

Р.6.7

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED  
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

---

Серия А

№ 151

1958

Н. К. ЗИНОВЬЕВ

**ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА ВКЛЮЧЕННЫХ ГРУПП СОПЕЛ НА  
ЭКОНОМИЧНОСТЬ ОДНОВЕНЕЧНОЙ РЕГУЛИРОВОЧНОЙ  
СТУПЕНИ СУДОВОЙ ТУРБИНЫ**

ТАЛЛИН, 1958



Ер. 6.7

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED  
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

---

Серия А

№ 151

1958

Н. К. ЗИНОВЬЕВ

**ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА ВКЛЮЧЕННЫХ ГРУПП СОПЕЛ НА  
ЭКОНОМИЧНОСТЬ ОДНОВЕНЕЧНОЙ РЕГУЛИРОВОЧНОЙ  
СТУПЕНИ СУДОВОЙ ТУРБИНЫ**

Ер. 1693



ТАЛЛИН, 1958

В СТАТЬЕ НА ОСНОВАНИИ АНАЛИЗА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ИЗЛАГАЮТСЯ ПРИЧИНЫ, ВЫЗЫВАЮЩИЕ СНИЖЕНИЕ КПД ТУРБИННЫХ СТУПЕНЕЙ ПРИ ПАРЦИАЛЬНОМ ВПУСКЕ, ПРИВОДИТСЯ ВЫВОД ФОРМУЛЫ КРАЕВЫХ ПОТЕРЬ, ПРИВОДИТСЯ СОПОСТАВЛЕНИЕ ДАННЫХ РАСЧЕТА ПО ПРЕДЛАГАЕМОЙ ФОРМУЛЕ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ.

РАБОТА ПРЕДНАЗНАЧЕНА ДЛЯ НАУЧНЫХ И ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РАБОТНИКОВ, ЗАНИМАЮЩИХСЯ ВОПРОСАМИ ИССЛЕДОВАНИЯ, КОНСТРУИРОВАНИЯ И ИСПЫТАНИЯ ПАРОВЫХ ТУРБИН.

## Принятые условные обозначения основных величин

$\rho$  — Плотность рабочего вещества кг/м<sup>3</sup>.

$\eta_{ii}$  — кпд турбинной ступени с полным подводом.

$\eta'_{ii}$  — кпд парциальной турбинной ступени.

$\varepsilon$  — степень парциальности.

$D_c$  — Средний диаметр турбинной ступени в метрах.

$C$  — переменная по длине дуги впуска абсолютная скорость истечения в м/сек.

$C_1$  — абсолютная скорость истечения при полном подводе в м/сек (с учетом потерь в сопле).

$\varphi = \frac{C}{C_1}$  — безразмерная абсолютная скорость.

$W$  — переменная по длине дуги впуска скорость потока в относительном движении в м/сек.

$W_1$  — скорость потока в относительном движении при полном подводе в м/сек.

$U$  — окружная скорость в м/сек.

$\nu = \frac{U}{C_1}$  — характеристика турбинной ступени.

$\psi$  — коэффициент скорости в рабочих лопатках.

$\alpha_1$  — выходной угол сопловой лопатки в градусах.

$\alpha_{1\varepsilon}$  — эффективный угол выхода потока из сопел в градусах.

$\beta_1$  — угол между направлением потока в относительном движении и осью решетки в градусах.

$C_{1a}$  — аксиальная составляющая абсолютной скорости.

$C_{1u}$  } — проекции абсолютных скоростей на окружное на-  
 $C_{2u}$  } правление в м/сек.

$W_{1u}$  — проекции абсолютных скоростей на окружное на-  
правление в м/сек.

$t'$  — шаг рабочих лопаток с учетом загромождения в м.

$F$  — площадь сечения рабочих лопаток в м.

- $\lambda_{11}$  — коэффициент присоединенной массы кг/м<sup>3</sup>.  
 $\epsilon_k$  — коэффициент краевых потерь.  
 $\chi$  — коэффициент сопротивления прямоугольной пластины.  
 $\delta$  — величина закрытого осевого зазора в м.  
 $z$  — число сопел в сегменте.  
 $\theta$  — угол, характеризующий границы потока за соплами.  
 $L_\epsilon$  — работа, совершаемая одной лопаткой парциальной ступени за один оборот в кгм/сек.  
 $L_u$  — работа, совершаемая одной лопаткой ступени с полным подводом за один оборот в кгм/сек.  
 $S$  — ось координат, направленная по оси решетки.  
 $x$  — ось координат, совпадающая с направлением потока в ядре.  
 $y$  — ось координат, перпендикулярная потоку.  
 $l$  — высота рабочей лопатки в м.  
 $i$  — число включенных групп сопел.  
 $B$  — ширина профиля в м.

## ВВЕДЕНИЕ

Характерной особенностью судового турбозубчатого агрегата является работа при переменных числах оборотов.

Изменение числа оборотов турбины достигается, в основном, за счет изменения числа действующих сопловых групп. Включение числа сопловых групп для обеспечения заданного хода производится согласно инструкции завода-изготовителя турбины.

Экспериментальная проверка влияния числа включенных сопловых групп на кпд турбинной ступени (Л 1,9) показала, что при неизменной парциальности увеличение числа дуг подвода приводит к довольно резкому уменьшению окружного кпд ступени.

В отечественной и иностранной литературе отсутствуют работы, посвященные анализу влияния числа включенных групп сопел на кпд регулировочной ступени судовой турбины.

Ряд работ (Л 1, 2, 8, 9), частично или полностью посвященных влиянию парциального впуска на кпд турбинной ступени, не дают решения этого вопроса.

Производимый в настоящее время учет краевых потерь умножением парциальных потерь на число дуг подвода не подтверждается экспериментально.

В настоящее время при проектировании судовых турбин большой мощности в ряде случаев двухвенечная регулировочная ступень заменяется одновенечной.

В связи с этим исследование влияния числа включенных групп сопел на экономичность одновенечной регулировочной ступени является своевременным и актуальным.

## АНАЛИЗ УСЛОВИЙ РАБОТЫ ОБЛОПАЧИВАНИЯ ПРИ ПАРЦИАЛЬНОМ ПОДВОДЕ

Анализ экспериментальных зависимостей потерь в парциальной ступени, приведенных на рис. 1, показывает, что при сохранении постоянной парциальности увеличение числа включенных групп сопел, или увеличение окружной скорости (характеристики  $\nu = \frac{U}{C_1}$ ) сопровождается довольно резким возрастанием потерь. Такой результат указывает прежде всего на то, что величина скорости в по-

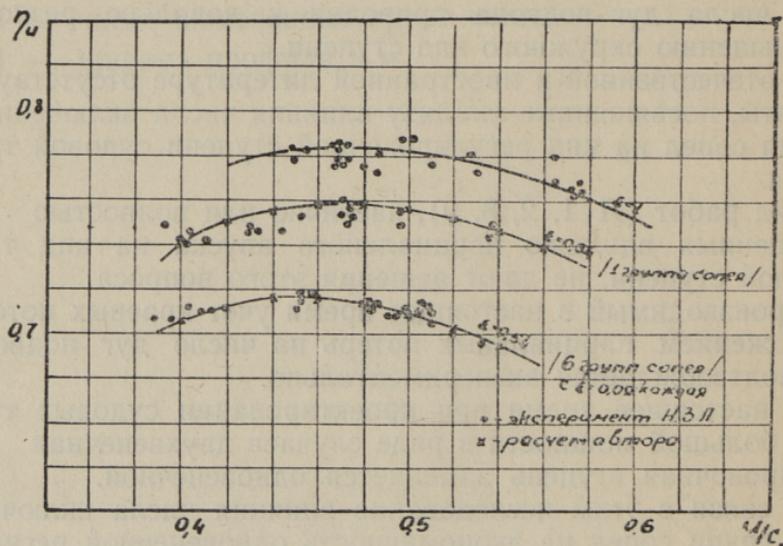


Рис. 1. Зависимость окружного КПД турбинной ступени от числа включенных групп сопел.

токе за соплами, а следовательно и в потоке, натекающем на рабочие лопатки, сильно меняется по длине дуги впуска.

Это положение подтверждается приведенными на рис. 2-3 экспериментальными зависимостями распределения скоростей и углов выхода потока за решеткой, составленной из ограниченного числа профилей. Зависимости получены обработкой автором результатов аэродинамических продувок решеток профилей, проведенных в ЦКТИ (л 3).

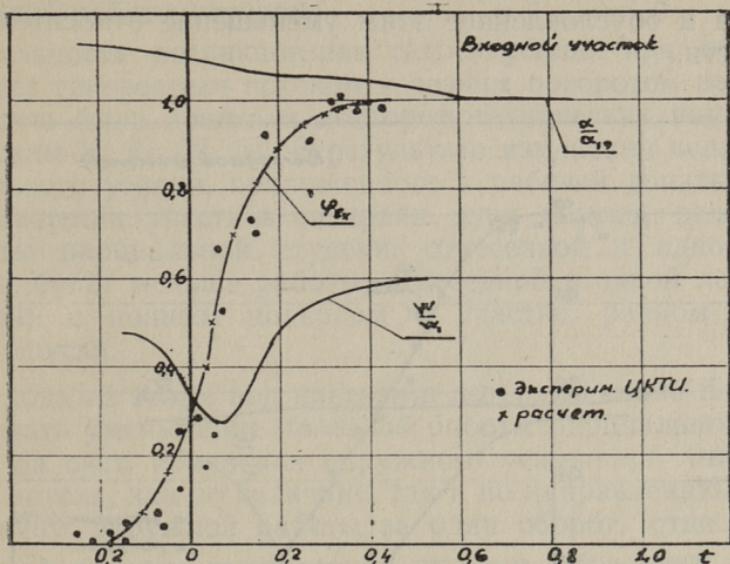


Рис. 2. Изменение поля скоростей на входном участке дуги впуска.

Анализ зависимостей показывает, что поле скоростей в потоке за соплами можно разделить на ряд участков:

1. Входной участок, на котором величина абсолютной скорости, начиная с некоторого расстояния от кромки крайнего сопла, возрастает от нуля до своего среднего значения в центральной части дуги подвода. Следует отметить, что величина абсолютной скорости потока достигает своего номинального значения примерно на расстоянии шага сопел вглубь потока.

Величина относительной скорости убывает от величины близкой к окружной скорости до минимального значения, и затем резко возрастает до своего номинального значения, обуславливая на этом участке обтекание лопаток ускоренным потоком.

Опыт показывает, что величина выходного угла потока на входном участке превышает величину угла выхода потока примерно на 10—30%. Угол выхода потока достигает

ет величины эффективного угла лишь на некотором удалении от кромки сопла (Л. 4).

2. Центральный участок потока, где поле абсолютных скоростей меняется лишь за счет влияния выходных кромок сопел, сохраняя величину и направление, соответствующие условиям полного подвода. При приближении к выходному участку наблюдается уменьшение угла выхода потока и обусловленное этим уменьшение относительной скорости.

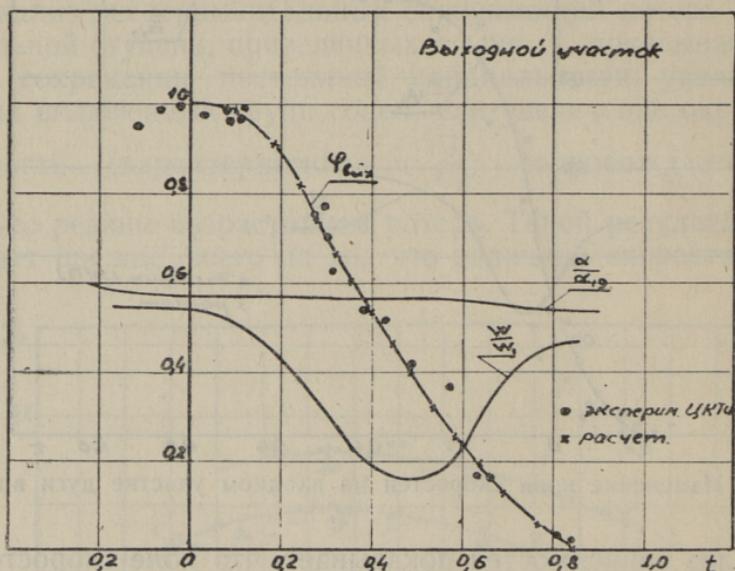


Рис. 3. Изменение поля скоростей на выходном участке дуги выпуска.

3. Выходной участок, где величина абсолютной скорости убывает от номинального значения до нуля. Величина относительной скорости потока также убывает, достигая на расстоянии 0,5 шага сопла минимального значения, а затем резко возрастает до значения, близкого к величине окружной скорости. Угол выхода потока на этом участке меньше эффективного угла. На протяжении всего участка угол выхода потока из сопел меняется незначительно, оставаясь равным приблизительно 0,5 величины эффективного угла выхода.

Анализ поля скоростей, набегающего на рабочие лопатки потока показывает, что величина усилия, возник-

кающего на рабочей лопатке, будет резко изменяться на краевых участках за счет изменения угла атаки и скорости набегающего потока. Кроме того, обтекание рабочих лопаток ускоренным потоком при резком изменении угла натекания потока вызовет возникновение инерционного усилия, направленного на выходном участке против движения венца лопаток, и, следовательно, уменьшение полезной работы ступени.

Реальность возникновения такого усилия при обтекании тел ускоренным потоком и резким поворотом вектора скорости была доказана доктором технических наук Федяевским К. К. (Л. 5). В результате изменения величины окружного усилия, приложенного к рабочей лопатке при прохождении участков на краях дуги впуска, величина работы парциальной ступени, отнесенной к одной лопатке, будет меньше работы, отнесенной к одной лопатке ступени с полным подводом на участке, равном длине дуги впуска.

Исходя из этого, под краевыми потерями сопла следует понимать уменьшение полезной работы парциальной ступени за счет изменения окружного усилия на участках дуги впуска, как по величине, так и по направлению. Если величину окружной работы за один оборот, отнесенной к одной лопатке парциальной ступени обозначим  $L_\varepsilon$ , а ступени с полным подводом  $L_u$ , то абсолютная величина краевых потерь выразится как:

$$\Delta L_k = \varepsilon L_u - L_\varepsilon \quad (1)$$

Если абсолютную величину краевых потерь отнести к величине работы на окружности, совершаемой одной лопаткой за один оборот такой же ступени с полным подводом на участке, равном длине дуги впуска, имеющей ту же окружную скорость, что и парциальная ступень и работающей с одинаковыми теплоперепадами, то получим величину коэффициента краевых потерь:

$$\zeta_k = \frac{\Delta L_k}{\varepsilon L_u} = 1 - \frac{L_\varepsilon}{\varepsilon L_u} \quad (2)$$

Разделив числитель и знаменатель дроби на величину теоретической работы, которая могла бы быть совершена за один оборот рабочей лопаткой на участке дуги впуска при отсутствии потерь, получим:

$$\zeta_k = 1 - \frac{\eta'_u}{\eta_u} \quad (3)$$

Отсюда окружной КПД парциальной ступени равен:

$$\eta'_u = (1 - \zeta_k) \eta_u \quad (4)$$

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА КРАЕВЫХ ПОТЕРЬ

Для определения  $\zeta_k$  необходимо знать  $L_u$  и  $L_\varepsilon$ . Величина работы за один оборот вала окружных составляющих сил, приложенных к рабочей лопатке при условиях полного подвода, может быть определена как:

$$L_u = \pi D_c P_u = \pi D_c \rho_1 t' l C_{1a} (C_{1u} - C_{2u}) \quad (5)$$

Согласно зависимостям, вытекающим из плана скоростей приведенного на рис. 4, и простейших преобразований, выражение (5) приводится к виду:

$$L_u \approx \pi D_c \rho_1 t' l C_1^2 \sin \alpha_{13} [\cos \alpha_{13} - v_1 + (1 + 0,5 v_1 - v_1 \cos \alpha_{13}) \psi \cos \beta_{23}] \quad (6)$$

Величина  $L_\varepsilon$  может быть определена как сумма работ сил, приложенных к одной лопатке парциальной ступени при прохождении ею струи, вытекающей из группы сопел.

Исходя из соображений закономерности изменения величины  $C$  и направления скорости набегающего на рабочую лопатку потока, струю пара за соплами целесообразно разбить на участки, на которых закономерности изменения скоростей одинаковы.

При этом представим нестационарный процесс обтекания рабочих лопаток состоящим из бесконечно большого числа элементов стационарного процесса.

На каждом участке работа окружных составляющих сил, приложенных к лопатке парциальной ступени и отнесенной к единице длины, может быть определена как:

$$L_u = \int_{s_n}^{s_{n+1}} P_u ds \quad (7)$$

Следовательно для того, чтобы определить величину работы сил на этих участках, необходимо установить зависимость величины окружных составляющих усилий от положения лопатки по длине дуги впуска. На входе, согласно распределению скоростей по длине дуги впуска, приведенному на рис. 5, рабочая лопатка обтекается замедленным потоком с большими отрицательными углами атаки.

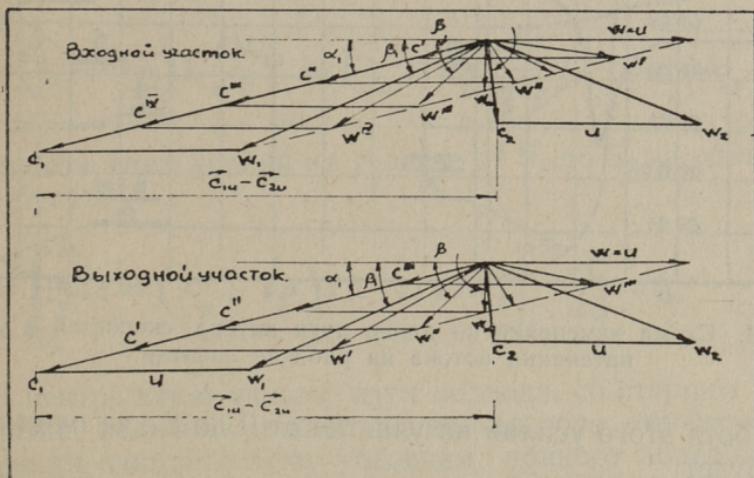


Рис. 4. План скоростей на входном и выходном участке дуги впуска.

На этом участке на лопатке возникает тормозящее усилие, аналогичное усилию, возникающему при движении против направления потока прямоугольной пластины.

Величина возникающего окружного усилия может быть определена по формуле:

$$P_u \approx -x \rho_1 \frac{W_{lu}^2}{4} B l = -x \frac{\rho_1 B}{4} l (c^2 \cos^2 1,3 \alpha_{13} - 2CU \cos 1,3 \alpha_{13} + U^2) \quad (8)$$

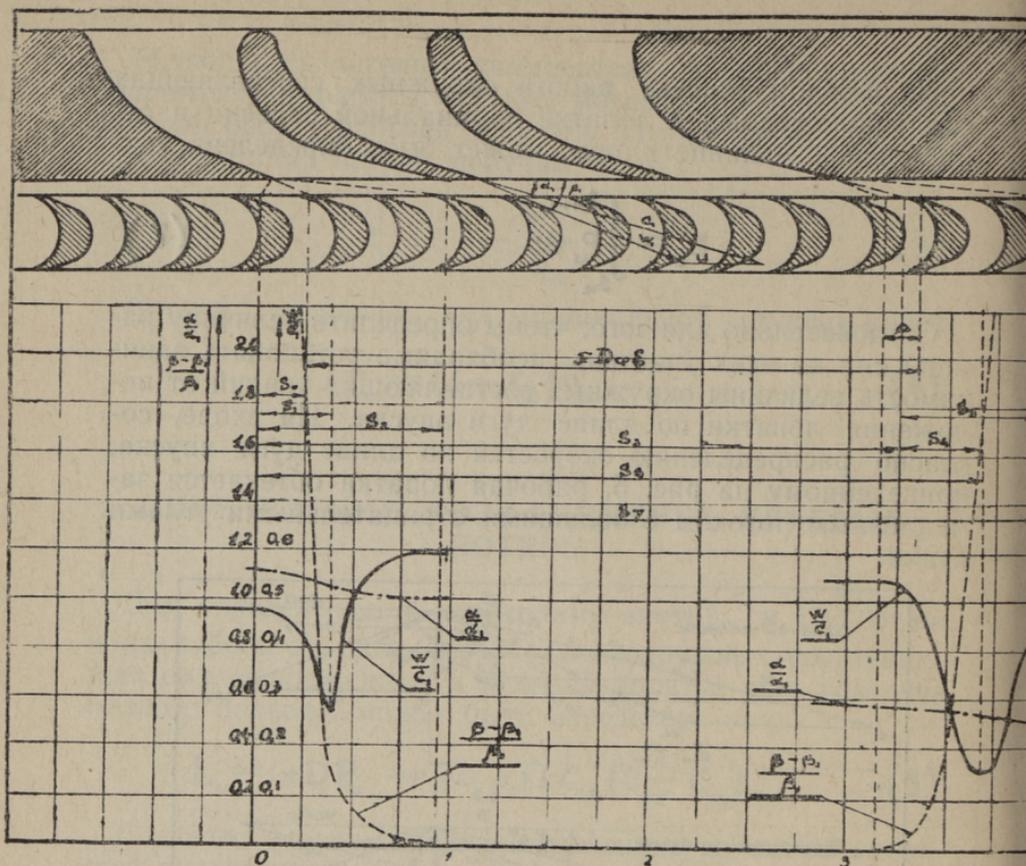


Рис. 5. Схема изменения по длине дуги впуска скоростей и углов натекания потока на рабочие лопатки.

Работа этого усилия на участке от 0 до  $S_1$ , за один оборот будет:

$$L_1 \approx -x \frac{\rho_1 B}{4} \left( \cos^2 1,3 \alpha_{13} \int_0^{S_1} C^2 ds - 2U \cos 1,3 \alpha_{13} \int_0^{S_1} C ds + U^2 \int_0^{S_1} ds \right) \quad (9)$$

На участке  $S_2 - S_1$ , где лопатка обтекается ускоренным потоком, величина возникающего окружного усилия в каждый момент времени может быть определена по уравнению количеств движения:

$$P_u = \rho_1 t l C_{1a} (\bar{C}_{1u} - \bar{C}_{2u}) \approx \rho_1 t l C \sin 1,3 \alpha_{13} \left[ C \cos 1,3 \alpha_{13} - U + \psi \left( C^2 + \frac{U^2}{2} - UC \cos 1,3 \alpha_{13} \right) \cos \beta_{23} \right] \quad (10)$$

Работа этого усилия на участке  $S_2-S_1$  за один оборот будет:

$$L'_1 = \int_{S_1}^{S_2} P_u ds \approx \rho_1 t' l \sin 1,3 \alpha_{13} \left[ \cos 1,3 \alpha_{13} (1 - \psi U \cos \beta_{23}) \int_{S_1}^{S_2} C^2 ds - \right. \\ \left. - (U - 0,5 \psi U^2 \cos \beta_{23}) \int_{S_1}^{S_2} C ds + \psi \cos \beta_{23} \int_{S_1}^{S_2} C^3 ds \right] \quad (11)$$

Помимо аэродинамического усилия, вследствие обтекания лопатки ускоренным потоком и изменения угла натекания, возникает инерционное усилие, направленное по движению лопатки. Окружная составляющая инерционного усилия может быть определена по формуле, предложенной д. т. н. Федяевским (Л-5).

$$P_u = (\lambda_{11} + F_{\rho_1}) l \frac{dW_{1u}}{d\tau} = (\lambda_{11} + F_{\rho_1}) \frac{dC}{dS} l U \cos 1,3 \alpha_{13} \quad (12)$$

Работа этого усилия на участке от  $S_1$  до  $S_2$  за один оборот будет:

$$L''_1 = \int_{S_1}^{S_2} P_u ds = (\lambda_{11} + F_{\rho_1}) l U \cos 1,3 \alpha_{13} \int_{S_1}^{S_2} \frac{dC}{dS} dS \quad (13)$$

В центральном участке дуги подвода, со стороны входа лопатки, величина и направление вектора относительной скорости соответствуют условиям полного подвода. По мере приближения к выходному участку на расстоянии двух шагов от кромки крайнего сопла, величина выходного угла потока  $\alpha_{13}$  уменьшается до 50% от номинальной. Если учесть влияние изменения по длине участка угла выхода струи  $\alpha_{13}$  на величину окружного усилия уменьшением угла, и коэффициента потерь  $\psi$ , то величина окружного усилия может быть определена по формуле:

$$P_u \approx \rho_1 t' l C_1^2 \sin \alpha'_1 \left[ \cos \alpha'_1 - v_1 + (1 + 0,5 v_1^2 - \right. \\ \left. - v_1 \cos \alpha'_1) \psi \cos \beta_{23} \right] \quad (14)$$

Величина окружной работы отнесенной к одной лопатке на центральном участке, будет:

$$L_2 \approx \rho_1 t' l C_1^2 \sin^2 \alpha'_1 \left[ \cos \alpha'_1 - v_1 + (1 + 0,5 v_1^2 - v_1 \cos \alpha'_1) \psi \cos \beta_{23} \right] (S_3 - S_2) \quad (15)$$

На выходном участке  $S_{41}$  величина относительной скорости уменьшается от значения в центральной части до минимального значения. Величина окружной составляющей аэродинамического усилия, возникающего на лопатке, может быть определена из выражения:

$$P_u \approx \rho_1 t' l \sin 0,5 \alpha_{13} \left[ \cos 0,5 \alpha_{13} (1 - \psi U \cos \beta_{23}) C^2 - (U - 0,5 U^2 \psi \cos \beta_{23}) C + \psi \cos \beta_{23} C^3 \right] \quad (16)$$

Величина окружной работы сил на этом участке будет:

$$L_3 = \int_0^{S_4} P_u ds \approx \rho_1 t' l \sin 0,5 \alpha_{13} \left[ \cos 0,5 \alpha_{13} (1 - \psi U \cos \beta_{23}) \int_0^{S_4} C^2 ds + 0,5 \psi U^2 \cos \beta_{23} \int_0^{S_4} C ds - U \int_0^{S_4} C ds + \psi \cos \beta_{23} \int_0^{S_4} C^3 ds \right] \quad (17)$$

На участке  $S_5 - S_4$  величина относительной скорости натекающего на лопатки потока снова возрастает и изменяется угол атаки. Вследствие наличия больших отрицательных углов атаки возникает тормозящее усилие, величина которого может быть определена по формуле:

$$P_u = -x \rho_1 \frac{W_{1u}^c}{4} B l \approx -x \frac{\rho_1 B}{4} l (C^2 \cos^2 0,5 \alpha_{13} - 2CU \cos 0,5 \alpha_{13} + U^2) \quad (18)$$

Величина работы, совершаемой этой составляющей:

$$L'_3 = \int_{S_4}^{S_5} P_u dS \approx -\alpha \frac{\rho_1 B}{4} l (\cos^2 0,5\alpha_{13} \int_{S_4}^{S_5} c^2 dS - 2U \cos 0,5\alpha_{13} \int_{S_4}^{S_5} c dS + U^2 \int_{S_4}^{S_5} dS) \quad (19)$$

Кроме аэродинамического усилия на этом участке возникает также инерционное усилие, величина которого может быть определена как:

$$P_u = (\lambda_{11} + F\rho_1) \frac{dC}{dS} U l \cos 0,5\alpha_{13} \quad (20)$$

Работа торможения, обусловленная инерционным усилием за один оборот:

$$L''_3 = \int_{S_4}^{S_5} P_u dS \approx (\lambda_{11} + F\rho_1) U l \cos 0,5\alpha_{13} \int_{S_4}^{S_5} \frac{dC}{dS} dS \quad (21)$$

Исходя из вышеприведенных соображений, величина окружной работы парциальной ступени, отнесенной к одной лопатке, будет:

$$L_\varepsilon = L_1 + L'_1 + L''_1 + L_2 + L_3 + L'_3 + L''_3 \quad (22)$$

Из выведенного выражения работы парциальной ступени видно, что ее величина в основном определяется характером распределения абсолютных скоростей за сопловым сегментом.

Анализ структуры потока за плоской решеткой, состоящей из ограниченного числа профилей лопаток, позволяет считать, что участки на краях струи, вытекающей из сопел, аналогичны пограничному слою свободной турбулентной струи.

В связи с этим для определения закономерности изменения поля скоростей вдоль фронта решетки можно вос-

пользоваться экспериментальной зависимостью, полученной для начального участка свободной турбулентной струи д. т. н. Г. Н. Абрамовичем (Л. 6).

$$\varphi = \frac{c}{c_1} = \left[ 1 - \left( \frac{y}{Y} \right)^{3/2} \right]^2 \quad (23)$$

Применительно к потоку за соплами в парциальной степени, согласно схемам, приведенным на рис. 6 и 7, для входного и выходного участка, зависимость (23) в результате простых преобразований может быть приведена к виду:

$$\varphi_{\text{вх}} = \left[ 1 - \left( \frac{\alpha S_2 - \alpha S}{\alpha S_2 - \alpha S + S} \right)^{3/2} \right]^2 \quad (24)$$

а) Для входного участка

$$\varphi_{\text{вых}} = \left[ 1 - \left( \frac{S}{b S_5 - b S + S} \right)^{3/2} \right]^2 \quad (25)$$

Расчет безразмерных скоростей по формулам 24—25 дает хорошее совпадение с экспериментальными данными, как это видно из рис. 3—4. Для приведения выражения безразмерной скорости к виду, удобному для интегрирования, преобразуем выражение 24 и 25 следующим образом:

а) Входной участок:

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{вх}} &= \left[ 1 - \left( \frac{\alpha S_2 - \alpha S}{\alpha S_2 - \alpha S + S} \right)^{3/2} \right]^2 = 1 - \\ &- 2 \left( \frac{\alpha S_2 - \alpha S}{\alpha S_2 - \alpha S + S} \right)^{3/2} + \left( \frac{\alpha S_2 - \alpha S}{\alpha S_2 - \alpha S + S} \right)^3 \end{aligned} \quad (26)$$

Члены, стоящие в скобках, при помощи подстановки  $m = \frac{aS_2 - aS + S}{S}$  разложим в степенной сходящийся ряд:

$$\begin{aligned}(1-m)^{3/2} &= 1 - \frac{3}{2}m + \frac{3}{8}m^2 + \frac{1}{16}m^3 + \dots \\ (1-m)^3 &= 1 - 3m + 3m^2 - m^3\end{aligned}$$

Пренебрегая членами, содержащими величину  $m$  в степени больше третьей, приведем выражение 26 к виду:

$$\varphi_{\text{вх}} = \frac{2,25S^2}{(aS_2 - aS + S)^2} (aS_2 - aS - 0,5S) \quad (27)$$

Величина

$$\frac{d\varphi_{\text{вх}}}{dS} = \frac{1}{C_1} \frac{dC}{dS} = \frac{4,5S a S_2}{(aS_2 - aS + S)^3} (0,25S + aS_2 - aS) \quad (28)$$

б) Выходной участок

$$\begin{aligned}\varphi_{\text{вых}} &= \left[ 1 - \left( \frac{S}{bS_5 - bS + S} \right)^{3/2} \right]^2 = 1 - 2 \left( \frac{S}{bS_5 - bS + S} \right)^{3/2} + \\ &\quad + \left( \frac{S}{bS_5 - bS + S} \right)^3\end{aligned} \quad (29)$$

При помощи подстановки  $n = \frac{b(S_5 - S)}{bS_5 - bS + S}$  разложим члены, стоящие в скобках, в степенной сходящийся ряд:

$$\begin{aligned}(1-n)^{3/2} &= 1 - \frac{3}{2}n + \frac{3}{8}n^2 + \frac{1}{16}n^3 + \dots \\ (1-n)^3 &= 1 - 3n + 3n^2 - n^3\end{aligned}$$

$$+a) \left[ \alpha - \frac{1}{1 + \frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{S_1}{S_2}} \right] + 0,25 \left[ \alpha^2 - \frac{1}{\left(1 + \frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{S_1}{S_2}\right)^2} \right] \} \quad (35)$$

$$\int_{S_1}^{S_2} \frac{dC}{dS} dS = C_1 \int_{S_1}^{S_2} \frac{d\varphi_{\text{bx}}}{dS} dS = C_1 \frac{4,5}{(1-\alpha)^3} \left\{ \left( \alpha - 0,25 \right) \left[ \alpha - \frac{1}{1 + \frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{S_1}{S_2}} \right] + 0,5 \left[ \alpha^2 - \frac{1}{\left(1 + \frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{S_1}{S_2}\right)^2} \right] \left( \alpha - 0,5 \right) - 0,25 \left[ \alpha^3 - \frac{1}{\left(1 + \frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{S_1}{S_2}\right)^3} \right] \right\} \quad (36)$$

$$\int_0^{S_4} C^2 dS = C_1^2 \int_0^{S_4} \varphi_{\text{bx}} dS = C_1^2 \frac{5,062 b^4 S_5}{(1-b)^7} \left\{ (1-0,5b)^2 (1-b) \frac{S_4}{S_5} - (4-3b+5b^2-6b^3) \ln \left[ 1 + \frac{1-b}{b} \frac{S_4}{S_5} \right] - (6-2b-0,25b^2+0,675b^3-9,25b^4) \left[ \frac{1}{1 + \frac{1-b}{b} \frac{S_4}{S_5}} - 1 \right] + (2-b+2b^2-17,5b^4+5b^5) \left[ \frac{1}{\left(1 + \frac{1-b}{b} \frac{S_4}{S_5}\right)^2} - 1 \right] - 1/3 (1-3b-0,25b^2+46,5b^3-51b^4+10,5b^5-10,5b^6) \left[ \frac{1}{\left(1 + \frac{1-b}{b} \frac{S_4}{S_5}\right)^3} - 1 \right] - 1/4 (b+59b^2-2b^7) \left[ 1 - \right. \right.$$

$$-\frac{1}{\left(1 + \frac{1-b}{b} \frac{S_4}{S_5}\right)} + 1/20 \left[ (125 - 156 + 3,75b^2 - 5b^3 + 3,75b^4 - 1,5b^5 + 0,25b^6) \left[ 1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{1-b}{b} \frac{S_4}{S_5}\right)^5} \right] \right] \quad (37)$$

$$\int_0^{S_4} C dS = C_1 \int_0^{S_4} \varphi_{\text{облх}} dS = C_1 \frac{2,25b^2 S_5}{(1-b)^3} \left\{ (1-0,5b)(1-b) \frac{S_4}{S_5} - (7-18,5b+15b^2-5b^3) \ln \left[ 1 + \frac{(1-b) S_4}{b S_5} \right] - \frac{(1-0,5b+2b^2+3b^3)}{(1-b)b} \left[ \frac{1}{\left(1 + \frac{1-b}{b} \frac{S_4}{S_5}\right)} - 1 \right] + \frac{0,5}{(1-b)b^2} \left[ \frac{1}{\left(1 + \frac{1-b}{b} \frac{S_4}{S_5}\right)^2} - 1 \right] \right\} \quad (38)$$

$$\int_{S_4}^{S_5} C^2 dS = C_1^2 \int_{S_4}^{S_5} \varphi_{\text{облх}}^2 dS = C_1^2 \frac{5,062b^4 S_5}{(1-b)^7} \left\{ (1-0,5b)(1-b) \left(1 - \frac{S_4}{S_5}\right) - (4-3b+5b^2-6b^3) \ln \frac{1}{b + (1-b) \frac{S_4}{S_5}} - (6-2b-0,25b^2+6,75b^3-9,25b^4) \left[ \frac{1}{1 + \frac{1-b}{b} \frac{S_4}{S_5}} - b \right] + (2-b+2b^2-17,5b^4+5b^5) \left[ \frac{1}{\left(1 + \frac{1-b}{b} \frac{S_4}{S_5}\right)^2} - \right. \right.$$

$$\begin{aligned}
& -b^2] - 1/3(1 + 3b - 0,25b^2 + 46,5b^3 - 51b^4 + \\
& + 10,5b^5 + 10,5b^6) \left[ \frac{1}{\left(1 + \frac{1-b}{b} \frac{S_4}{S_5}\right)^3} - b^3 \right] + 1/4(b + \\
& + 59b^2 - 2b^7) \left[ \frac{1}{\left(1 + \frac{1-b}{b} \frac{S_4}{S_5}\right)^4} - b^4 \right] + 1/20(1,25 - \\
& - 1,5b + 3,75b^2 - 5b^3 + 3,75b^4 - 1,5b^5 + 0,25b^6) \left[ b^5 - \right. \\
& \left. - \frac{1}{\left(1 + \frac{1-b}{b} \frac{S_4}{S_5}\right)^5} \right] \} \quad (39)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\int_{S_4}^{S_5} c dS &= C_1 \int_{S_4}^{S_5} \varphi_{\text{обл}} dS = C_1 \frac{2,25b^2 S_5}{(1-b)^3} \left\{ (1-0,5b)(1-b)(1- \right. \\
& - \frac{S_4}{S_5}) - (7 - 18,5b + 15b^2 - 5b^3) \ln \frac{1}{b + (1-b) \frac{S_4}{S_5}} + \\
& + \frac{1-0,5b + 2b^2 + b^3}{1-b} \left[ \frac{1}{b + (1-b) \frac{S_4}{S_5}} - 1 \right] - \\
& \left. - \frac{0,5}{1-b} \left[ \frac{S_5^2}{(bS_5 - bS_4 - S_4)^2} - 1 \right] \right\} \quad (40)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\int_{S_4}^{S_5} \frac{dC}{dS} dS &= C_1 \int_{S_4}^{S_5} \frac{d\varphi_{\text{обл}}}{dS} dS = C_1 \frac{4,5}{(1-b)^3} \left\{ (1-b + \right. \\
& + 0,75b^2) \left[ \frac{b \cdot S_5}{(bS_5 - bS_4 + S_4)} - b \right] - (1 - 1,5b +
\end{aligned}$$

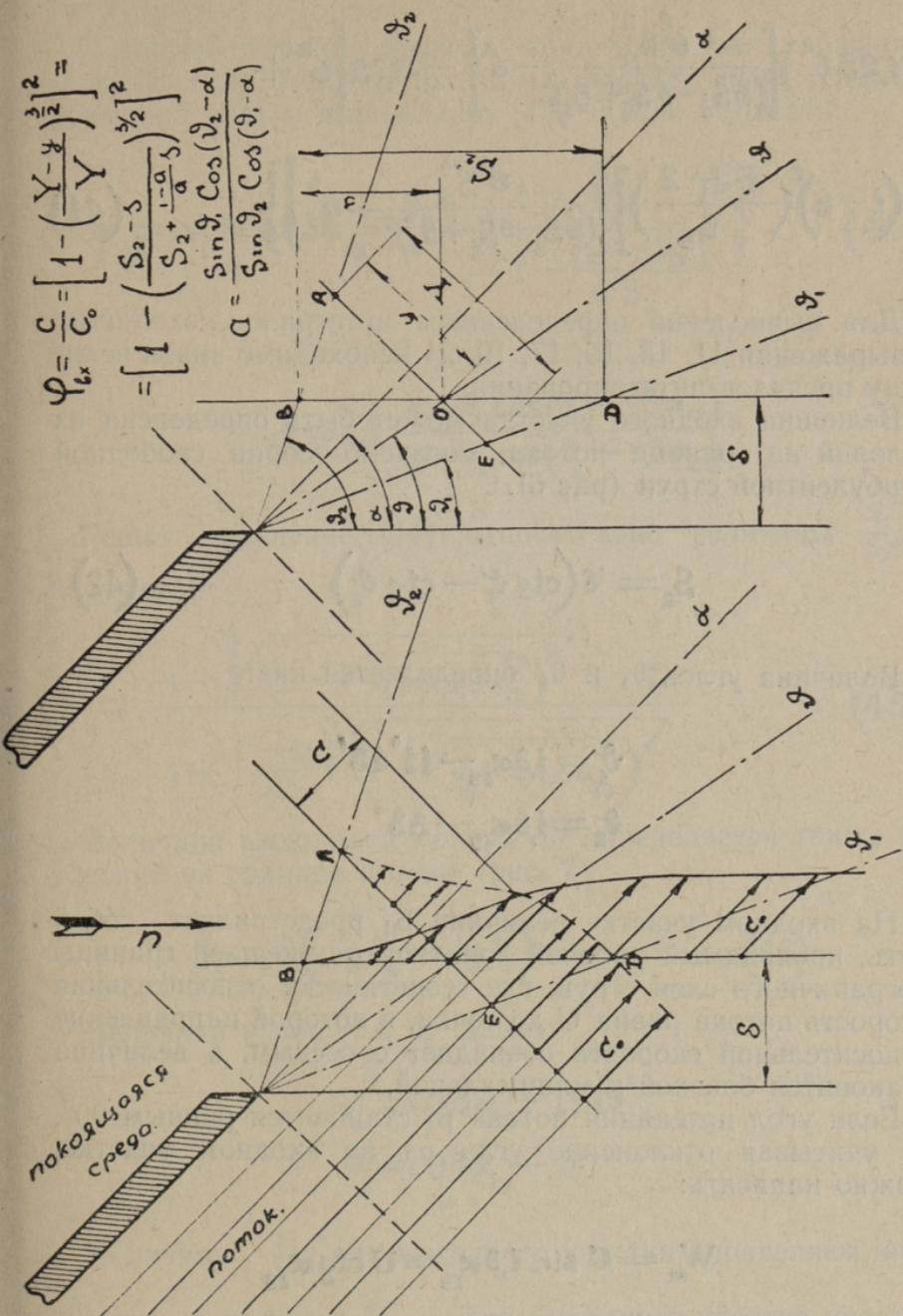


Рис. 6. Схема распределения скоростей в потоке за соплами на входном участке.

$$+1,25b^2) \left[ \frac{b^2 S_5^2}{(bS_5 - bS_4 + S_4)^2} - b^2 \right] - 0,75 \left[ b^2 + \right. \\ \left. + (1-b)^2 \left( \frac{S_{s1} - 2}{S_5} \right) \right] \left[ \frac{b^3 S_5^3}{(bS_5 - bS_4 + S_4)^3} - b^3 \right] \quad (41)$$

Для вычисления определенных интегралов, входящих в выражения 11, 13, 15, 17, 19, 21 необходимо знать величину пределов интегрирования.

Величина входного участка может быть определена из условий на границе потока, согласно теории свободной турбулентной струи (рис 6).

$$S_2 = \delta (\operatorname{ctg} \vartheta_1 - \operatorname{ctg} \vartheta_2) \quad (42)$$

Величина углов  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  определяется как:

$$\vartheta_1 = 1,3\alpha_{13} - 41^\circ 45'$$

$$\vartheta_2 = 1,3\alpha_{13} - 33^\circ$$

На входном участке величина  $S_1$  представляет собой путь, проходимый рабочей лопаткой от внешней границы пограничного слоя струи, где теоретически относительная скорость потока равна  $U$  до точки, в которой направление относительной скорости совпадает с осевым, а величина становится близкой к минимальной.

Если угол натекания потока  $\beta_1$  становится равным  $90^\circ$ , то учитывая отклонение угла  $\alpha_{13}$  на входном участке, можно написать:

$$W_m = C \operatorname{sin} 1,3\alpha_{13} = U \operatorname{ctg} \alpha_{13}$$

и, следовательно,

$$C = U \operatorname{sec} 1,3\alpha_{13} \quad (43)$$

С другой стороны, согласно принятому закону распределения скоростей на входном участке, выраженному формулой (24) и выражению (43) можно написать:

$$\varphi_{\text{вх}} = v_1 \sec 1,3\alpha_{13} = \left\{ 1 - \left[ \frac{1 - \frac{S_1}{S_2}}{1 - \frac{(1-\alpha)S_1}{\alpha S_2}} \right]^{3/2} \right\}^2 \quad (44)$$

где:

$$\alpha = 1,5 \frac{\sin \vartheta_1 \cos(\vartheta_2 - 1,3\alpha_{13})}{\sin \vartheta_2 \cos(\vartheta_1 - 1,3\alpha_{13})}$$

Решая уравнение (44) относительно величины  $\frac{S_1}{S_2}$  получим:

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{1 - \sqrt[3]{(1 - \sqrt{v_1 \sec 1,3\alpha_{13}})^2}}{1 + \frac{1-\alpha}{\alpha} \sqrt[3]{(1 - \sqrt{v_1 \sec 1,3\alpha_{13}})^2}} \quad (45)$$

Величина выходного участка  $S_5$  определяется также из условий на границе потока (рис. 7)

$$S_5 = \delta (\text{ctg} \vartheta_2' - \text{ctg} \vartheta_1') \quad (46)$$

Величина углов  $\vartheta_1'$  и  $\vartheta_2'$  равна:

$$\begin{aligned} \vartheta_1' &= 0,5\alpha_{13} + 11'45'' \\ \vartheta_2' &= 0,5\alpha_{13} - 3'' \end{aligned}$$

Величину  $\frac{S_4}{S_5}$  для выходного участка определяем аналогично величине  $\frac{S_1}{S_2}$ . Для выходного участка уравнение для определения  $\frac{S_4}{S_5}$  с учетом формулы (25) напишется следующим образом:

$$\varphi_{\text{вих}} = \frac{c}{c_0} = \left[ 1 - \left( \frac{y}{Y} \right)^2 \right]^2 =$$

$$= \left[ 1 - \left( \frac{\delta}{b \delta_s + (1-b) \delta} \right)^{3/2} \right]^2$$

$$b = \frac{\sin \vartheta_2 \cos(\vartheta_1 - \alpha)}{\sin \vartheta_1 \cos(\vartheta_2 - \alpha)}$$

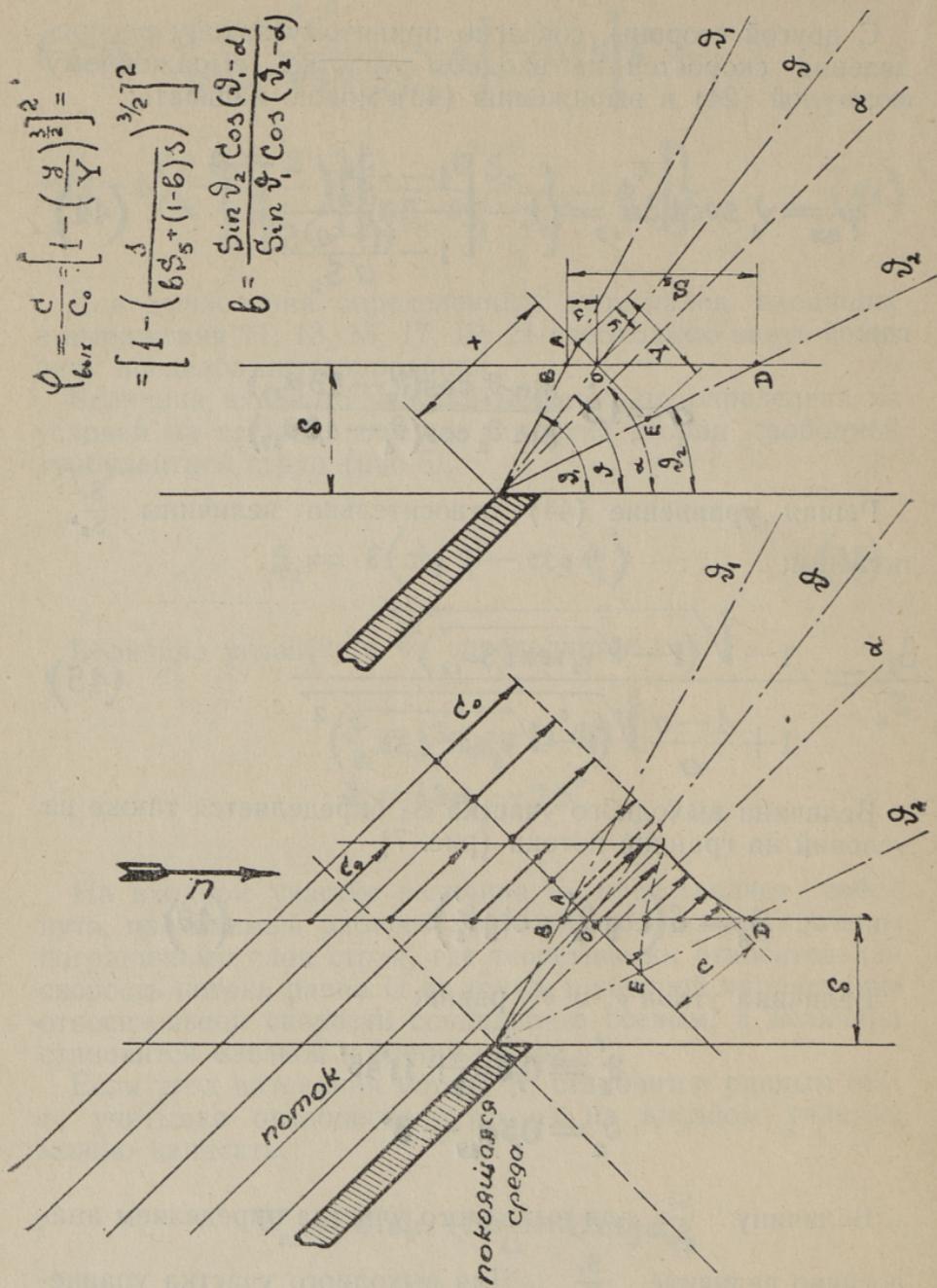


Рис. 7. Схема распределения скоростей в потоке за соплами на выходном участке.

$$\varphi_{\text{вблх}} = v_1 \sec 0,5\alpha_{19} = \left\{ 1 - \left[ \frac{S_4}{S_5} \right]^{3/2} \right\}^2 \quad (47)$$

где:

$$b = 2 \frac{\sin \vartheta_2' \cos(\vartheta_1' - 0,5\alpha_{13})}{\sin \vartheta_1' \cos(\vartheta_2' - 0,5\alpha_{13})}$$

Решая уравнение (47) относительно величины  $\frac{S_4}{S_5}$ , получим:

$$\frac{S_4}{S_5} = \frac{b \sqrt[3]{(1 - \sqrt{v_1 \sec 0,5\alpha_{13}})^2}}{b + (1-b) \sqrt[3]{(1 - \sqrt{v_1 \sec 0,5\alpha_{13}})^2}} \quad (48)$$

Для вычисления работы на центральном участке по формуле (16) нам необходимо знать величину  $(S_3 - S_2)$ . Последняя может быть определена из следующих соображений:

Согласно схеме, приведенной на рис. 5, длина сегмента сопел (геометрическая ширина струи) будет равна:

$$Zt_c - \Delta = \pi D_c \varepsilon - \Delta \quad (49)$$

где  $\Delta$  толщина выходной кромки сопловой лопатки вдоль оси решетки.

В результате отклонения углов выхода потока из крайних в сопловом сегменте сопел, зона воздействия потока на рабочие лопатки будет иной, чем определенная по формуле (49).

Поправка на ширину струи для входного участка будет равна:

$$+ \delta(\operatorname{ctg} \alpha_{13} - \operatorname{ctg} 1,3\alpha_{13})$$

а для выходного участка:

$$+ \delta(\operatorname{ctg} 0,5\alpha_{13} - \operatorname{ctg} \alpha_{13})$$

Кроме того эта зона должна быть уменьшена за счет наличия пограничного слоя на входном участке, где наблюдается резкое искажение поля скорости по сравнению с полем скоростей в ядре потока. На входном участке ядро потока уменьшается за счет пограничного слоя на величину:

$$- \delta(\operatorname{ctg} \vartheta_1 - \operatorname{ctg} \alpha_{13})$$

Суммарная поправка на ширину струи будет равна:

$$+ \delta(\operatorname{ctg} 0,5\alpha_{13} - \operatorname{ctg} \vartheta_1)$$

При этих условиях величина центрального участка будет:

$$S_3 - S_2 \approx \pi D_c \varepsilon + \delta(\operatorname{ctg} 0,5\alpha_{13} - \operatorname{ctg} \vartheta_1) \quad (50)$$

Формула краевых потерь сегмента сопел (2), учитывающая режимные и конструктивные особенности одновенечной регулировочной ступени, на основании произведенных вычислений приводится к виду:

$$\xi = 1 - \frac{L_\varepsilon}{\varepsilon L_{14}} = \frac{K}{\varepsilon D_c} \quad (51)$$

где

$$K \approx 0,0025 \frac{2,5\nu_1^2 + \nu_1 + 1}{1 - (1 - 0,23\nu_1)\nu_1} + \frac{2[1 - (1 - 0,42\nu_1)\nu_1]D\varepsilon}{1 - (1 - 0,23\nu_1)\nu_1} \quad (52)$$

Для приближения расчетов выражение величины  $K$  (формула 52) может быть упрощено и приведено к виду:

$$K \approx 0,0063 \left[ \frac{(0,3 + \nu_1)\nu_1 + 0,4(1 + 2D_c\varepsilon)}{1 - 0,9\nu_1} \right] \quad (53)$$

Окружной кпд парциальной ступени при работе одной группы сопел определяется как:

$$\eta'_u = (1 - \xi_{ki}) \eta_u = \left(1 - \frac{K}{\varepsilon D_c}\right) \eta_u \quad (54)$$

Окружной кпд парциальной ступени при параллельной работе нескольких сопловых групп, удаленных друг от друга, может быть определен по формуле кпд для параллельного соединения:

$$\eta'_u = \eta_u \frac{\sum_1^i L_{\varepsilon i}}{\sum_1^i \varepsilon_i L_u} \quad (55)$$

На основании формул (4) и (51) уравнение (55) приводим к виду:

$$\eta'_u = \eta_u \frac{\sum_1^i (1 - \xi_{ki}) \varepsilon_i L_u}{\sum_1^i \varepsilon_i L_u} = \frac{\sum_1^i (\varepsilon_i - \frac{K}{D_c})}{\sum_1^i \varepsilon_i} \quad (56)$$

Если парциальность включенных сопел равна, сопловые лопатки всех групп одинаковы и группы удалены друг от друга на равное расстояние (звездообразное расположение), то уравнение (56) принимает вид:

$$\eta'_u = \eta_u \frac{i(\varepsilon_i - \frac{K}{D_c}) \varepsilon_i L_u}{i \varepsilon_i} = \eta_u (1 - \xi_{ki}) \quad (57)$$

Здесь:  $i$  — число включенных сопел;

$K_i$  — коэффициент, вычисленный по формуле (52) для  $i$ -ой группы сопел;

$\varepsilon_i$  — парциальность  $i$ -ой группы сопел.

Сопоставление результата расчета краевых потерь по формулам с результатами экспериментального исследова-

ния экономичности одновенечных парциальных ступеней, проведенного в лаборатории турбомашин Невского машиностроительного завода им. Ленина (Л 8,9), и приведенное на рис. 1, указывает на хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных.

Экспериментальная проверка формулы (53) позволяет считать принятые исходные положения правильными, а саму формулу пригодной для практических расчетов.

## ВЫВОДЫ

1. Абсолютная величина краевых потерь зависит от угла выхода потока из сопел, величины закрытого осевого зазора, высоты рабочих лопаток, а также от формы и размеров профиля сечения рабочих лопаток.

2. Абсолютная величина краевых потерь мало зависит от величины парциальности, т. к. величина зоны на краях потока, где наблюдается резкое изменение скорости, не зависит от парциальности.

3. Уменьшение закрытого осевого зазора и увеличение угла выхода потока из сопел приводит к уменьшению краевых потерь.

4. Уменьшение краевых потерь может быть достигнуто применением рабочих лопаток с профилями мало чувствительными к изменению углов атаки, увеличением выходного угла сопла  $\alpha_1$ , предельно возможным уменьшением высот рабочих лопаток и применением лопаток с меньшей полнотой профиля.

5. При одинаковой парциальности включенных групп сопел (удаленных друг от друга) относительная величина краевых потерь не зависит от числа включенных групп.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ackeret. «Die Verwendung von Luft als Untersuchungsmittel Probleme des Dampfturbinenbaues». Escher-Wiss Mitteilungen. Nr. 6 1934.
2. Zalf, G. «Versuche der Skodawerke mit Dampfturbinenbeschaulungen». Die Wärme. 1939.
3. Шейн М. И. «Исследование элементов проточной части паровых турбин методом распределения давлений». Отчет ЦКТИ. 1938.
4. Скнаръ Н. А. и Гукасова Е. А. «Влияние входных и выходных условий на гидродинамику потока в решетках турбинных профилей», Отчет ЦКТИ. 1947.
5. Федяевский К. К. и Белоцерковский К. И. «Аэродинамические силы, действующие на наземные сооружения при шквалах». Известия Академии Наук СССР № 6. 1954.
6. Абрамович Г. Н. «Прикладная газовая динамика», ГИТТЛ. 1953.
7. Кириллов И. И. «Газовые турбины» Машгиз 1948.
8. Дорфман Л. А. «Исследование натуральных ступеней паровых турбин с полным и парциальным подводом». Энергомашиностроение № 10. 1956.
9. Быченков С. А., Зальф Г. А., Звягинцев В. В. «Исследование облопачивания НЗЛ». Энергомашиностроение № 10, 1956.



Н. К. Зиновьев

ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА ВКЛЮЧЕННЫХ ГРУПП СОПЕЛ НА  
ЭКОНОМИЧНОСТЬ ОДНОВЕНЕЧНОЙ РЕГУЛИРОВОЧНОЙ  
СТУПЕНИ СУДОВОЙ ТУРБИНЫ

Таллинский Политехнический Институт

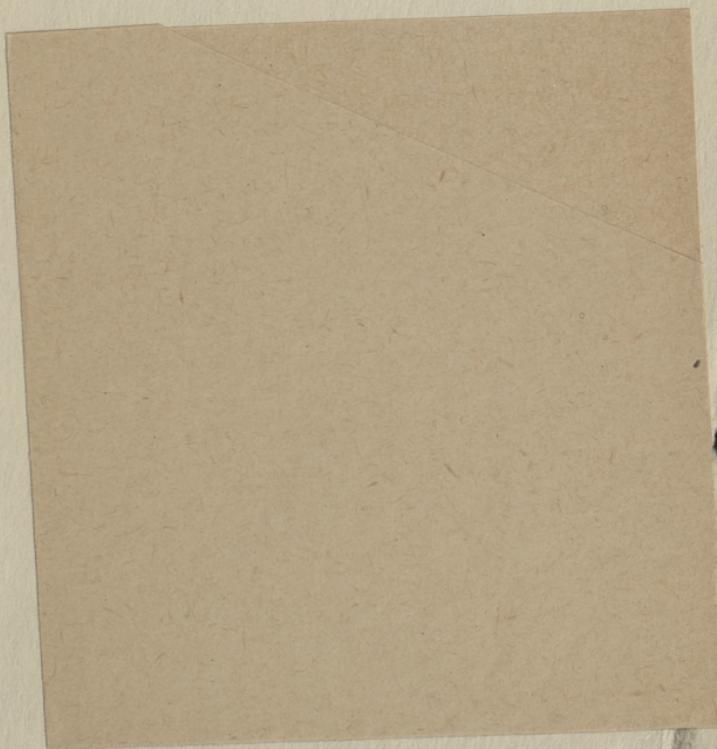
\*

Редактор И. Михельман  
Технический редактор А. Тамм  
Корректор Э. Адман

«Сдано в набор 27 VIII 1958. Подписано к печати 3 X 1958. Бумага  
54×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Печатных листов 2,0. Поформату 60×92 печатных листов  
1,63. Учетно-издательский листовой 0,90. Тираж 800. МВ-07434.  
Заказ № 2626.

Типография «Юхисэлу», Таллин,  
ул. Пикк 40/42.

Цена 65 коп.



Цена 65 коп.