

Особенности проектирования предкрылков с учётом защиты крыла от льдообразования

Авиационный научно-технический комплекс им. О. К. Антонова

Ключевые слова: геометрические параметры, носовая часть крыла, самолёт, льдообразование.

Ключові слова: геометричні параметри, носова частина крила, літак, утворення льоду.

Key words: geometric parameters, wing leading edge, aircraft, ice-forming.

Форму предкрылка определяют в основном из аэродинамических характеристик взлёта и посадки самолёта, в то время как его конструкцию – из условий обеспечения необходимых температурных перепадов на поверхности исключающих образование льда на несущих аэродинамических поверхностях ЛА в условиях естественного обледенения.

При этом к особенностям решения этой задачи относится:

1. Выбор метода, используемого для защиты аэродинамических поверхностей от льдообразования:
 - 1.1. Воздушно-тепловая противообледенительная система (ВТ ПОС).
 - 1.2. Электротепловая противообледенительная система (ЭТ ПОС).
 - 1.3. Электроимпульсная противообледенительная система (ЭИ ПОС).
2. В зависимости от энергетической вооружённости самолёта, а также постоянного или циклического определение того или иного вида защиты воздействия предлагаемая конструкция будет существенно влиять на вновь создаваемую систему.
3. Определение зоны необходимой для предотвращения льдообразования и особенно образования “барьерного льда”, ухудшающего аэродинамические свойства ЛА, что существенно сказывается на начальном и конечном этапах полёта, на которых ЛА особенно чувствителен к малейшим изменениям аэродинамических свойств и тяговых характеристик двигателя.
4. Определение количества тепла, необходимого для предотвращения льдообразования.

В настоящее время наиболее распространена ВТ ПОС как наиболее экономичная и лёгкая в эксплуатации. На современном этапе развития целесообразной конструкцией эффективно использующей энергетику воздуха, отбираемого от маршевого двигателя (в отказных ситуациях от вспомогательной силовой установки), является конструкция ВТ ПОС камерного типа с профилированными гофрами, схема которой показана на рисунке.

Количество тепла, переданного воздухом к внешней поверхности, зависит от количества и температуры подаваемого воздуха, а также от конструктивного исполнения гофров, обеспечивающих организованное течение воздуха вдоль защищаемой поверхности.

Для проектирования гофров и вообще всей ВТ ПОС после определения необходимого количества тепла, потребного для предотвращения льдообразования на аэродинамических поверхностях, необходимо выполнить гидравлический расчёт. Расчёт ВТ ПОС можно условно разделить на две части.

1. Газодинамический расчёт потребного давления краном-регулятором, обеспечивающем регулируемую подачу воздуха в зависимости от внешних условий (температуры наружного воздуха, скорости и высоты полёта, температуры наружного воздуха и т.д.).

2. Подробный гидравлический расчёт систем (см. рисунок).

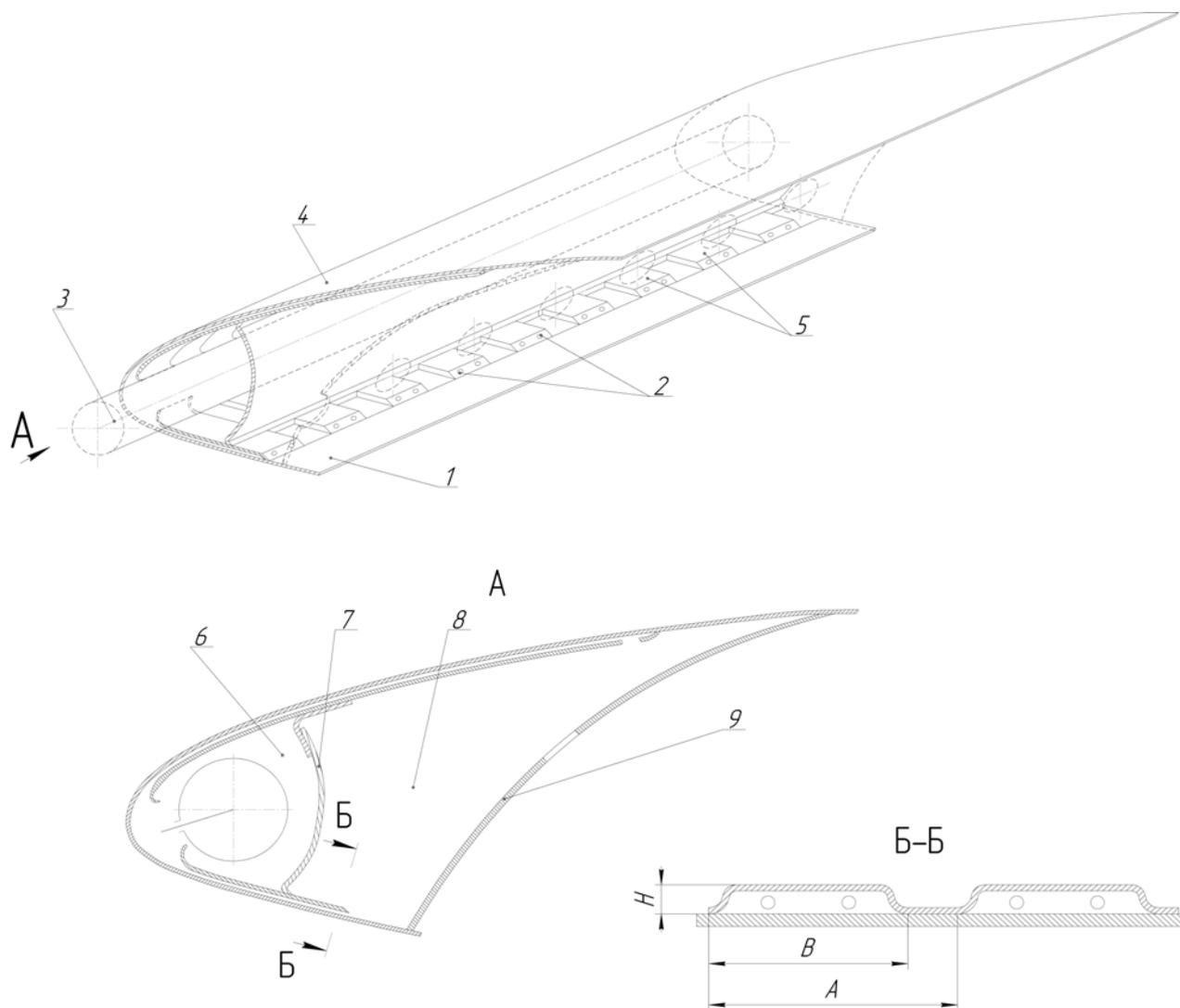


Рис. Конструкция ВТ ПОС камерного типа:

1 – нижняя часть внешней обшивки предкрылка, 2 – выходные отверстия в гофрах, 3 – приточный трубопровод, 4 – верхняя часть внешней обшивки предкрылка, 5 – гофры, 6 – герметичная камера, 7 – задняя стенка герметичной камеры, 8 – выходной канал ВТ ПОС, 9 – задняя стенка выходного канала ВТ ПОС

Рассмотрим порядок выполнения гидравлического расчёта.

Основные формулы и обозначения для гидравлического расчёта

Перепад давлений в камере, кг/м^2 :

$$\Delta P_{\text{кам}} = P_{\text{кам}} - P_{\text{атм}},$$

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

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

Удельный вес воздуха, кг/м^3 :

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

где t_e – температура воздуха.

Расход воздуха в отверстии, кг/ч :

а) если замер динамического напора проводится мерным устройством типа расходомерного насадка

$$G_{\text{отв}} = 3600 \cdot \mu_{\text{м/у}} \cdot F_{\text{м/у}} \cdot \sqrt{\Delta P_{\text{отв}} \cdot 2 \cdot g \cdot \rho} = F_{G_{\text{отв}}}(\mu_{\text{м/у}}, F_{\text{м/у}}, \Delta P_{\text{отв}} \cdot \rho),$$

где $F_{\text{м/у}}$ – площадь отверстия в мерном устройстве;

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

$\mu_{\text{м/у}}$ – коэффициент сопротивления на выходе из отверстия в мерном устройстве;

б) если замер динамического напора проводится непосредственно в отверстии

$$G_{\text{отв}} = 3600 \cdot \mu_{\text{выхотв}} \cdot F_{\text{отв}} \cdot \sqrt{\Delta P_{\text{отв}} \cdot 2 \cdot g \cdot \rho} = F_{G_{\text{отв}}}(\mu_{\text{выхотв}}, F_{\text{отв}}, \Delta P_{\text{отв}} \cdot \rho)$$

где $F_{\text{отв}}$ – площадь отверстия;

$\mu_{\text{выхотв}}$ – коэффициент сопротивления на выходе из отверстия.

Замеренный расход воздуха в гофра

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

Расчетный расход воздуха в отверстии

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

Расчетный расход воздуха в гофре

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

Скорость воздуха в отверстиях гофров при докритическом истечении из отверстий в гофра

$$V_{отв} = \frac{G_{отв}}{3600 \cdot F_{отв} \cdot \gamma \cdot \mu_{выхотв}} = F_{v_{отв}}(G_{отв}, F_{отв}, \mu_{выхотв}, \gamma).$$

Скорость воздуха в гофре

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

Суммарный коэффициент потерь давления воздуха (коэффициент сопротивления в гофре)

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

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

где $F_{гоф}$ – площадь гофра;

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

$\xi_{выхотв}$ – коэффициент потерь давления на выходе из отверстия;

$\xi_{пут}$ – коэффициент путевых потерь.

Коэффициент путевых потерь давления воздуха в гофре

$$\xi_{пут} = \xi_{\Sigma} - \xi_{выхотв} = \xi_{вх} + \xi_{трения},$$

где $\xi_{вхотв}$ – 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, $i = 1, 2, \dots, N_{гоф_k}$;

j – номер отверстия в каждом i -м гофре k -й поверхности;

$$j = 1, \dots, N_{отв_{k,i}};$$

$N_{отв_{k,i}}$ – количество отверстий в каждом гофре k -й поверхности;

$N_{гоф_k}$ – количество гофров на k -й 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:

$$\begin{aligned} \overline{G}_k &= \overline{G}_{исх}, & \text{если } k &= 1; \\ \overline{G}_k &= 1 - \overline{G}_{исх}, & \text{если } k &= 2, \end{aligned}$$

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

Расчеты выполняются для каждого гофра каждой поверхности для значений i, j, k .

Проектировочный расчет **Общие положения проектировочного расчета**

Проектировочный расчет выполняется для определения площади, диаметров и количества выходных отверстий в каждом гофре (или площади щели, если выдув воздуха проводится 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 противообледенителя).

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 \overline{G}_k ;
- число гофров верхней и нижней поверхности;
- параметры гофров: длина, высота и ширина (выбирают предварительно на основе тепловых расчетов с учетом конструктивного исполнения гофров и технологичности их изготовления);
- количество отверстий в гофрах на верхней и нижней поверхности;
- диаметры заданных отверстий.

В результате проектировочного расчета определяют:

- 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.

Алгоритм вычисления проектировочного расчета

По заданному давлению воздуха в камере $P_{кам\ зад}$ определяют заданный перепад давления воздуха в камере, $кг/м^2$:

$$\Delta P_{кам\ зад} = P_{кам\ зад} - P_{атм}.$$

Находят заданный удельный вес воздуха в камере, $кг/м^3$:

$$\gamma_{зад} = \frac{P_{атм} + \Delta P_{камзад}}{29.3 \cdot (273 + t_в)} = \frac{P_{камзад}}{29.3 \cdot (273 + t_в)}.$$

Определяют площади гофров $F_{гофк,i}$, M^2 :

$$F_{гофк,i} = B_{гофк,i} \cdot H_{гофк,i},$$

где $B_{гофк,i}$ – ширина гофра, M ;

$H_{гофк,i}$ – высота гофра, M .

Вычисляют периметры гофров $\Pi_{гофк,i}$, M :

$$\Pi_{гофк,i} = 2 \cdot (B_{гофк,i} + H_{гофк,i}).$$

Определяют заданный расход воздуха на каждый гофр $G_{гофзадк,i}$ 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), $кг/ч$:

$$G_{гофзадк,i} = \frac{G_{\Sigma} \cdot \bar{G}_k}{\sum_{i=1}^{N_{отек}} (F_{гофк,i} \cdot K_{G_{k,i}})} \cdot F_{гофк,i} \cdot K_{G_{k,i}},$$

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

Вычисляют заданный суммарный расход воздуха для отверстий гофра, $кг/ч$:

$$G_{отвзадк,i,j} = \frac{G_{гофзадк,i}}{n_{отек}},$$

где $n_{отек}$ – количество требуемых отверстий в гофрах в предположении, что диаметры отверстий в каждом гофре равны.

Определяют заданную скорость воздуха в гофре, $M/с$:

$$V_{гофзадк,i} = \frac{G_{гофзадк,i}}{3600 \cdot F_{гофк,i} \cdot \gamma_{зад}}.$$

По значениям $\Delta P_{камзад}$ и $G_{гофзадк,i}$ находят заданный суммарный коэффициент потерь для каждого гофра каждой поверхности:

$$\xi_{\Sigmaзадк,i} = \Delta P_{камзад} \cdot 2 \cdot g \cdot \gamma_{зад} \cdot \left(\frac{3600 \cdot F_{гофк,i}}{G_{гофзадк,i}} \right)^2$$

Определяют гидравлический коэффициент путевых потерь $\xi_{нумк,i}$ как сумму потерь на входе в гофры $\xi_{вх}$ и длинных потерь $\xi_{длк,i}$

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

в такой последовательности:

определяют коэффициент сопротивления на длинные потери $\xi_{\text{дл } k,i}$,

вычисляют число Рейнольдса для воздуха в каждом гофре:

$$Re_{k,i} = \frac{V_{\text{зоф } \text{зад } k,i} \cdot 4 \cdot F_{\text{зоф } k,i} \cdot \gamma_{\text{зад}}}{\Pi_{\text{зоф } k,i} \cdot \mu \cdot g},$$

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

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

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

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

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

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

Так как сечения гофров прямоугольные, то коэффициенты трения $\lambda_{\text{мп } k,i}$ определяют с учетом поправки $k_{I,k,i}$ на прямоугольное сечение

$$\lambda_{\text{мп } \text{пр } k,i} = k_{I,k,i} \cdot \lambda_{\text{мп } k,i}.$$

Величины $k_{I,k,i}$ определяют как функцию $k_I = f\left(\frac{H_{\text{зоф } k,i}}{B_{\text{зоф } k,i}}\right)$ путем интерполяции по значениям функции $k_I = f\left(\frac{H_{\text{зоф}}}{B_{\text{зоф}}}\right)$, представленным в таблице:

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

Вычисляют коэффициент сопротивления на длинные потери

$$\xi_{\text{дл } k,i} = \frac{\lambda_{\text{мп } \text{пр } k,i} \cdot L_{\text{зоф } k,i} \cdot \Pi_{\text{зоф } k,i}}{4 \cdot F_{\text{зоф } k,i}},$$

где $L_{\text{зоф } k,i}$ – длина гофра.

Определяют коэффициент потерь на входе в гофр с учетом поправки на кривизну ($\xi_{кр}$)

$$\xi_{вх} = 0.63 + \xi_{кр} = 0.63 + 0.07 = 0.70,$$

где $\xi_{кр} = 0.07$ – принятая поправка на кривизну

Определяют гидравлический коэффициент путевых потерь

$$\xi_{нум_{k,i}} = \xi_{дл_{k,i}} + \xi_{вх}.$$

Вычисляют заданный коэффициент потерь на выходе из гофров

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

По полученным значениям $\xi_{вых_{зад_{k,i}}}$ рассчитывают площади $F_{отв_{зад_{k,i,\Sigma}}}$ и диаметры заданных отверстий $d_{отв_{зад_{k,i,j}}}$.

Определяют такое значение $d_{отв_{зад_{k,i,j}}}$, при котором выполняется условие

$$d_{отв_{зад_{k,i,\Sigma}}} = f(\xi_{вых_{зад_{k,i,\Sigma}}}),$$

где значение $\xi_{вых_{зад_{k,i,\Sigma}}}$ заданного определяется из вычислений.

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

1) по значению $\xi_{вых_{зад_{k,i}}}$ определяют $\bar{F}_{зад_{k,i}}$.

2) по значению $\bar{F}_{зад_{k,i}}$ вычисляют

$$F_{отв_{зад_{k,i,\Sigma}}} = \bar{F}_{зад_{k,i}} \cdot F_{зоф_{k,i}};$$

3) По значению $F_{отв_{зад_{k,i,\Sigma}}}$ определяют

$$d_{отв_{зад_{k,i,j}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{отв_{зад_{k,i,\Sigma}}}}{3.14 \cdot n_{отв_{k,i}}}};$$

4) Функцию $\xi_{вых_{зад_{k,i}}} = f(\bar{F}_{зад_{k,i}})$ определяют в зависимости от расположения отверстий в гофрах.

Итерационный процесс заканчивается при достижении условия

$$|\xi_{вых_{зад_{k,i}}}^m - \xi_{вых_{зад_{k,i}}}^{m-1}| \leq \delta\xi,$$

где m – количество итераций.

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

Таким образом, в результате вычислений определяют значение $\bar{F}_{зад_{k,i}}^m$, удовлетворяющее условию $\bar{F}_{зад_{k,i}} = f(\xi_{вых_{зад_{k,i}}})$;

по значению $\bar{F}_{зад_{k,i}}$ находят суммарные площади отверстий;

по значению $F_{отв_{зад_{k,i}\Sigma}}$ определяют заданные диаметры отверстий $d_{отв_{зад_{k,i,j}}}$.

Выводы

Описанный подход к контролю и определению основных геометрических параметров внутренних конструктивных элементов предкрылка позволяет:

- обеспечить требуемое распределение тепловой энергии по размаху крыла;
- определить основные геометрические параметры гофров;
- определить конструктивное исполнение теплового ножа;
- обеспечить потребное распределение тепловой энергии в каждом сечении предкрылка;
- учесть особенности внешнего обтекания носка крыла.

Список литературы

1. Винничук С. Д. Методи та алгоритми вирішення задач аналізу, проектування і управління розподілом потоків в гідравлічних розподільних мережах: Дис. ... д-ра техн. н. / С. Д. Винничук. – К., 2006. – 305 с.
2. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / под ред. М. О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. / И. Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1992 – 672 с.
3. Кондращенко В.Я. Структурно-декомпозиционный метод моделирования газожидкостных систем. 2. Многокольцевые гидравлические структуры / В.Я. Кондращенко // Электронное моделирование. – 1986. – №6. – С. 64 – 76.
4. Крумина Н. Н. Проектирование воздухопроводов самолётных силовых установок / Н. Н. Крумина, И. Е. Ульянов. – М.: Машиностроение, 1979. – 96 с.
5. Шмырёв В. Ф. Анализ математических моделей газодинамических процессов в авиационных раздаточных системах / В. Ф. Шмырёв, В. Я. Кондращенко // Сб. МАИ. – М., 1982.
6. Шмырёв В. Ф. К расчёту дросселирующих шайб с учётом сжимаемости. / В. Ф. Шмырёв. / Сб. академии им. Н. Е. Жуковского, 1985. – М.

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

Поступила в редакцию 20.01.09.