находится коэффициент потерь на выходе из отверстий $\xi_{\text{вых } \text{зад } k,i}^1$ как функция $\xi_{\text{вых } \text{зад } k,i} = f(\bar{F}_{\text{зад } k,i})$ по алгоритму, приведенному в п. 1.3.2.1.2, с заменой значений с индексом «зам» на значения с индексом «зад».

Предусматривается два случая расположения отверстий в гофрах:

- боковое ($\xi_{\text{вых}_{\text{исх}_k}^1} = 0$) - расчет выполняется по диаграмме Д11-25 за одно приближение;
- торцевое ($\xi_{\text{вых}_{\text{исх}_k}^1} = -1$) - расчет выполняется по диаграммам Д11-22, Д11-24, Д4-19 и продолжается по описанному ниже алгоритму.

5. Производится сравнение вычисленного начального значения $\xi_{\text{вых}_{\text{зад}_{k,i}}^1}$ со значением $\xi_{\text{вых}_{\text{зад}_{k,i}}^2}$, вычисленным в п. 1.3.2.2.7.

Если условие $|\xi_{\text{вых}_{\text{зад}_{k,i}}^2} - \xi_{\text{вых}_{\text{зад}_{k,i}}^1}| \leq \delta\xi$ не выполняется, процесс вычислений продолжается, начиная с п.1), где в качестве следующего значения диаметра отверстий принимается значение

$$d_{\text{отв}_{\text{зам}_{k,i,j}}^2} = d_{\text{отв}_{\text{зам}_{k,i,j}}^1} + \Delta d_{\text{отв}}$$

где $\xi d_{\text{отв}}$ - шаг вычислений $d_{\text{отв}}$;

$\delta\xi$ - заданная точность вычислений $\xi_{\text{вых}}$.

Итерационный процесс заканчивается при достижении условия

$$|\xi_{\text{вых}_{\text{зад}_{k,i}}^m} - \xi_{\text{вых}_{\text{зад}_{k,i}}^{m-1}}| \leq \delta\xi$$

где m - количество итераций.

1.3.2.3. Определение параметров доработанных отверстий.

Параметры доработанных отверстий определяются по заданному значению давления воздуха в камере $P_{\text{кам}_{\text{зад}}}$ и значениям диаметров доработанных отверстий $d_{\text{отв}_{\text{дор}_{k,i,j}}}$.

Расчет выполняется, если в исходной информации указываются значения диаметров доработанных отверстий - $d_{\text{отв}_{\text{дор}_{k,i,j}}} > 0$.

Определяются следующие параметры доработанных отверстий:

- суммарные расходы воздуха через доработанные отверстия $G_{\text{отв}_{\text{дор}_{k,i,\Sigma}}}$;
- гидравлические потери на выходе из отверстий $\xi_{\text{вых}_{\text{дор}_{k,i,\Sigma}}}$;
- суммарные гидравлические потери $\xi_{\Sigma_{\text{дор}_{k,i}}}$.

Алгоритм вычисления указанных параметров приводится ниже.

1.3.2.3.1. Определяются суммарные площади доработанных отверстий

$$F_{\text{отв}_{\text{дор}_{k,i,\Sigma}}} = \frac{3.14 \cdot \left(d_{\text{отв}_{\text{дор}_{k,i,j}}} \right)^2 \cdot n_{\text{отв}_{\text{дор}_{k,i,\Sigma}}}}{4} \quad (1.27)$$

где $n_{\text{отв}_{\text{дор}_{k,i,\Sigma}}}$ - количество доработанных отверстий k -ой поверхности,

заданное в исходной информации

1.3.2.3.2. Определяется значение $\bar{F}_{доп\ k,i}$ по формуле

$$\bar{F}_{доп\ k,i} = \frac{F_{отв\ доп\ k,i\Sigma}}{F_{зоф\ k,i}} \quad (1.28)$$

1.3.2.3.3. По вычисленному значению $\bar{F}_{зад\ k,i}^1$ определяются коэффициенты потерь на выходе из суммарных доработанных отверстий $\xi_{вых\ доп\ k,i\Sigma}$ как функция $\xi_{вых\ доп\ k,i\Sigma} = (\bar{F}_{доп\ k,i})$. Расчет выполняется по алгоритму, приведенному ранее (с учетом метода измерения перепадов давлений), где индекс «*зам*» заменяется на индекс «*доп*».

2.3.2.3.1. Определяются суммарные коэффициенты потерь для суммарных доработанных отверстий

$$\xi_{\Sigma\ доп\ k,i} = \xi_{нут\ k,i} + \xi_{вых\ доп\ k,i\Sigma} \quad (1.29)$$

где значения $\xi_{нут\ k,i}$ - определены в п. 1.3.2.1.2.

2.3.2.3.2. Определяются расходы воздуха в гофрах через суммарные доработанные отверстия

$$G_{отв\ доп\ k,i\Sigma} = 3600 \cdot F_{зоф\ k,i} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_{кам\ зад} \cdot 2 \cdot g \cdot \gamma_{зад}}{\xi_{\Sigma\ доп\ k,i}}} \quad (1.30)$$

2. Проектировочный расчет

2.1. Общие положения проектировочного расчета

2.1.1. Проектировочный расчет производится для определения площади, диаметров и количества выходных отверстий в каждом гофре (или площади щели, если выдув воздуха производится через щель) по известным значениям расхода воздуха через верхние и нижние гофры (из условия равномерности распределения расходов воздуха на обогреваемых поверхностях, либо обеспечения требуемых расходов на определенных участках противоблуденителя).

2.1.2. Для выполнения проектировочного расчета должны быть заданы:

- давление воздуха в камере $P_{кам\ зад}$;
- суммарный расход воздуха на все гофры G_{Σ} ;
- относительные расходы воздуха через верхние и нижние гофры \bar{G}_k
- число гофров верхней и нижней поверхности;
- параметры гофров: длина, высота и ширина (выбираются предварительно на основании тепловых расчетов с учетом конструктивного исполнения гофров и технологичности их изготовления);
- количество отверстий в гофрах на верхней и нижней поверхности;
- диаметры заданных и доработанных (при необходимости их расчета) отверстий.

2.1.3. В результатах проектировочного расчета определяются:

- расходы воздуха через каждое выходное отверстие;
- диаметры выходных отверстий и соответствующие им площади;
- коэффициенты потерь: суммарных, путевых и выходных;
- ожидаемые перепады давлений на выходных отверстиях;
- расходы воздуха для заданных (доработанных) выходных отверстий;
- коэффициенты потерь для доработанных отверстий.

2.2. Алгоритм вычисления проектировочного расчета

2.2.1. По заданному давлению воздуха в камере $P_{камзад}$ определяется заданный перепад давления воздуха в камере, $кг/м^2$

$$\Delta P_{камзад} = P_{камзад} - P_{атм} \quad (2.1)$$

2.2.2. Определяется заданный удельный вес воздуха в камере, $кг/м^3$

$$\gamma_{зад} = \frac{P_{атм} + \Delta P_{камзад}}{29.3 \cdot (273 + t_g)} = \frac{P_{камзад}}{29.3 \cdot (273 + t_g)} \quad (2.2)$$

2.2.3. Определяются площади гофров $F_{гофр_{k,i}}$, $м^2$

$$F_{гофр_{k,i}} = B_{гоф_{k,i}} \cdot H_{гоф_{k,i}} \quad (2.3)$$

где

$B_{гоф_{k,i}}$ - ширина гофра, м;

$H_{гоф_{k,i}}$ - высота гофра, м.

2.2.4. Определяются периметры гофров $\Pi_{гоф_{k,i}}$, м:

$$\Pi_{гоф_{k,i}} = 2 \cdot (B_{гоф_{k,i}} + H_{гоф_{k,i}}) \quad (2.4)$$

2.2.5. Определяется заданный расход воздуха на каждый гофр $G_{гоф_{зад_{k,i}}}$ каждой поверхности с учетом заданного коэффициента расхода $K_{G_{k,i}}$, который обеспечивает изменение расхода воздуха на отдельные участки (например, в районе нервюр желательнее иметь гофры с повышенными удельными расходами), $кг/ч$

$$G_{гоф_{зад_{k,i}}} = \frac{G_{\Sigma} \cdot \bar{G}_k}{\sum_{i=1}^{N_{отв_k}} (F_{гоф_{k,i}} \cdot K_{G_{k,i}})} \cdot F_{гоф_{k,i}} \cdot K_{G_{k,i}} \quad (2.5)$$

где

$\sum_{i=1}^{N_{отв_k}} (F_{гоф_{k,i}} \cdot K_{G_{k,i}})$ - сумма произведений площади гофра на коэффициент увеличения расхода для рассчитываемой поверхности.

2.2.6. Определяется заданный суммарный расход воздуха для отверстий гофра, $кг/ч$.

$$G_{отв_{зад_{k,i,j}}} = \frac{G_{гоф_{зад_{k,i}}}}{n_{отв_k}} \quad (2.6)$$

где

$n_{отв_k}$ - количество требуемых отверстий в гофра в предположении, что диаметры отверстий в каждом гофре равны.

2.2.7. Определяется заданная скорость воздуха в гофре, м/с

$$V_{гоф\ зад_{k,i}} = \frac{G_{гоф\ зад_{k,i}}}{3600 \cdot F_{гоф\ k,i} \cdot \gamma_{зад}} \quad (2.7)$$

2.2.8. По значениям $\Delta P_{кам\ зад}$ и $G_{гоф\ зад_{k,i}}$ определяется заданный суммарный коэффициент потерь для каждого гофра каждой поверхности

$$\xi_{\Sigma\ зад_{k,i}} = \Delta P_{кам\ зад} \cdot 2 \cdot g \cdot \gamma_{зад} \cdot \left(\frac{3600 \cdot F_{гоф\ k,i}}{G_{гоф\ зад_{k,i}}} \right)^2 \quad (2.8)$$

2.2.9. Определяется гидравлический коэффициент путевых потерь $\xi_{нум\ k,i}$ как сумма потерь на входе в гофры $\xi_{вх}$ и длинных потерь $\xi_{дл\ k,i}$

$$\xi_{нум\ k,i} = \xi_{вх} + \xi_{дл\ k,i}$$

в следующей последовательности:

2.2.9.1. Определяется коэффициент сопротивления на длинные потери $\xi_{дл\ k,i}$

2.2.9.1.1. Вычисляется число Рейнольдса для воздуха в каждом гофре:

$$Re_{k,i} = \frac{V_{гоф\ зад_{k,i}} \cdot 4 \cdot F_{гоф\ k,i} \cdot \gamma_{зад}}{\Pi_{гоф\ k,i} \cdot \mu \cdot g} \quad (2.9a)$$

где μ - коэффициент кинематической вязкости, м/с², определяется как

$$\mu = 1.7336 \cdot \sqrt{1 + 0.003665 \cdot t_g} \cdot (1 + 0.0008 \cdot t_g)^2 \cdot 10^6 \quad (2.9б)$$

2.2.9.1.2. Определяется коэффициент трения (для круглого сечения) $\lambda_{мп\ k,i}$ в зависимости от значений $Re_{k,i}$:

$$1) \text{ Если } Re_{k,i} \leq 2000, \quad \text{то } \lambda_{мп\ k,i} = \frac{64}{Re_{k,i}}; \quad (2.10)$$

$$2) \text{ Если } 2000 < Re_{k,i} \leq 4000, \quad \text{то } \lambda_{мп\ k,i} = \frac{0.3164}{Re_{k,i}^{0.25}}; \quad (2.11)$$

$$3) \text{ Если } Re_{k,i} > 4000, \quad \text{то } \lambda_{мп\ k,i} = \frac{1}{(1.8 \cdot \lg Re_{k,i} - 1.64)^2} \quad (2.12)$$

2.2.9.1.3. Так как сечения гофров прямоугольные, то коэффициенты трения $\lambda_{мп\ k,i}$ определяются с учетом поправки $k_{I_{k,i}}$ на прямоугольное сечение

$$\lambda_{мп\ пр\ k,i} = k_{I_{k,i}} \cdot \lambda_{мп\ k,i} \quad (2.13)$$

Величины $k_{I_{k,i}}$ определяются как функция $k_I = f\left(\frac{H_{\text{гоф}}}{B_{\text{гоф}}}\right)$ путем интерполяции по значениям функции $k_I = f\left(\frac{H_{\text{гоф}}}{B_{\text{гоф}}}\right)$, представленным в табл. 5.

Таблица 5

$H_{\text{гоф}}/B_{\text{гоф}}$	0.00	0.10	0.20	0.40	0.50
k_I	1.50	1.34	1.20	1.02	1.00

2.2.9.1.4. Определяется коэффициент сопротивления на длинные потери

$$\xi_{\text{дл}_{k,i}} = \frac{\lambda_{\text{мп}_{\text{np}_{k,i}}} \cdot L_{\text{гоф}_{k,i}} \cdot \Pi_{\text{гоф}_{k,i}}}{4 \cdot F_{\text{гоф}_{k,i}}} \quad (2.14)$$

где $L_{\text{гоф}_{k,i}}$ - длина гофра;

2.2.9.2. Определяется коэффициент потерь на входе в гофр (по диаграмме ДЗ-11 - вход в трубу или канал, расположенный на стенке) с учетом поправки на кривизну ($\xi_{\text{кр}}$)

$$\xi_{\text{вх}} = 0.63 + \xi_{\text{кр}} = 0.63 + 0.07 = 0.70 \quad (2.15)$$

где $\xi_{\text{кр}} = 0.07$ - принятая поправка на кривизну (численное значение поправки определено с учетом технологических особенностей изготовления входного участка гофров по диаграмме ДЗ-4).

2.2.9.3. Определяется гидравлический коэффициент путевых потерь

$$\xi_{\text{пут}_{k,i}} = \xi_{\text{дл}_{k,i}} + \xi_{\text{вх}} \quad (2.16)$$

2.2.10. Определяется заданный коэффициент потерь на выходе из гофров

$$\xi_{\text{вых}_{\text{зад}_{k,i}}} = \xi_{\Sigma_{\text{зад}_{k,i}}} - \xi_{\text{пут}_{k,i}} \quad (2.17)$$

2.2.11. По полученным значениям $\xi_{\text{вых}_{\text{зад}_{k,i}}}$ рассчитываются площади $F_{\text{отв}_{\text{зад}_{k,i,\Sigma}}}$ и диаметры заданных отверстий $d_{\text{отв}_{\text{зад}_{k,i,j}}}$.

Определяется такое значение $d_{\text{отв}_{\text{зад}_{k,i,j}}}$, при котором выполняется условие

$$d_{\text{отв}_{\text{зад}_{k,i,\Sigma}}} = f(\xi_{\text{вых}_{\text{зад}_{k,i,\Sigma}}}),$$

где значение $\xi_{\text{вых}_{\text{зад}_{k,i,\Sigma}}}$ равно значению, вычисленному в п. 2.2.10.

Алгоритм вычислений, основан на определении функции $\xi_{\text{вых}_{\text{зад}_{k,i}}} = f(\bar{F}_{\text{зад}_{k,i}})$ в зависимости от расположения отверстий в гофрах и выполняется в следующей последовательности:

1) По значению $\xi_{\text{ввлх}_{\text{зад}_{k,i}}}$, полученному в п. 2.2.10, интерполяцией сплайном определяется $\bar{F}_{\text{зад}_{k,i}}$ (табулированные значения функции $f(\bar{F}) = \xi_{\text{ввлх}}$, представлены в табл. 2, что соответствует таблице, приведенной в диаграмме Д11-25).

2) По значению $\bar{F}_{\text{зад}_{k,i}}$ определяется

$$F_{\text{омв}_{\text{зад}_{k,i}\Sigma}} = \bar{F}_{\text{зад}_{k,i}} \cdot F_{\text{зоф}_{k,i}} \quad (2.18a)$$

3) По значению $F_{\text{омв}_{\text{зад}_{k,i}\Sigma}}$ определяется $d_{\text{омв}_{\text{зад}_{k,i,j}}}$

$$d_{\text{омв}_{\text{зад}_{k,i,j}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{\text{омв}_{\text{зад}_{k,i}\Sigma}}}{3.14 \cdot n_{\text{омв}_k}}} \quad (2.18b)$$

4) Функция $\xi_{\text{ввлх}_{\text{зад}_{k,i}}} = f(\bar{F}_{\text{зад}_{k,i}})$ определяется в зависимости от расположения отверстий в гофрах:

– при боковом расположении отверстий ($\xi_{\text{ввлх}_{\text{уцх}_k} = 0$) расчет выполняется по диаграмме Д11-25 за одно приближение, при этом $d_{\text{омв}_{\text{зад}_{k,i,j}}}$ принимается равным значению, определенному в п. 3) по формуле 3.2.11b;

– при торцевом расположении отверстий ($\xi_{\text{ввлх}_{\text{уцх}_k} = -1$) расчет функции $\xi_{\text{ввлх}_{\text{зад}_{k,i}}} = f(\bar{F}_{\text{зад}_{k,i}})$ выполняется методом последовательных приближений по алгоритму, описанному в подпунктах 2) ÷ 5) пункта п. 1.3.2.2.8. (с использованием диаграмм Д11-22, Д11-24, Д4-19), при этом, значение $d_{\text{омв}_{\text{зад}_{k,i,j}}}$, полученное в п. 3), принимается в качестве начального значения (1-го приближения)

$$d_{\text{омв}_{\text{зад}_{k,i,j}}}^1 = d_{\text{омв}_{\text{зад}_{k,i,j}}}$$

Итерационный процесс заканчивается при достижении условия

$$|\xi_{\text{ввлх}_{\text{зад}_{k,i}}}^m - \xi_{\text{ввлх}_{\text{зад}_{k,i}}}^{m-1}| \leq \delta\xi$$

где m - количество итераций.

$\delta\xi$ - заданная точность вычислений $\xi_{\text{ввлх}}$.

Таким образом, в результате вычислений определяется значение $\bar{F}_{\text{зад}_{k,i}}^m$, удовлетворяющее условию $\bar{F}_{\text{зад}_{k,i}} = f(\xi_{\text{ввлх}_{\text{зад}_{k,i}}})$, где значение $\xi_{\text{ввлх}_{\text{зад}_{k,i}}}$ равно значению, определенному в п.2.2.10.

5. По значению $\bar{F}_{\text{зад}_{k,i}}$ находятся суммарные площади отверстий по формуле (2.18a).

6. По значению $F_{отв\ за\ до\ k,i\Sigma}$ определяются заданные диаметры отверстий $d_{отв\ за\ до\ k,i,j}$ по формуле 2.18б.

2.2.12. По полученным значениям $d_{отв\ за\ до\ k,i,j}$ определяются коэффициенты расхода воздуха $\mu_{отв\ k,i}$, скорости воздуха на выходе из отверстий $V_{отв\ за\ до\ k,i,j}$ и ожидаемые перепады давлений $\Delta P_{отв\ за\ до\ k,i\Sigma}$.

Расчет выполняется в зависимости от метода измерения перепадов давления.

2.2.12.1. Если замер перепада давления должен выполняться специальным мерным устройством - насадком, (в этом случае в исходной информации задается $d_{м/у_k} > 0$), то указанные параметры определяются в следующей последовательности.

2.2.12.1.1. Определяется коэффициент расхода воздуха в выходных отверстиях по формуле Дарси-Вейсбаха

$$\mu_{отв\ за\ до\ k,i,j} = 0.63 + 0.37 \cdot \left(\frac{F_{отв\ за\ до\ k,i,j}}{F_{зоф\ k,i}} \right)^3$$

2.2.12.1.2. Определяется заданная скорость воздуха в отверстиях

$$V_{отв\ за\ до\ k,i,j} = \frac{G_{отв\ за\ до\ k,i,j}}{3600 \cdot F_{отв\ за\ до\ k,i,j} \cdot \mu_{отв\ за\ до\ k,i,j} \cdot \gamma_{зад}} \quad (2.19)$$

2.2.12.1.3. По полученное значение $\mu_{отв\ за\ до\ k,i,j}$ определяется ожидаемый перепад давления на выходе из отверстия по формуле

$$\Delta P_{отв\ k,i,j} = \frac{\gamma_{зад} \cdot V_{отв\ за\ до\ k,i,j}^2}{2 \cdot 9.81} \quad (2.20)$$

Полученное значение перепада давления на выходе из отверстия $\Delta P_{отв\ k,i,j}$ принимается за начальное значение (1-ое приближение) перепада давления на выходе мерного устройства:

$$\Delta P_{м/у\ k,i,j}^I = \Delta P_{отв\ k,i,j}$$

2.2.12.1.4. По начальному значению $\Delta P_{м/у\ k,i,j}^I$ методом последовательных приближений определяется такое значение $\Delta P_{м/у\ k,i,j}^m$, которое соответствует значению коэффициента расхода $\mu_{м/у\ k,i,j}$, рассчитанному в п.3.2.12.1.1.

$\Delta P_{м/у\ k,i,j}^m$ определяется по тарировочной кривой мерного устройства, которая задается функцией $\Delta P = F(\mu)$, полученной при тарировке данного мерного устройства.

Расчет определения $\Delta P_{отв\ k,i,j}$ считается завершенным, если выполняется условие

$$|\Delta P_{M/y\ k,i,j}^m - \Delta P_{M/y\ k,i,j}^{m-1}| \leq \Delta P \delta$$

где $\Delta P \delta$ - точность расчета $\Delta P_{M/y\ k,i,j}$;

m - количество приближений.

2.2.12.2. Если замер перепада давления должен выполняться Т-образником, (в этом случае в исходной информации задается $\mu_{отв_{исх\ k,i}} = 0$), то параметры, указанные в п.3.2.12, определяются в следующей последовательности.

2.2.12.2.1. Находится коэффициент расхода воздуха в выходных отверстиях $M_{вых.отв_{зам\ k,i,j}}$. Значения $M_{вых.отв_{зам\ k,i,j}}$ определяется методом интерполяции как функция $\mu_{выхотв} = F(\varepsilon_H)$

$$\text{где } \varepsilon_H = \frac{P_{атм}}{P_{кам_{зам}}}$$

Табулированные значения функции $\mu_{выхотв} = F(\varepsilon_H)$ представлены в табл. 2.2.2.4.

2.2.12.2.2. По значению $M_{вых.отв_{зам\ k,i,j}}$ находится заданная скорость воздуха в отверстии по формуле

$$V_{отв_{зад\ k,i,j}} = \frac{G_{отв_{зад\ k,i,j}}}{3600 \cdot F_{отв_{зад\ k,i,j}} \cdot M_{отв_{зад\ k,i,j}} \cdot \gamma_{зад}} \quad (2.21)$$

2.2.12.2.3. Определяется ожидаемый перепад давления на выходе из Т-образника

$$\Delta P_{отв\ k,i,j} = \frac{\gamma_{атм} \cdot V_{отв_{зад\ k,i,j}}^2}{2g} \quad (2.22)$$

2.2.13. Определяются параметры доработанных отверстий по заданным значениям давления воздуха в камере ($P_{кам_{зад}}$) и диаметров доработанных отверстий ($d_{отв_{дор\ k,i,j}}$).

Расчет выполняется, если в исходной информации указываются значения диаметров доработанных отверстий - $d_{отв_{дор\ k,i,j}} > 0$.

Определяются следующие параметры доработанных отверстий:

- суммарные расходы воздуха через доработанные отверстия $G_{отв_{дор\ k,i,\Sigma}}$;
- гидравлические потери на выходе из отверстий $\xi_{вых_{дор\ k,i,\Sigma}}$;
- суммарные гидравлические потери $\xi_{\Sigma_{дор\ k,i}}$.

Вычисление указанных параметров выполняется по алгоритму, приведенному в выше.

Если замер перепада давления производится непосредственно в отверстии (Т-образником), то значения параметров, указанных в п.3.2.12 определяются по следующему алгоритму.

- 2.2.13.1. Находится коэффициент расхода воздуха в выходных отверстиях $M_{вых.отв_{замк,i,j}}$. Значения $M_{вых.отв_{замк,i,j}}$ определяется методом интерполяции

как функция $\mu_{выхотв} = F(\epsilon_H)$

$$\text{где } \epsilon_H = \frac{P_{атм}}{P_{кам_{зам}}}$$

Табулированные значения функции $\mu_{выхотв} = F(\epsilon_H)$ представлены в табл. 1.

- 2.2.13.2. По значению $M_{вых.отв_{замк,i,j}}$ находится заданная скорость воздуха в отверстии по формуле

$$V_{отв_{задк,i,j}} = \frac{G_{отв_{задк,i,j}}}{3600 \cdot F_{отв_{задк,i,j}} \cdot M_{отв_{задк,i,j}} \cdot \gamma_{зад}}$$

- 2.2.13.3. При измерении перепада давления непосредственно в отверстии (с помощью Т-образника) перепад давления $\Delta P_{отв_{k,i,j}}$ определяется по формуле:

$$\Delta P_{отв_{k,i,j}} = \frac{\gamma_{атм} \cdot V_{отв_{задк,i,j}}^2}{2g} \quad (2.23)$$

где

$$\gamma_{атм} = \frac{P_{атм}}{29.3 \cdot (273 + t_\theta)}$$

$\gamma_{атм}$ - удельный вес воздуха при атмосферном давлении (на выходе из Т-образника), кг/м³

$$G_{отв_{замк,i,j}} = 3600 \cdot M_{отв_{замк,i,j}} \cdot F_{отв_{замк,i,j}} \cdot \sqrt{\Delta P_{отв_{замк,i,j}} \cdot 2 \cdot g \cdot \gamma_{атм}}$$

- 2.2.13.4. При измерении перепада давления на выходе из отверстия специальным мерным устройством (насадком), то ожидаемые значения перепадов давлений $\Delta P_{отв_{k,i,j}}$ определяются по формуле:

$$G_{отв_{замк,i,j}} = 3600 \cdot M_{м/y_k} \cdot F_{м/y_k} \cdot \sqrt{\Delta P_{м/y_{k,i,j}} \cdot P_{атм} \frac{2 \cdot g}{29.3 \cdot (273 + t_\theta)}} \quad (2.24)$$

$$G_{отв_{замк,i,j}} = 3600 \cdot M_{м/y_k} \cdot F_{м/y_k} \cdot \sqrt{\Delta P_{м/y_{k,i,j}} \cdot P_{атм} \frac{2 \cdot g}{\gamma_{атм}}}$$

где $F_{м/y_k}$ - площадь калибровочного отверстия мерного устройства (диаметром $d_{м/y_k}$), в котором производится замер динамического напора, м²

$$F_{M/y_k} = \frac{3.14 \cdot d^2_{M/y_k}}{4}$$

μ_{M/y_k} - коэффициент расхода воздуха из мерного устройства. Значения μ_{M/y_k} определяется (методом линейной интерполяции) по тарировочной кривой этого устройства как функция $\mu = F(\Delta P)$, которая получена по предварительной тарировке данного мерного устройства.

2.2.13.5. При измерении перепадов давления в отверстии мерным устройством вначале производится выбор самого устройства из имеющихся, при этом площадь мерного устройства $F_{M/y}$ известна.

2.2.13.6. По уравнению расхода воздуха и рассчитанной в п.п. 2.5 величине расхода воздуха через отверстие, определяется комплекс $\mu_{M/y} \cdot \sqrt{\Delta P_{отв}}$: м

$$G_{отв} = 3600 \cdot \mu_{M/y} \cdot F_{M/y} \cdot \sqrt{\Delta P_{отв} \cdot 2 \cdot g \cdot \gamma}$$

далее по известным зависимостям коэффициента расхода $\mu_{M/y} = f(\Delta p)$ (прилагается в паспорте к выбранному устройству) определяются значения $\Delta P_{отв}$, методом последовательных приближений.

3. Основные формулы и обозначения

Перепад давлений в камере, $кг/м^2$;

$$\Delta P_{кам} = P_{кам} - P_{атм} \quad (4.1)$$

где

$P_{атм}$ - давление среды, куда выходит воздух, (если воздух выходит в атмосферу, то атмосферное давление), $кг/м^2$;

$P_{кам}$ - давление воздуха в камере, $кг/м^2$.

Удельный вес воздуха, $кг/м^3$:

$$\rho = \frac{P}{RT} = \frac{P}{29.23 \cdot (t_g + 273)}$$

где

t_g - температура воздуха.

Расход воздуха в отверстии, $кг/ч$:

а) Если замер динамического напора производится мерным устройством типа расходомерного насадка

$$G_{отв} = 3600 \cdot \mu_{M/y} \cdot F_{M/y} \cdot \sqrt{\Delta P_{отв} \cdot 2 \cdot g \cdot \rho} = F_{G_{отв}}(\mu_{M/y}, F_{M/y}, \Delta P_{отв} \cdot \rho) \quad (3.3)$$

где

$F_{M/y}$ - площадь отверстия в мерном устройстве;

$\Delta P_{отв}$ - перепад давления воздуха на выходе из отверстия;

$\mu_{M/y}$ - коэффициент сопротивления на выходе из отверстия в мерном устройстве;

Если замер динамического напора производится непосредственно в отверстии

$$G_{отв} = 3600 \cdot \mu_{вых_{отв}} \cdot F_{отв} \cdot \sqrt{\Delta P_{отв} \cdot 2 \cdot g \cdot \gamma} = F_{G_{отв}}(\mu_{вых_{отв}}, F_{отв}, \Delta P_{отв}, \gamma) \quad (1.3.2)$$

где

$F_{отв}$ - площадь отверстия;

$\mu_{вых_{отв}}$ - коэффициент сопротивления на выходе из отверстия;

Замеренный расход воздуха в гофрах:

$$G_{гоф} = \sum_{i=1}^{N_{отв}} G_{отв_i}$$

Расчетный расход воздуха в отверстии:

$$G_{отв} = G_{гоф_{зад k,i}} = \frac{G_{\Sigma} \cdot \bar{G}_k}{\sum_{i=1}^{N_{отв k}} (F_{гоф_{k,i}} \cdot K_{G_{k,i}})} \cdot F_{гоф_{k,i}} \cdot K_{G_{k,i}}$$

Расчетный расход воздуха в гофре:

$$G_{гоф} = \frac{G_{\Sigma}}{n_{гоф}}$$

Скорость воздуха в отверстиях гофров при докритическом истечении из отверстий в гофрах:

$$V_{отв} = \frac{G_{отв}}{3600 \cdot F_{отв} \cdot \gamma \cdot \mu_{вых_{отв}}} = F_{V_{отв}}(G_{отв}, F_{отв}, \mu_{вых_{отв}}, \gamma) \quad (1.7)$$

Скорость воздуха в гофре:

$$V_{отв} = \frac{G_{гоф}}{3600 \cdot F_{гоф} \cdot \gamma} = F_{V_{отв}}(G_{гоф}, F_{гоф}, \gamma) \quad (1.8)$$

Суммарный коэффициент потерь давления воздуха (коэффициент сопротивления в гофре)

$$\xi_{\Sigma} = \Delta P_{кам} \cdot 2 \cdot g \cdot \gamma \cdot \left(\frac{3600 \cdot F_{гоф}}{G_{отв \Sigma}} \right)^2 = F_{\xi_{\Sigma}}(\Delta P_{кам}, F_{гоф}, G_{отв \Sigma}, \gamma) \quad (1.9)$$

$$\xi_{\Sigma} = \xi_{пут} + \xi_{вых}$$

где $F_{гоф}$ - площадь гофра;

$G_{отв \Sigma}$ - суммарная площадь отверстий;

$\xi_{вых_{отв}}$ - коэффициент потерь давления на выходе из отверстия;

$\xi_{пут}$ - коэффициент путевых потерь;

Коэффициент путевых потерь давления воздуха в гофре

$$\xi_{пут} = \xi_{\Sigma} - \xi_{вых_{отв}} = \xi_{вх} + \xi_{трения} \quad (1.10)$$

где $\xi_{вх_{отв}}$ - коэффициент потерь давления на входе в отверстие;

$\xi_{трения}$ - коэффициент потерь давления на трение.

Используемые индексы:

k - номер поверхности,

где

$k = 1$ соответствует верхней поверхности;

$k = 2$ соответствует нижней поверхности;

i - номер гофра, $i = 1, 2, \dots, N_{\text{гофк}}$;

j - номер отверстия в каждом i -ом гофре k -ой поверхности;
 $j = 1, \dots, N_{\text{отв}_{k,i}}$;

$N_{\text{отв}_{k,i}}$ - количество отверстий в каждом гофре k -ой поверхности;

$N_{\text{гофк}}$ - количество гофров на k -ой поверхности;

зам - индекс, который присваивается параметрам, определенным по замеренному давлению воздуха в камере;

зад - индекс, который присваивается параметрам, определенным по заданному давлению воздуха в камере;

дор - индекс, который присваивается параметрам, определенным для доработанных отверстий;

м/у - индекс относится к мерному устройству;

Относительный расход воздуха для каждой поверхности:

$$\overline{G}_k = \overline{G}_{\text{исх}}, \quad \text{если } k = 1;$$

$$\overline{G}_k = 1 - \overline{G}_{\text{исх}}, \quad \text{если } k = 2,$$

где $\overline{G}_{\text{исх}}$ - относительный расход воздуха для $k = 1$, заданный в исходной информации

Расчеты выполняются для каждого гофра каждой поверхности для значений i, j, k , указанных в п. 1.8.

Выводы

1. Разработана методика расчета гофров самолетных протиообледенителей воздушно тепловых систем.

2. Методика позволяет проводить как поверочные, так и проектировочные расчеты.

3. Методика основана как на теоретических зависимостях так и на привлечении экспериментальных данных параллельно проводимых по расчету газодинамических замеров что обеспечивает высокую точность получаемых результатов.

Список литературы

1. Идельчик, И. Е, Справочник по гидравлическим сопротивлениям. [Текст] / И. Е. Идельчик. – Москва, 1992г.
2. Быков, А.Е. Высотное оборудование. [Текст] А.Е. Быков. – М., – 1972.
3. Тенишев, Р.Х. Противообледенительные системы летательных аппаратов. [Текст] / Р.Х. Тенишев. – М.; Машиностроение, 1967.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.И. Рыженко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

Поступила в редакцию 06.09.11

Методика і алгоритми розрахунку гофрів протиобліднювачів повітряно-теплових систем літаків

Розроблено методику розрахунку гофрів протиобліднювачів повітряно-теплових систем літаків як в режимі високоточних вивірляльних розрахунків, так і в режимі проектувального розрахунку.

Ключові слова: протиобліднювачі, гофри, коефіцієнти опору, діаметри вихідних отворів.

Procedure and of performing calculation of airplane hot-air anti-icing system deicers

The procedure of performing calculations of deicer corrugations of the airplane anti-icing systems has been developed both for high-precision checking calculation and for design calculations.

Keywords: deicers, corrugations, resistance coefficients, outlet diameters