

## **Аэродинамические факторы влияния на резонансные колебания лопаток компрессоров газотурбинных двигателей**

**Ю. М. Терещенко, Е. В. Дорошенко, А. Техрани, Дж. Аболхассанзаде**

Национальный авиационный университет, Киев, Украина

*Приведены результаты исследования влияния газодинамического управления обтеканием лопаток направляющего аппарата ступени осевого компрессора на вибронпряженность лопаток рабочего колеса. Показано, что газодинамическое воздействие на обтекание лопаток обеспечивает выравнивание поля скоростей потока перед рабочим колесом и снижение уровня вибронпряжений в лопатках при их резонансном возбуждении.*

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, компрессор, лопатка, колебания, обтекание потоком.

**Постановка задачи.** Колебания рабочих лопаток компрессоров и турбин – одна из наиболее сложных и острых проблем, которые возникают при создании авиационных газотурбинных двигателей. Это обусловлено ее комплексным характером, поскольку предусматривает решение задач нестационарной аэродинамики и колебаний лопаток, которые находятся в упругом взаимодействии с другими элементами ротора, а также их усталостной прочности и др.

Все виды колебаний лопаток компрессоров, а именно: автоколебания (флаттер); резонансные колебания; акустический резонанс и вращающийся срыв, обусловлены воздействием на них переменных аэродинамических сил.

Наиболее распространенным видом вибраций лопаток турбомашин являются резонансные колебания с частотами, кратными частоте вращения ротора [1]. Их можно разделить на два типа: низкочастотные, которые возбуждаются гармониками крупномасштабной неравномерности потока на входе в компрессор, и высокочастотные, обусловленные пересечением вращающихся лопаток с аэродинамическими кромочными следами входного направляющего аппарата и направляющего аппарата, где имеет место окружная периодическая неравномерность потока. При консольной конструктивной реализации лопаток направляющих аппаратов в них могут также возникать резонансные колебания из-за их обратного взаимодействия с вращающимися лопатками соседних рабочих колес.

При резонансных колебаниях вследствие периодической окружной неравномерности параметров потока воздуха на входе в компрессор газотурбинного двигателя механические напряжения  $\sigma$  в лопатках увеличиваются в несколько раз и могут достигать предельных значений по условиям прочности, что в ряде случаев приводит к их разрушению. Поэтому вопросы изучения и анализа аэродинамических факторов, их влияние на колебания и динамическую прочность лопаток компрессоров являются актуальными.

Данная работа посвящена определению газодинамического влияния на структуру потока воздуха за элементами статора с целью уменьшения его неравномерности в окружном направлении и, как следствие, уровня вибронпряжений в лопатках компрессора газотурбинного двигателя.

**Решение задачи и анализ результатов.** При обтекании лопаток входного направляющего аппарата (ВНА) и направляющего аппарата потоком вязкого газа образуются аэродинамические кромочные следы, которые служат источником периодической неравномерности потока в окружном направлении перед вращающимся лопа-

точным венцом. При этом в следе позади неподвижного тела скорость и полное давление меньше, чем во внешнем течении.

Вследствие периодического изменения параметров потока перед лопаточным венцом изменяются аэродинамические нагрузки, действующие на лопатки. Их периодическое изменение по величине и направлению определяется изменением угла атаки и относительной скорости потока (рис. 1). Неоднородность потока в абсолютном движении за ВНА обуславливает неравномерность и в относительном движении на входе в рабочее колесо (РК).

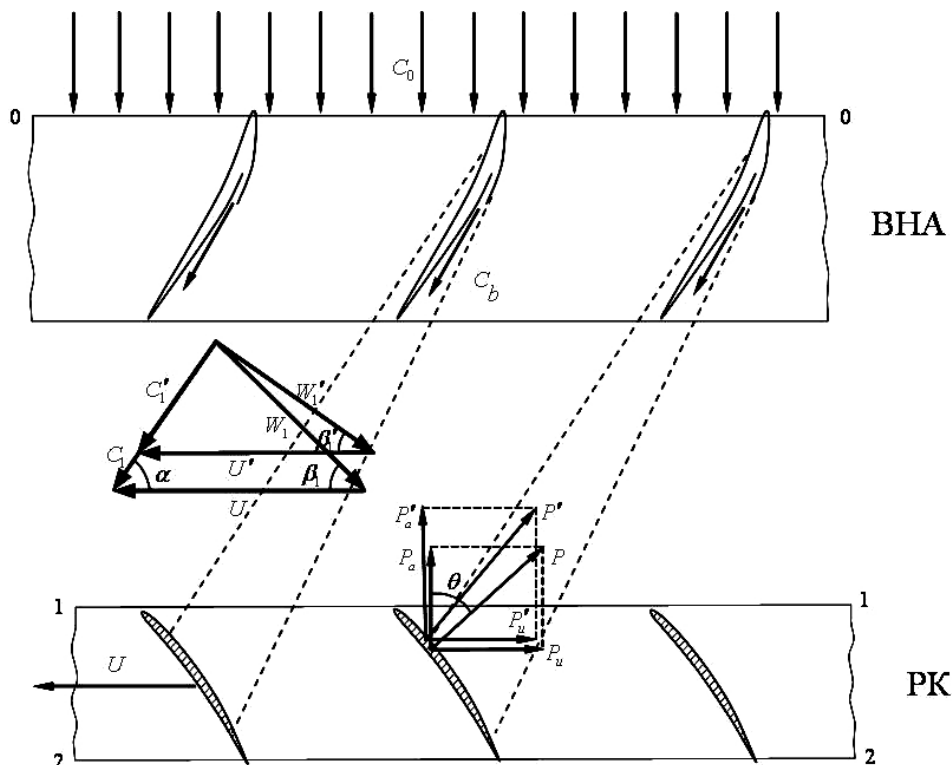


Рис. 1. Изменение обтекания рабочих лопаток и полной аэродинамической силы, которая действует на них, при периодической окружающей неравномерности потока.

Поток выходит из решеток лопаток ВНА с абсолютной скоростью  $C_1$  под углом  $\alpha$  и входит в решетки лопаток РК с относительной скоростью  $W_1$ , направленной под углом  $\beta_1$  к их фронту. В момент, когда рабочая лопатка проходит зону аэродинамического следа за выходными кромками ВНА, абсолютная скорость изменяется, вследствие чего изменяются величина и направление относительной скорости. Это приводит к периодическому изменению режима обтекания рабочих лопаток, что выражается в изменении распределения силы давления по профилю и перестройке пограничного слоя, т.е. они находятся в пульсирующем потоке. Поскольку относительная скорость  $W_1'$  в следе меньше скорости  $W_1$  за границей следа, сила давления на спинке рабочей лопатки будет уменьшаться, а на ее вогнутой поверхности – расти по сравнению с расчетным значением.

Зависимость коэффициента нормальной силы, которая действует на профиль при пересечении следов к хорде лопатки, от угла атаки приведена на рис. 2 [2]. Видно, что в рассматриваемом диапазоне значения угла атаки различаются в два-три раза.

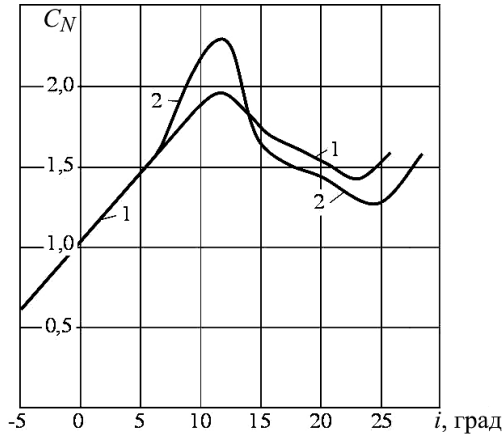


Рис. 2. Зависимость коэффициента нормальной силы от угла атаки для неподвижной (1) и колеблющейся (2) лопаток.

Таким образом, периодическая окружная неравномерность потока в осевом компрессоре, обусловленная пульсирующим обтеканием венцов лопаток от аэродинамических следов за элементами статора компрессора, является одним из существенных факторов возбуждения колебаний лопаток рабочих колес и направляющих аппаратов. Этот колебательный процесс можно классифицировать как устойчивые резонансные колебания [3], которые возбуждаются при совпадении собственных частот колебаний лопаток с частотой возмущения  $nz$ , где  $n$  – частота вращения,  $z$  – количество лопаток направляющих решеток. Следует заметить, что наиболее опасными с точки зрения вибропрочности компрессора являются колебания лопаток рабочих колес его первых ступеней [1, 2, 4].

Рассмотрим основные факторы, определяющие интенсивность колебаний лопаток. Предположив [3], что изменение аэродинамической силы во времени имеет вид прямоугольных импульсов, амплитуду изменения сил давления  $i$ -й гармоники можно определить по формуле

$$P_i = P_n \frac{2}{\pi i} \sin \pi i \frac{\Delta\tau}{T} \sqrt{S^2 + C^2} = P_n A_i \sqrt{S^2 + C^2},$$

где

$$S = \sin \frac{2\pi\tau_1}{T} i + \dots + \sin \frac{2\pi\tau_n}{T} i; \quad C = 1 + \cos \frac{2\pi\Delta\tau}{T} i + \dots + \cos \frac{2\pi\tau_n}{T} i;$$

величина  $\sin \pi i \frac{\Delta\tau}{T}$  учитывает размеры аэродинамического следа по ширине, а  $\sqrt{S^2 + C^2}$  – количество лопаток входного направляющего аппарата или других элементов статора перед колеблющимися лопатками рабочего колеса.

Суммарная аэродинамическая сила, которая действует на лопатку в плоскости колебаний, вычисляется по формуле

$$P_n = P_{a_n} \cos \theta + P_{u_n} \sin \theta,$$

где  $\theta$  – угол между направлением колебаний и нормалью к фронту решеток (в данном случае принято, что  $\theta = \alpha$  – рис. 1) [3]. Величина сил  $P_{a_n}$  и  $P_{u_n}$  опреде-

ляется из уравнения количества движения, записанного в проекциях на оси абсцисс и ординат, направления которых совпадают соответственно с направлением основного потока и линией фронта решеток:

$$P_{a_n} = \frac{F_1 + F_2}{2Z_{л}} \rho_1 (\pi - 1), \quad P_{u_n} = \rho_1 \bar{H}_i \bar{C}_{1a} U_{\kappa}^2 \frac{F_1}{r_{cp} Z_{л}}.$$

В случае отсутствия газодинамического влияния на аэродинамические следы изменение полной аэродинамической силы вследствие периодической окружной неравномерности потока определяется зависимостью

$$\Delta P_i = f(\Delta P_a; \Delta P_u),$$

где  $\Delta P_a$ ,  $\Delta P_u$  – изменение составляющих полной аэродинамической силы при периодической неравномерности потока [5].

Полная переменная аэродинамическая сила, действующая при резонансных колебаниях, будет

$$P = P_i + P_j,$$

где  $P_j$  – переменная аэродинамическая сила, возникающая из-за изменения окружной скорости  $U_{л}$  лопатки при колебаниях с относительной скоростью  $W_1$ .

Работа, совершаемая переменной аэродинамической силой при колебаниях лопатки в течение периода колебаний, определяется по формуле

$$A = \int_0^T \int_{\bar{d}}^1 [d_1(\Delta P_i) + d_2(\Delta P_j)] x dt = A_3 + A_d,$$

где  $A_3$  соответствует аэродинамическому возбуждению колебаний лопатки, а  $A_d$  – ее аэродинамическому демпфированию [2].

Баланс энергий при колебаниях выражается в том, что работа переменной аэродинамической силы  $A$  будет равна рассеиванию энергии в материале лопатки и в ее замковом соединении с диском. Отсюда можно определить амплитуду колебаний лопатки при резонансных колебаниях, а следовательно, и вибрационные напряжения, которые в ней возникают. Из баланса энергий можно получить формулу для определения напряжения  $\sigma_{\kappa}$  в корневом сечении лопаток [6], как наиболее напряженном:

$$\sigma_{\kappa} = \frac{\delta P_i \pi I_1 \frac{1}{k}}{\left\{ C'_{\mu} E \frac{b_k C_k^2}{l} B_M + C'_3 E \frac{b_k C_k^5}{l^2} B_3 - 19,8 f_1 \frac{I_2}{I_1} \frac{1}{K_{C_k}} \frac{l^2}{E_{C_k}} \left[ \frac{\Delta \tau}{T} \delta \bar{P}_{cp} + \left( 1 - \frac{\Delta \tau}{T} \right) \delta \bar{P}_{opt} \right] \right\}}, \quad (1)$$

где

$$B_M = \frac{0,164}{\left( 1 + 0,4 \frac{\bar{a}_k}{\bar{C}_k} \right)^2} \int_0^1 \left( 1 + \frac{\bar{a}^2}{\bar{C}^2} \right) \bar{b} \left( \frac{C}{C_k} \right)^3 \bar{X}'' \bar{d} \bar{l}; \quad B_3 = \frac{0,0067 \left[ 1 + \left( \frac{\bar{a}_k}{\bar{C}_k} \right)^2 \right]^2}{\left( 1 + 0,4 \frac{\bar{a}_k}{\bar{C}_k} \right)^2};$$

$$I_1 = \int_0^1 \bar{x} d\bar{l}; \quad I_2 = \int_0^1 \bar{x}^2 d\bar{l}; \quad K = 0,5X_k'' \left( 1 + 0,4 \frac{\bar{a}_k}{C_k} \right), \quad K = 1,4 \dots 2,0$$

Анализ данного выражения показывает, что среди многих факторов, которые характеризуют уровень напряжений при резонансных колебаниях лопаток, интенсивность неравномерности потока  $\delta P_i$  оказывает непосредственное влияние на величину  $\sigma_k$ . Поэтому очевидным есть то, что снижения уровня вибронпряжений в лопатках ротора компрессора можно достичь за счет уменьшения уровня периодической окружной неравномерности потока перед венцом лопатки.

Уровень периодической неравномерности потока будем оценивать величиной

$$\alpha = \frac{v_{\max}}{C_0},$$

где  $C_0$  – постоянная скорость в ядре потока между следами;  $v_{\max}$  – максимальная дополнительная скорость в следе.

Интенсивность управления обтеканием оценивается коэффициентом импульса двуга [7]:

$$C_\mu = \frac{\rho_b C_b^2}{\rho_0 C_0^2} \frac{b}{t} \bar{h}_{\text{ш}} \frac{1}{\sin \gamma},$$

где  $\rho_0$  – плотность основного потока;  $C_b$ ,  $\rho_b$  – скорость и плотность воздуха, который выдувается из щелей профиля в пограничный слой;  $\bar{h}_{\text{ш}}$  – относительная высота щели,  $\bar{h}_{\text{ш}} = h_{\text{ш}}/b$ ;  $b/t$  – густота решетки.

Задача исследования состоит в отыскании функциональной зависимости степени периодической неравномерности потока от интенсивности управления аэродинамическими следами:

$$\alpha = f(x, C_\mu).$$

В основе аналитических расчетов лежит нахождение толщины потери импульса  $\delta_{\Sigma}^{**}$  за выходной кромкой лопаток в решетке, т.е. величины, определяющей интенсивность аэродинамических следов.

Запишем уравнение импульсов для пограничного слоя на поверхности в виде

$$\frac{d\delta^{**}}{dx} + \frac{W'}{W} (2\delta^{**} + \delta^*) = \frac{\tau}{\rho W^2}. \quad (2)$$

Уравнение (2) после использования функций

$$f' = \frac{W' \delta^{**}}{W} X, \quad \xi' = \frac{\tau}{\rho W^2} X \quad (3)$$

преобразуется следующим образом:

$$\frac{df'}{dx} = \frac{W'}{W} \{ (1+m)\xi' - [3+m+(1+m)H'] f' \} + \frac{W''}{W'} f',$$

где

$$m = \frac{R_{\delta^{**}} X'}{X}; \quad R_{\delta^{**}} = \frac{W \delta^{**}}{\nu}; \quad X = f(R_{\delta^{**}}).$$

Влияние градиента давления на течение в пристенных слоях будем учитывать через отношение  $\frac{W' \delta^{**}}{W}$ , а изменение числа Рейнольдса  $Re$  – с помощью функции  $X$ , которую представим в виде

$$X = \frac{\rho W^2}{\tau}.$$

Принимая для ламинарного обтекания  $\xi = 0,219$ ,  $X = R_{\delta^{**}}$ ,  $m = 1$ , имеем

$$F_1(f) = (1+m)\xi - [3+m+(1+m)H]f = 0,44 - 5,8f. \quad (4)$$

Для развитого турбулентного пограничного слоя запишем

$$F(f) = 1,25 - 4,8f. \quad (5)$$

Анализ выражений (4), (5) показывает, что для разных режимов течения функция  $F(f)$  имеет линейный характер и может аппроксимироваться зависимостью

$$F(f) = a + bf. \quad (6)$$

Уравнение (2) с учетом (6) преобразуется в линейное уравнение

$$\frac{df}{dx} = \frac{W'}{W} a + \left( \frac{W''}{W'} - b \frac{W'}{W} \right) f,$$

решение которого запишем в виде

$$f = \frac{aW'}{W^b} \int_0^x W^{b-1} dx. \quad (7)$$

Из выражений (3) и (7) находим

$$\frac{W\delta^{**}}{\nu} = \frac{a}{\nu X W^{b-2}} \int_0^x W^{b-1} dx.$$

Обозначив  $X_1 = XR_{\delta^{**}}$ , получим

$$X = \frac{a}{\nu W^{b-2}} \int_0^x W^{b-1} dx.$$

Запишем выражения для определения толщины потери импульса для ламинарного и турбулентного течений соответственно:

$$\delta_{\Sigma}^{**} = \frac{2\nu}{W} \sqrt{X};$$

$$\delta_{\Sigma}^{**} = \frac{2\nu}{W} \left[ \frac{X}{153,2} \right]^{6/7}.$$

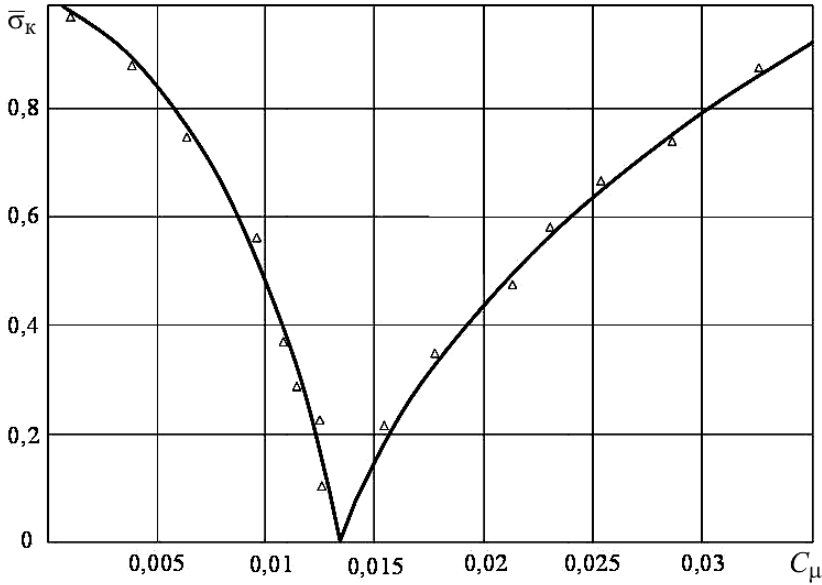


Рис. 3. Зависимость относительного уровня вибронпряжений в корневом сечении лопаток компрессора от интенсивности управления аэродинамическими следами (кривые – расчет по формуле (8); точки – экспериментальные результаты [5]).

С использованием приближенного соотношения  $\xi_{пр} = 2 \frac{\delta^*}{a} = 2 \frac{\delta^{**}}{a}$  можно получить функциональную зависимость уровня периодической неравномерности потока от расстояния до выходной кромки лопаток:

$$\alpha = K_1 \left[ \left( 2 \frac{t}{b} \frac{\delta_{\Sigma}^{**}}{a} \sin \beta_2 \right) \frac{b}{x} \right]^{0,5}.$$

Определим толщину потери импульса в следе за элементами статора компрессора при управлении обтеканием поверхностей в виде

$$\delta^{**} = \left( \delta_0^{**} - C_{\mu} \rho_0 W_b \frac{b}{t} \sin \gamma + \delta_x^{**} \right),$$

где  $\delta_x^{**}$  – толщина потери импульса на участке от места размещения щелей до выходной кромки.

С учетом сделанных допущений получим

$$\alpha_{\mu} = K \left[ 2 \left( \frac{t}{b} \right) \frac{\sin \beta_2}{a} \frac{b}{x} \left( \delta_{\Sigma_0}^{**} - C_{\mu} \rho_m W_m \frac{b}{t} \sin \gamma - \delta_{\Sigma_x}^{**} \right) \right]^{0,5},$$

где  $\rho_m, W_m$  определяются для межлопаточного канала в соответствии с теоремой Жуковского–Стечкина для решетки профилей.

Выражение (1) для определения уровня вибронпряжений в случае резонансных колебаний при разной интенсивности управления аэродинамическими следами может быть преобразовано к безразмерному виду:

$$\bar{\sigma}_k = \frac{\sigma_k}{\sigma_{k_0}} = \frac{\left[ \beta_0 - \arccos \frac{u}{W_1} (1 + \alpha_\mu) \right] \left( \frac{1}{1 + \alpha_\mu} \right)^2 - \left( \beta_0 - \arccos \frac{u}{W_1} \right)}{\left[ \beta_0 - \arccos \frac{u}{W_1} (1 + \alpha) \right] \left( \frac{1}{1 + \alpha} \right)^2 - \left( \beta_0 - \arccos \frac{u}{W_1} \right)}, \quad (8)$$

где  $\sigma_{k_0}$  – напряжения при  $C_\mu = 0$ .

На рис. 3 представлены результаты исследований влияния управления аэродинамическими следами на уровень вибронпряжений при вынужденных резонансных колебаниях лопаток ступени осевого компрессора.

Таким образом, полученные результаты показывают, что при интенсивности газодинамического управления обтеканием  $C_\mu = 0,01 \dots 0,015$  в диапазоне чисел  $M_0 = 0,4 \dots 0,8$  уровень вибронпряжений по сравнению с начальным может быть уменьшен на 90...95%, т.е. практически устраняются колебания лопаток. При интенсивности управления аэродинамическими следами выше оптимальных значений наблюдается опять рост вибронпряжений, обусловленный колебаниями лопаток.

## Выводы

1. Газодинамическое управление обтеканием элементов статора позволяет снизить уровень вибронпряжений в лопатках ротора компрессора при их резонансных колебаниях в результате влияния на периодическую окружную неравномерность потока, обусловленную аэродинамическими следами за элементами статора, расположенными перед лопаточным венцом рабочего колеса.

2. Получены зависимости, позволяющие оценивать влияние интенсивности газодинамического управления обтеканием лопаток направляющего аппарата на уровень вибронпряжений в рабочих лопатках.

3. Сравнение результатов расчетов по полученным зависимостям и данных экспериментальных исследований свидетельствует о хорошей их сходимости.

4. Показано, что при интенсивности газодинамического управления обтеканием лопаток направляющего аппарата  $C_\mu = 0,01 \dots 0,02$  уровень вибронпряжений в корневом сечении лопаток рабочего колеса при их резонансных колебаниях может быть уменьшен на 90...95%.

## Резюме

Викладено результати дослідження впливу газодинамічного управління обтіканням лопаток направляючого апарату ступеня осевого компресора на вібронпруження лопаток робочого колеса. Показано, що газодинамічна дія на обтікання лопаток забезпечує вирівнювання поля швидкостей потоку перед робочим колесом і зниження рівня вібронпружень у лопатках при їх резонансному збудженні.

1. *Самойлович Г. С.* Возбуждение колебаний лопаток турбомашин. – М.: Машиностроение, 1975. – 288 с.
2. *Самойлович Г. С.* Нестационарное обтекание и аэроупругие колебания решеток турбомашин. – М.: Наука, 1969. – 444 с.
3. *Кулагина В. А.* Приближенный расчет аэродинамического возбуждения и демпфирования резонансных колебаний лопаток компрессора // Лопаточные машины и струйные аппараты. – 1968. – № 4. – С. 51–64.



4. *Хейман Ф. Д.* Вибрации турбинных лопаток, возникающие под влиянием закрочных следов лопаток соплового аппарата // Энергетические машины и установки. – 1969. – № 4. – С. 1–20.
5. *Терещенко Ю. М.* Исследование методов снижения уровня вибронапряжений в элементах турбомашин // Пробл. прочности. – 1974. – № 10. – С. 96–98.
6. *Биргер И. А.* Расчет лопаток на прочность. Руководство для конструкторов по расчету на прочность газотурбинного двигателя. – М.: Оборонгиз, 1956. – Вып. 2. – 192 с.
7. *А.с. № 411232.* Способ устранения неравномерности потока за лопатками статора осевого компрессора / Ю. М. Терещенко // Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки. – 1974. – № 2.

Поступила 06. 07. 2015