

сопротивление струйкам тока с различными скоростями, вызывает перестройку потока на входе в ВНА и соответствующее снижение неравномерности поля скоростей, а следовательно, и углов атаки на входе в рабочее колесо, расположенное за ВНА. Более подробно работа ступени компрессора в неравномерном потоке рассмотрена в статье [2].

В случае значительной неравномерности входного потока рассматривается возможность выравнивания параметров потока ступенью пулевой мощности, т. е. ступенью с рабочим колесом свободного вращения. Особенности работы такой ступени, в которой лопаточный венец колеса составлен из симметричных профилей, рассматриваются в статье С. И. Гинзбурга [3]. В работе указывается, что выравнивание происходит вследствие различного по окружности подвода и отвода энергии от потока так, что суммарная величина энергии в потоке при этом остается неизменной.

Таким образом, необходимость в ВНА определяется как условиями работы двигателя, так и параметрами его рабочего процесса.

В то же время установка ВНА приводит к увеличению веса и длины двигателя. При высоких периферийных окружных скоростях рабочего колеса ВНА в двухконтурном турбореактивном двигателе приводит к повышенному шуму вентилятора, который будет преобладать над шумом других источников в двигателе с высокой степенью двухконтурности.

В связи с указанными недостатками, в развитии современных двухконтурных турбореактивных двигателей, особенно с высокой степенью двухконтурности, можно отметить тенденцию к созданию конструкций без ВНА.

Все же следует подчеркнуть, что в двигателе без ВНА условия работы втулочных сечений входных ступеней вентилятора будут хуже, чем в двигателе с ВНА. Это, в свою очередь, будет ограничивать возможности подвода энергии к воздуху в решетках, расположенных вблизи втулочных сечений входных ступеней двигателя без ВНА.

В данной статье рассматривается возможность создания специального ВНА с лопатками, длина которых составляет лишь часть высоты тракта.

Такой аппарат в соответствии с его особенностями работы назван плавающим входным направляющим аппаратом (ПВНА). Он устанавливается на входе в компрессор на подшипниках, размещенных внутри вала ротора (рис. 1). Его лопатки в нижней привтулочной части образуют сужающийся межлопаточный канал, создающий отрицательную закрутку потока, т. е. закрутку против вращения ротора компрессора. Отрицательная закрутка необходима для получения умеренной радиальной неравномерности полного давления за первым рабочим колесом с малым относительным диаметром втулки на входе.

Периферийные части лопаток ПВНА образуют сужающийся

межлопаточный канал, создающий положительную закрутку потока (рис. 2). Соотношение закруток в верхней и нижней частях выбирается на расчетном режиме ПВНА таким образом, чтобы суммарный крутящий момент на лопатках был нулевым. Следовательно, на этом режиме ПВНА будет работать как обычный ВНА.

В связи с тем, что лопатки ПВНА занимают лишь часть высоты канала, то чтобы на концах лопаток ПВНА не образовался вихревой шнур, лопатки в этом сечении необходимо выполнять с симметричными профилями, хорда которых направлена по оси компрессора.

На нерасчетных режимах частота и направление вращения ПВНА определяются соотношением крутящих моментов на верхних и нижних частях лопаток.

Рассмотрим воздействие ПВНА на неравномерный поток на входе. Так же как и ВНА, лопаточный венец ПВНА приводит к растеканию потока перед компрессором, и при этом происходит частичное преобразование неравномерности скорости в неравномерность статического давления. Растекание происходит вследствие зависимости сопротивления (потерь давления) межлопаточного канала от угла и скорости втекания потока. Такое преобразование для компрессора благоприятно, так как в этом случае выравнивание статического давления будет постепенно происходить по всему тракту и, по-видимому, в значительной степени в средних и последних ступенях, так как в этих ступенях числа M потока меньше, чем в первых ступенях (как известно, с уменьшением числа M возмущения глубже проникают в потоке против течения).

Напорные характеристики средних и последних ступеней более крутые, чем первых ступеней, хотя бы вследствие больших относительных диаметров втулок. Ступени с такими характеристиками лучше воспринимают преобразование потока. Растекание потока происходит, конечно, и перед первым рабочим колесом, если перед ним нет решеток другого лопаточного венца. Однако такое преобразование потока может приводить к срывной работе диффузорных межлопаточных каналов в рабочем колесе. В конфузорных каналах ПВНА срыв маловероятен или он будет возникать при больших углах атаки.

Таким образом, ПВНА обладает все-

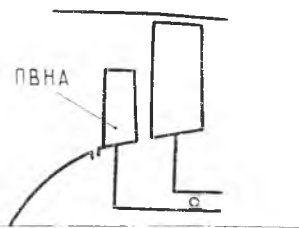


Рис. 1. Схема установки плавающего входного из направляющего аппарата

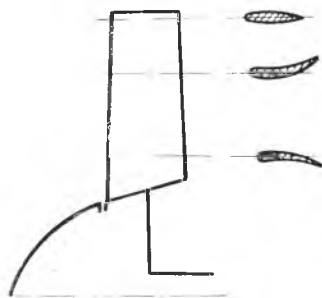


Рис. 2. Схема взаимного расположения профилей по высоте лопатки ПВНА

ми положительными качествами ВНА, частично свойствами ступени нулевой мощности и вместе с тем выполняет функции ВНА лишь в привтулочной области, где это наиболее необходимо.

Далее установим соотношения, необходимые для изучения особенностей работы и распределения закрутки по высоте лопатки ПВНА.

ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ОСНОВНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ПОТОКА НА ВЫХОДЕ ИХ ПВНА

На любом установившемся режиме на валу ПВНА аэродинамический крутящий момент равен сумме моментов от сил трения в подшипниках и от сил трения кока и диска о воздух. Для упрощения последующих преобразований пренебрежем моментами от сил трения. Это допущение приводит к завышению частоты вращения. Однако вследствие того, что скорости потока внутри лопаточного венца значительно больше окружных скоростей движения поверхностей кока и диска относительно воздуха, это завышение не должно быть значительным. Данное утверждение далее будет проверено на характерных примерах.

Установим соотношение для определения изменения угла закрутки потока по высоте лопатки.

Имеем исходные зависимости:

$$M_{кр} = 0; \quad (1)$$

$$dM_{кр} = q_u r dr. \quad (2)$$

Подставляя известное выражение для q_u

$$q_u = 2\pi r C_{0a} \rho_0 (C_{0u} - C_{1u})$$

в равенства (2) и (1), получаем

$$\int_{r_{вт.ср}}^{r_{пер.ср}} C_{0a} \rho_0 (C_{0u} - C_{1u}) r^2 dr = 0. \quad (3)$$

Для случая с равномерным потоком на входе

$$C_{0a} = \text{const}; \quad \rho_0 = \text{const}; \quad P_{0u} = 0.$$

Тогда, учитывая, что

$$C_{1u} = C_1 \cdot \cos \alpha_1 = \lambda_1 \cdot a_{1кр} \cdot \cos \alpha_1,$$

из равенства (3) получаем

$$\int_{r_{вт.ср}}^{r_{пер.ср}} \lambda_1 \cos \alpha_1 r^2 dr = 0. \quad (4)$$

Кроме этого соотношения, изменение λ_1 по высоте лопатки будет определяться уравнением радиального равновесия. Определим это уравнение применительно к рассматриваемой задаче с равномерным потоком.

В конфузорных межлопаточных каналах потери давления обычно составляют небольшую величину. Поэтому можно принять, что по высоте лопатки

$$p_1^* = p_0^* \nu = \text{const.}$$

Преобразования уравнения радиального равновесия из работы [4] с учетом этого условия приводят это уравнение к виду

$$\frac{d(\lambda_1^2)}{dr} = -2\lambda_1^2 \left(\frac{\cos^2 \alpha_1}{r} - \frac{\sin^2 \alpha_1}{R_m} \right). \quad (5)$$

Выражения (4) и (5) могут быть использованы в расчетном анализе при определении изменения закрутки потока по высоте лопатки на расчетном режиме.

Для примера на рис. 3 приводятся графики зависимости

$$\xi_1 = \frac{\pi}{2} - \alpha_1 = f(\bar{r}), \text{ построенные для случая } 1/R_m = 0.$$

Из рисунка видно, что в нижней части лопатки имеется большая по абсолютной величине закрутка ξ_1 , чем в ее верхней части.

Такое соотношение закруток является благоприятным, так как приводит к малому отрицательному влиянию закрутки в верхней части лопаток ПВНА на работу последующего рабочего колеса. При этом также нужно учитывать, что обычно во втулочном сечении требуются значения углов

$$|\xi_1| \leq 20^\circ = 0,35 \text{ рад},$$

для которых с погрешностью менее 2% можно принять

$$\sin \xi_1 = \xi_1$$

При малых абсолютных величинах углов ξ_1 имеем и малое изменение λ_1 по радиусу. Такое положение позволяет получить приближенное аналитическое выражение зависимости $\xi_1 = f(\bar{r})$. Дей-

ствительно, характер кривых на рис. 3 показывает, что для сравнительного анализа эти кривые могут быть аппроксимированы параболой 3-го порядка в виде

$$\bar{\xi}_1 = a_0 + a_1 \bar{r} + a_2 \bar{r}^2 + a_3 \bar{r}^3,$$

где
$$\bar{\xi}_1 = \frac{\xi_1}{\xi_{1вт}}$$

Коэффициенты a определяем, используя выражение

$$\int_{r_{вт},cp}^1 \bar{\xi}_1 \bar{r}^2 d\bar{r} = 0, \quad (7)$$

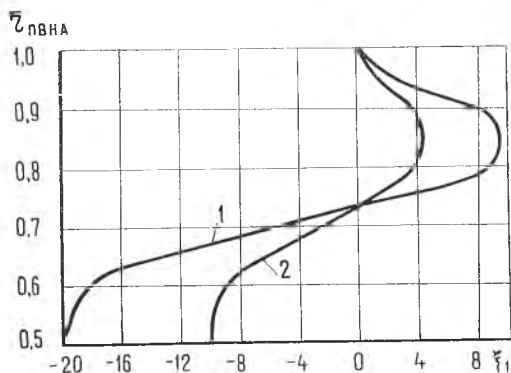


Рис. 3. Изменение угла ξ_1 в зависимости от радиуса сечения лопатки ПВНА: $1 - \xi_{1вт} = -20^\circ$; $2 = \xi_{1вт} = -10^\circ$

полученное из соотношения (4) без учета изменения λ_1 по радиусу, и следующие граничные условия:

$$\begin{aligned} \bar{r} &= \bar{r}_{\text{вт.ср}} = \bar{r}; & \bar{\xi}_1 &= 1; \\ \bar{r} &= \bar{r}_r; & \bar{\xi}_1 &= 0; \\ \bar{r} &= \bar{r}_{\text{пер.ср}} = 1; & \bar{\xi}_1 &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

После подстановки выражения (6) в интеграл (7) и условий (8) в соотношение (6) получаем систему уравнений для определения коэффициентов a :

$$\begin{aligned} \frac{1-\bar{r}^3}{3} a_0 + \frac{1-\bar{r}^1}{4} a_1 + \frac{1-\bar{r}^3}{5} a_2 + \frac{1-\bar{r}^6}{6} a_3 &= 0; \\ a_0 + \bar{r} a_1 + \bar{r}^2 a_2 + \bar{r}^3 a_3 &= 1; \\ a_0 + \bar{r}_r a_1 + \bar{r}_r^2 a_2 + \bar{r}_r^3 a_3 &= 0; \\ a_0 + a_1 + a_2 + a_3 &= 0. \end{aligned}$$

Решая данную систему уравнений методом подстановки, получаем выражения для вычисления коэффициентов:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{A_1(1 + \bar{r}_r) - A_2}{A_1 A_4 - A_2 A_3} \bar{r}_r; \\ a_1 &= \frac{(A_2 - A_1)(1 + \bar{r}_r) - A_1 \bar{r}_r^2}{A_1 A_4 - A_2 A_3}; \\ a_2 &= -\frac{A_2}{A_1 A_4 - A_2 A_3}; \\ a_3 &= \frac{A_1}{A_1 A_4 - A_2 A_3}, \end{aligned}$$

где введены обозначения:

$$\begin{aligned} A_1 &= -\frac{1}{20} + \left(\frac{1}{4} - \frac{\bar{r}}{5}\right) \bar{r}^1 + \left[\frac{1}{12} - \left(\frac{1}{3} - \frac{\bar{r}}{4}\right) \bar{r}^3\right] \bar{r}_r; \\ A_2 &= -\frac{1}{12} + \left(\frac{1}{4} - \frac{\bar{r}}{6}\right) \bar{r}^1 + \left[\frac{1}{12} - \left(\frac{1}{3} - \frac{\bar{r}}{4}\right) \bar{r}^3\right] (1 + \bar{r}_r) \bar{r}_r; \\ A_3 &= (1 - \bar{r})(\bar{r}_r - \bar{r}); \\ A_4 &= (1 - \bar{r})[\bar{r}_r(1 + \bar{r}_r) - \bar{r}(1 + \bar{r})]. \end{aligned}$$

Полученные выражения для a_0, a_1, a_2, a_3 позволяют установить приближенную формулу для $\bar{\xi}_1$ при заданных величинах $\bar{\xi}_{\text{вт.}}$, $r_{\text{вт.ср.}}$, r_r . Эта формула может быть использована в качестве начальной зависимости для расчета изменения кинематических параметров по высоте лопатки.

В окончательных расчетах эта зависимость будет уточняться при выборе оптимальной конструкции.

Далее рассмотрим соотношения, необходимые для определения возможных скоростей вращения ПВНА на нерасчетных режимах. С этой целью для упрощения преобразований рассмотрим соотношения для средних параметров.

Такие параметры должны получаться при осреднении параметров исходного неравномерного потока по массе, но вследствие сравнительно малого изменения плотности можно допустить осреднение по площади как более простое.

Для установившегося режима

$$m_{\text{в}} C'_{1\text{вт}} r'_{\text{в}} = m_{\text{н}} C'_{1\text{нт}} r'_{\text{н}}, \quad (9)$$

где

$$m = 0,0404 \frac{q(\lambda') p^{*'}}{V T^{*'}} F, \quad (10)$$

$$C_{1u} = u_1 - C_{1a} \operatorname{ctg} \beta_1 \quad (11)$$

$$r'_{\text{в}} = \sqrt{\frac{r_{1\text{всп}}^2 + r_{1\text{г}}^2}{2}} = \sqrt{\frac{1 + r_{1\text{г}}^2}{2}} r_{1\text{всп}}, \quad (12)$$

$$r'_{\text{н}} = \sqrt{\frac{r_{1\text{г}}^2 + r_{1\text{вт}}^2}{2}} = \sqrt{\frac{r_{1\text{г}}^2 + r_{1\text{вт}}^2}{2}} r_{1\text{всп}}. \quad (13)$$

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} \bar{\omega} &= \frac{T'_{\text{в}}}{T'_{\text{н}}}; & \bar{p} &= \frac{p'_{\text{в}}}{p'_{\text{н}}}; & \bar{q} &= \frac{q(\lambda'_{\text{в}})}{q(\lambda'_{\text{н}})}; & \bar{C}_a &= \frac{C'_{1a}}{C'_{0a}}; \\ \bar{u} &= \frac{u'}{C'_{0a}}; & \bar{\lambda} &= \frac{C'_{0\text{вт}}}{C'_{0\text{а}}} = \frac{\lambda'_{\text{в}}}{\lambda'_{\text{н}}} \sqrt{\bar{\omega}}; & \bar{r} &= \frac{r'_{\text{в}}}{r'_{\text{н}}}. \end{aligned} \quad (14)$$

Подставляя соотношения (10)÷(13) в выражение (9) и учитывая обозначения (14), после преобразований получаем:

$$\bar{r} \bar{\lambda} \bar{q} \bar{p} \frac{F_{\text{в}}}{F_{\text{н}}} (\bar{u}_{\text{в}} - \bar{C}_{a\text{в}} \operatorname{ctg} \beta'_{1\text{в}}) = \bar{u}_{\text{н}} - \bar{C}_{a\text{н}} \operatorname{ctg} \beta'_{1\text{н}}. \quad (15)$$

Для преобразования выражения (15) учтем, что

$$\frac{F_{\text{в}}}{F_{\text{н}}} = \frac{1 - r_{0\text{г}}^2}{r_{0\text{г}}^2 - r_{0\text{вт}}^2}. \quad (16)$$

Для сравнительного анализа можно принять:

$$\begin{aligned} \bar{u}_{\text{в}} &= \frac{1 + r_{0\text{г}}}{2} \cdot \frac{u_{\text{нсп}}}{C'_{0\text{вa}}}; \\ \bar{u}_{\text{н}} &= \frac{r_{0\text{г}} + r_{0\text{вт}}}{2} \cdot \frac{u_{\text{нсп}}}{C'_{0\text{на}}} = \frac{r_{0\text{г}} + r_{0\text{вт}}}{2} \bar{\lambda} \cdot \frac{u_{\text{нсп}}}{C'_{0\text{ва}}}; \\ \bar{r} &= \sqrt{\frac{1 + r_{0\text{г}}^2}{r_{0\text{г}}^2 + r_{0\text{вт}}^2}}. \end{aligned} \quad (17)$$

Введем обозначение

$$\bar{u}_{\text{пер}} = \frac{u_{\text{пер}}}{C_{\text{ова}}} \quad (18)$$

Преобразуем выражение (15), учитывая (16), (17), (18):

$$\begin{aligned} \frac{1 - \bar{r}_{0\Gamma}^2}{\bar{r}_{0\Gamma}^2 - \bar{r}_{0\text{вт}}^2} \sqrt{\frac{1 + \bar{r}_{0\Gamma}^2}{\bar{r}_{0\Gamma}^2 + \bar{r}_{0\text{вт}}^2}} \bar{\lambda} \bar{q} \bar{p} \left(\frac{1 + \bar{r}_{0\Gamma}}{2} \bar{u}_{\text{пер}} - \bar{C}_{\text{ав}} \text{ctg} \beta'_{1\text{в}} \right) = \\ = \frac{\bar{r}_{0\Gamma} + \bar{r}_{0\text{вт}}}{2} \bar{\lambda} \bar{u}_{\text{пер}} - \bar{C}_{\text{ан}} \text{ctg} \beta'_{1\text{н}} \end{aligned} \quad (19)$$

Эта формула может быть использована для определения соотношения между углами $\beta'_{1\text{н}}$ и $\beta'_{1\text{в}}$ на расчетном режиме или для определения $u_{\text{пер}}$ на нерасчетных режимах. В последнем случае ее удобно привести к виду

$$\bar{u}_{\text{пер}} = \frac{\frac{1 - \bar{r}_{0\Gamma}^2}{\bar{r}_{0\Gamma}^2 - \bar{r}_{0\text{вт}}^2} \sqrt{\frac{1 + \bar{r}_{0\Gamma}^2}{\bar{r}_{0\Gamma}^2 + \bar{r}_{0\text{вт}}^2}} \bar{\lambda} \bar{q} \bar{p} \bar{C}_{\text{ав}} \text{ctg} \beta'_{1\text{в}} - \bar{C}_{\text{ан}} \text{ctg} \beta'_{1\text{н}}}{\frac{1 - \bar{r}_{0\Gamma}^2}{\bar{r}_{0\Gamma}^2 - \bar{r}_{0\text{вт}}^2} \sqrt{\frac{1 + \bar{r}_{0\Gamma}^2}{\bar{r}_{0\Gamma}^2 + \bar{r}_{0\text{вт}}^2}} \cdot \frac{1 + \bar{r}_{0\Gamma}}{2} \bar{\lambda} \bar{q} \bar{p} - \frac{\bar{r}_{0\Gamma} + \bar{r}_{0\text{вт}}}{2} \bar{\lambda}} \quad (20)$$

Если при расчете получаем значением $u_{\text{пер}}$ со знаком минус, то вращение ПВНА совпадает с вращением ротора. Знак плюс означает, что вращение противоположное.

Проиллюстрируем на примерах применение формул (19) и (20). Рассмотрим расчетный режим, когда $u_{\text{пер}} = 0$.

Пусть также

$$\begin{aligned} \bar{r}_{0\text{вт}} = 0,45; \quad \bar{r}_{0\Gamma} = 0,7; \quad \bar{p} = 1, \\ \bar{\lambda} = 1,1; \quad \bar{q} = 1,05; \quad \bar{C}_{\text{ав}} = \bar{C}_{\text{ан}} \end{aligned} \quad (21)$$

После подстановки числовых значений параметров в выражение (19) получаем

$$\text{ctg} \beta'_{1\text{в}} = 0,299 \text{ctg} \beta'_{1\text{н}}$$

Связь между возможными значениями $\beta'_{1\text{н}}$ и $\beta'_{1\text{в}}$ запишем в виде таблицы.

Таблица

$\beta'_{1\text{н}}$	град	90	85	80	75
$\beta'_{1\text{в}}$	град	90	88,5	87	85,5

Из таблицы видно, что в данном примере $\beta'_{1\text{в}}$ больше $\beta'_{1\text{н}}$. Такое соотношение соответствует назначению ПВНА.

Далее рассмотрим при $r_{0\text{вт}} = 0,45$ и $r_{0\Gamma} = 0,7$ самый низкий

нерасчетный режим — земной малый газ, при значениях $\beta'_{1н}$ и $\beta'_{1в}$ на расчетном режиме

$$\beta'_{1н} = 80 ; \quad \beta'_{1в} = 87 \quad (22)$$

При малых поворотах потока в решетках, которым соответствуют указанные значения $\beta_{1н}$ и $\beta_{1в}$, можно принять на расчетном и нерасчетных режимах

$$\bar{C}_{ав} = \bar{C}_{ан} = 1. \quad (23)$$

Также можно пренебречь изменением по режимам углов отставания потока вследствие их малости.

На малом газе, из-за значительного снижения величин осевых скоростей по сравнению с величинами на расчетном режиме, отмечается незначительная радиальная неравномерность, т. е. можно принять

$$\bar{\lambda} = 1; \quad \bar{q} = 1.$$

Подставляя в выражение (20) числовые значения параметров, находим

$$\bar{u}_{пер} = -0,0241. \quad (24)$$

Обычно на режиме малого газа приведенный расход воздуха в 2,5÷3 раза меньше, чем на расчетном режиме работы двигателя. Примерно в таком же соотношении будут изменяться и среднемассовые осевые скорости.

Если учесть, что на расчетном режиме среднемассовые скорости составляют

$$C_a = 190 \div 210 \frac{м}{сек}, \quad (25)$$

то, принимая $C'_{нв} = C_a$ и используя равенства (24) и (25), получаем

$$u_{пер} = -(1,5 \div 2,0) \frac{м}{сек}.$$

Например, при периферийном диаметре ПВНА $D_{пер} = 1000$ мм, получаем частоту вращения

$$n = -(29 \div 38) \frac{об}{мин}.$$

Знак минус указывает на то, что вращение ПВНА будет в сторону вращения ротора компрессора.

Далее рассмотрим случай воздействия неравномерного потока на расчетном режиме с $\bar{p} = 0,90$, и значениях остальных параметров, указанных в равенствах (21), (22), (23), т. е., примем, что неравномерности статического и

полного давления одинаковы. Тогда из выражения (20) определяем

$$\bar{u}_{\text{пер}} = -0,0376.$$

Учитывая равенство (25), получаем значение $u_{\text{пер}}$

$$\bar{u}_{\text{пер}} = -(7,15 \div 7,9) \frac{\text{м}}{\text{сек}}$$

При

$$D_{\text{пер}} = 1000 \text{ мм}$$

$$n = -(137 \div 151) \frac{\text{об}}{\text{мин}}$$

Если при неравномерности полного давления $p=0,90$ отсутствует неравномерность статического давления, то получим

$$\bar{\lambda} = 0,95; \quad \bar{q} = 0,97.$$

Из формулы (20) определяем

$$\bar{u}_{\text{пер}} = -0,0489.$$

Учитывая равенство (25), определяем $u_{\text{пер}}$:

$$u_{\text{пер}} = -(9,3 \div 10,3) \frac{\text{м}}{\text{сек}}$$

и при $D_{\text{пер}}=1000$ мм, получаем

$$n = -(178 \div 197) \frac{\text{об}}{\text{мин}}$$

Таким образом, характерные примеры, рассмотренные на основе полученных соотношений, показывают, что вращение ПВНА при его работе в потоке с неравномерностью происходит с незначительной частотой и приводит к снижению углов атаки на входе в рабочее колесо по сравнению с углами атаки при работе колеса без ПВНА.

ЛИТЕРАТУРА

1. Холщевников К. В. Теория и расчет авиационных лопаточных машин, М. «Машиностроение», 1970.
2. Гинзбург С. П., Суслеников Л. А. Исследование неравномерного по окружности течения перед осевой компрессорной ступенью. В сб.: «Лопаточные машины и струйные аппараты», вып. 5, М., «Машиностроение», 1971.
3. Гинзбург С. П. Выравнивание неравномерного по окружности потока элементарной ступенью лопаточной машины. В сб.: «Лопаточные машины и струйные аппараты», вып. 1, М., «Машиностроение», 1966.
4. Абрамович Г. П. Прикладная газовая динамика, М. ГИТТЛ, 1953.