

УДК 621.514

А.А. СОРОКИН<sup>1,2</sup>, М.С. ЦЕПАЕВ<sup>2</sup><sup>1</sup> ОАО «НПО «Сатурн» НТЦ им. А. Люльки, Москва, Россия<sup>2</sup> Московский Авиационный Институт, Москва, Россия

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА С ВЫСОКОНАПОРНОЙ СТУПЕНЬЮ

На Научно-Производственном Объединении «Сатурн» разработана методика оценки и расчета характеристик осевых компрессоров с высоконапорной первой ступенью, позволяющая с высокой достоверностью оценить параметры проектируемого компрессора. Верификация методики проводилась более чем на десяти различных по виду осевых компрессорах. В процессе верификации проведено исследование влияния радиального зазора, шероховатости и раскрутки рабочих лопаток. Разработанная методика позволяет оценить характеристики компрессоров с высоконапорной ступенью с погрешностью до двух процентов.

**Ключевые слова:** расчет, верификация, осевой компрессор, высоконапорная ступень, напорные характеристики.

Для оценки характеристик проектируемого осевого компрессора необходима методика, позволяющая оценить газодинамические параметры спроектированного компрессора с большей достоверностью и небольшим расхождением с экспериментом, чтоб включить дополнительные мероприятия до изготовления материальной части и уменьшения количества дорогостоящих испытаний.

Существенным отличием исследуемого компрессора является наличие первой ширококордной высоконагруженной ступени с  $\pi^* > 2$ . Такая ступень стала новшеством в компрессоростроении, использование данной ступени позволило сократить количество ступеней в компрессоре и показало очень хорошее взаимодействие с ступенями удлинение которых  $h/b > 2$ . Однако использование 2-х и более ступеней показало, сложное согласование их совместной работы, что не позволило сделать высоконагруженный компрессор многорежимным. Поэтому на сегодняшний день компрессора состоят из первой высоконагруженной ступени и 3-6 ступеней с лопатками  $h/b > 2$ .

На НПО «Сатурн» разработана методика оценки и расчета характеристик осевых компрессоров, однако расчетов высоконапорных ступеней в системе компрессора не проводилось.

Верификация методики проводилась более чем на 10 различных по виду осевых компрессорах. По результатам расчетов газодинамические параметры компрессора совпадают с экспериментальными с точностью до 2%.

Расчет характеристик исследуемого компрессора с высоконапорной ступенью с принятыми допущениями, показали значительные расхождения с экспериментом (рис. 1).

Отклонения параметров вычислялись по формулам и представлены в табл. 1:

$$\Delta\pi^* = \frac{\pi_{\text{расч}}^* - \pi_{\text{испыт}}^*}{\pi_{\text{испыт}}^*} \times 100\% ;$$

$$\Delta G = \frac{G_{\text{расч}} - G_{\text{испыт}}}{G_{\text{испыт}}} \times 100\% ;$$

$$\Delta\eta = (\eta_{\text{расч}} - \eta_{\text{испыт}}) \times 100\% .$$

Занижение напорности можно объяснить монтажным радиальным зазором и в итоге занижением рабочей области лопаточного венца расчетной модели. Исключение из расчета радиального зазора по рабочим лопаткам компрессора привело к резкому росту напорности и приросту расхода воздуха. Столь резкое изменение характеристик привело опять же к несовпадению с экспериментом.

Таблица 1

Разница характеристик, полученных при расчёте и в испытаниях

Параметр/Режим	100%	95%	90%	85%
$\Delta\pi_{\text{max}}^*$ , %	-25,8	-22,7	-25,3	-17,6
$\Delta G_{\text{ГТУ}}$ , %	-3,9	-2,0	4,5	9,3
$\Delta G_{\text{max}}$ , %	-2,8	-7,2	-5,5	-7,2
$\Delta\eta_{\text{max}}^*$ , %	-5,3	-7,4	-6,0	-1,0

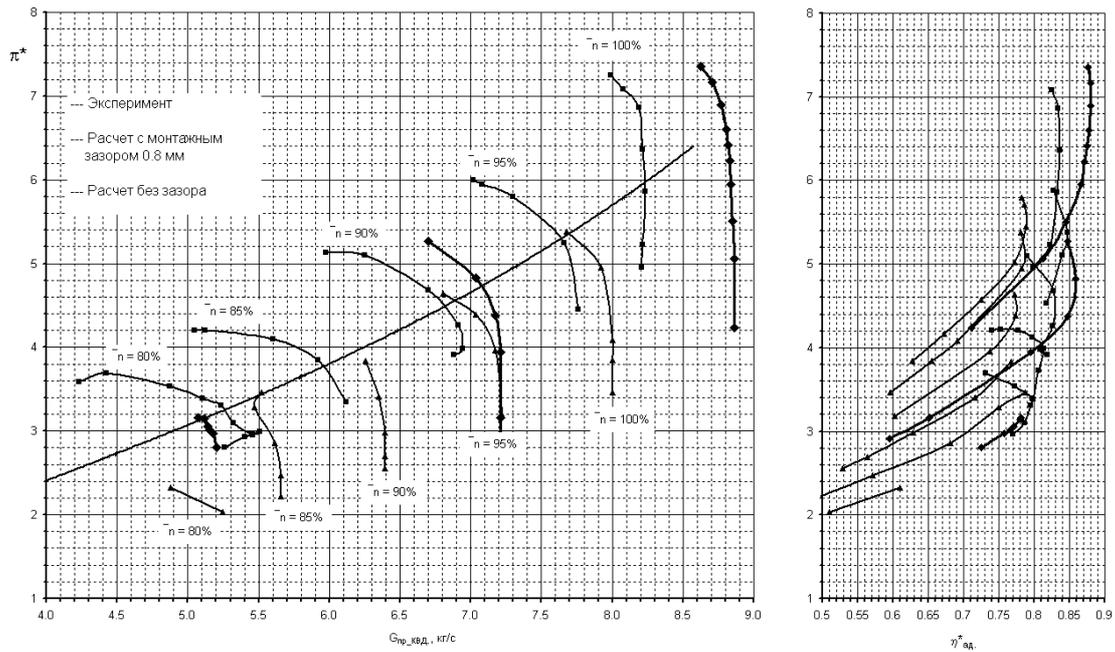


Рис. 1. Экспериментальные напорные характеристики и расчётные с монтажным и нулевым зазором

На рис. 2 и табл. 2, 3 представлен проведенный расчет с 50% и 75% значением радиального зазора от монтажного состояния, он также не дал положительного результата. Тогда как расход воздуха приближается к экспериментальному, напорность компрессора убывает. На режиме  $\bar{n}=1,0$  наиболее близким к эксперименту можно считать расчет с величиной зазора 50% от монтажного состояния. На это указывает характер протекания характеристик и близкие значения  $\pi^*$  и  $\eta^*$ . При этом необходимо отметить, что при изменении радиального зазора в расчете на 0,2 мм (с 50% до 75%) происходит уменьшение степени сжатия на 10,9 %, расхода воздуха на 3,8 % и коэффициента полезного действия на 3,8 %.

Это свидетельствует о значительном влиянии радиального зазора на аэродинамические характеристики КВД в составе установки. На режиме  $\bar{n}=0,9$  с несущественными отклонениями по всем параметрам близким к эксперименту можно также считать расчет с зазором 50%. Расчет с зазором 75% имеет существенный недостаток параметров по расходу воздуха и  $\pi^*$ . Расчет с зазором 0 мм, также как в предыдущем случае, имеет завышенные значения расхода воздуха.

При расчете режима  $\bar{n}=0,8$  с зазором 75% не получено ни одной достоверной расчетной точки из-за невозможности смоделировать устойчивую работу КВД. При зазоре 50% расчет наиболее устойчив, но далек от результатов эксперимента.

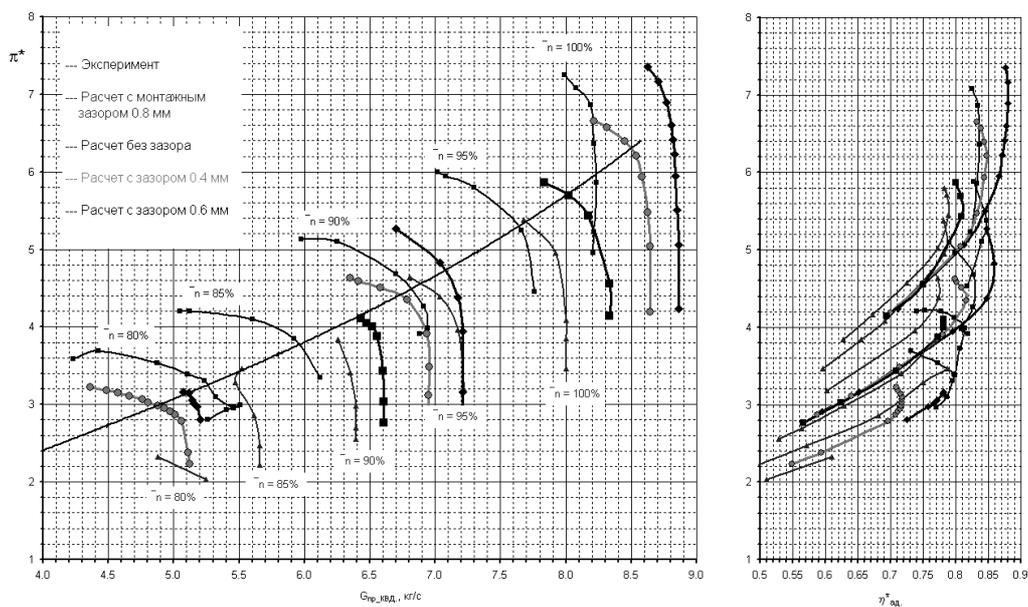


Рис. 2. Экспериментальные напорные характеристики и расчетные с различными радиальными зазорами

Таблица 2

Отклонения от экспериментальных данных на режиме 100%

Параметр / Радиальный зазор	0 мм	50%	75%
$\Delta\pi^*_{\max}, \%$	1,4	-8,2	-19,1
$\Delta G_{ГТУ}, \%$	8,0	2,8	-1,9
$\Delta G_{\max}, \%$	7,7	5,0	1,2
$\Delta\eta^*_{\max}, \%$	4,3	1,1	-2,7

Таблица 3

Отклонения от экспериментальных данных на режиме 90%

Параметр / Радиальный зазор	0 мм	50%	75%
$\Delta\pi^*_{\max}, \%$	2,7	-9,8	-19,9
$\Delta G_{ГТУ}, \%$	12,2	6,3	7,7
$\Delta G_{\max}, \%$	3,8	0,2	-4,9
$\Delta\eta^*_{\max}, \%$	3,2	-1,1	-4,6

Расчет с зазором 0 мм слабо устойчив. Проблемы в расчете режима  $\bar{p}=0,8$  (табл. 4), возможно, вызваны тем, что не моделируются щелевые проставки над РК1 и отборы воздуха за НА2, НА3 и за РК5.

Проведенная отдельно верификация ступени, позволит определить допущения и включить их отдельно для данной ступени. Исследование проводилось на ступенях К8-Б, К8-Г и К6-В. Расчет без учета радиального зазора также показал огромное завышение напорности ступени, однако остальные параметры были близки к экспериментальным (рис.3).

Таблица 4

Отклонения от экспериментальных данных на режиме 80%

Параметр / Радиальный зазор	0 мм	50%
$\Delta\pi^*_{\max}, \%$	-14,4	-12,7
$\Delta G_{ГДУ}, \%$	14,7	-1,3
$\Delta G_{\max}, \%$	-4,7	-6,2
$\Delta\eta^*_{\max}, \%$	-1,7	-8,0

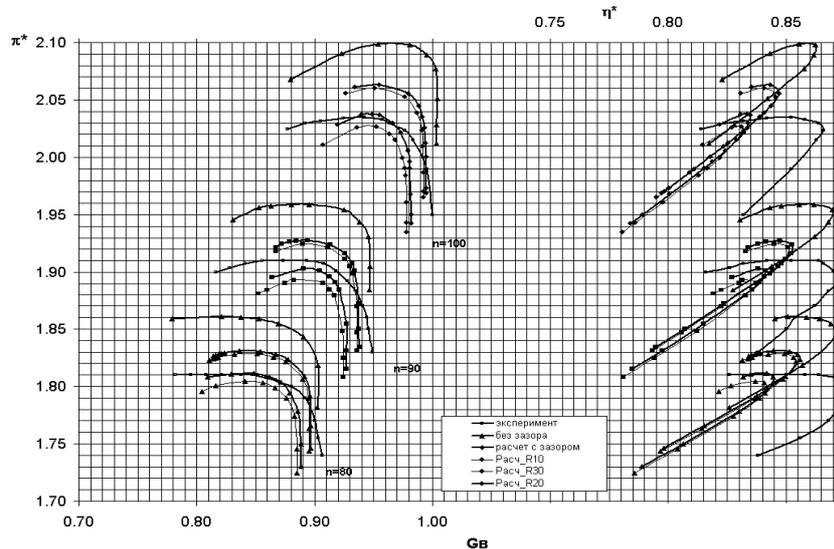


Рис. 3. Напорные характеристики эксперимента и верификационных расчётов ступени

Включение радиального зазора в расчет показало уменьшение напорности, однако при этом упал расход воздуха и КПД, вследствие выявления перетекания в периферийной зоне пера лопатки. Дополнительный учет шероховатости ступени еще приблизил к экспериментальным значениям. Также можно ввести удлинение лопатки, учет вытяжки дисков и раскрутки лопатки от газодинамических и

центробежных сил, однако это слишком трудоемко и для первичного анализа характеристики компрессора будет неприемлемо. Проведенные исследования ступени показали, что для высоконапорной ступени включение радиального зазора необходимо и дает увеличение сходимости с экспериментом в 3 раза, с небольшим падением КПД, которое можно впоследствии учесть. Проведенный расчет осевого

компрессора с новыми допущениями (рис. 4) показал совпадение до 2%, что гораздо больше первоначальных результатов. На данном этапе достовер-

ность расчета и эксперимента в 2% считается достаточной. Методику расчета рекомендуется проверить на аналогичных компрессорах.

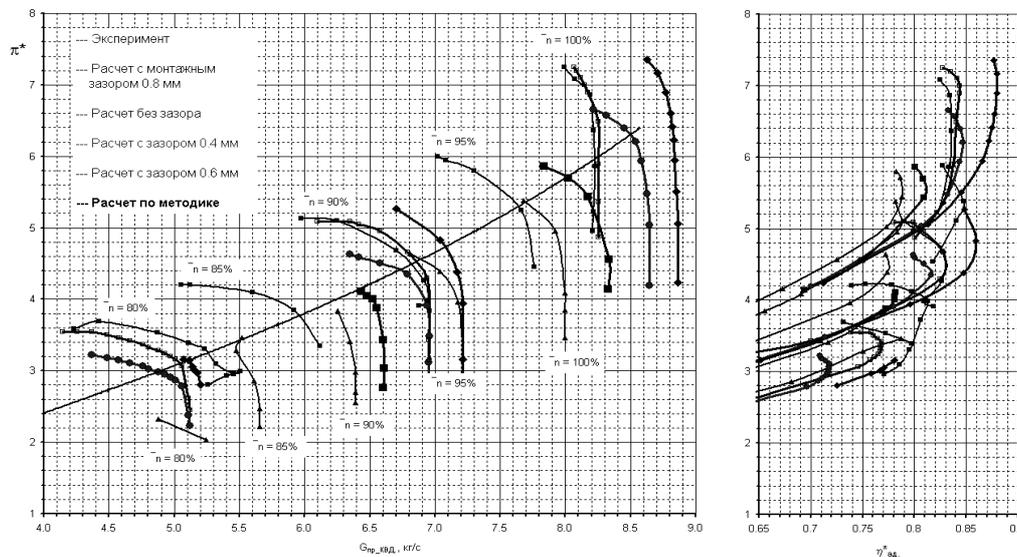


Рис. 4. Экспериментальные напорные характеристики и результаты расчётов с зазорами и по методике

Поступила в редакцию 29.05.2009

**Рецензент:** канд. техн. наук, доцент кафедры «Теория воздушно-реактивных двигателей» Л.Л. Картовицкий, Московский авиационный институт (государственный технический университет), Москва, Россия

### МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОСЬОВОГО КОМПРЕСОРА З ВИСОКОНАПІРНИМ СТУПЕНЕМ

*А.А. Сорокін, М.С. Цепяєв*

На Науково-виробничому Об'єднанні «Сатурн» розроблена методика оцінки і розрахунку характеристик осьових компресорів з високонапірним першим ступенем, яка дозволяє з високою достовірністю оцінити параметри проєктованого компресора. Верифікація методики проводилася більш ніж на десяти різних по вигляду осьових компресорах. В процесі верифікації проведено дослідження впливу радіального зазору, шорсткості і розкручування робочих лопаток. Розроблена методика дозволяє оцінити характеристики компресорів з високонапірним ступенем з погрешністю до двох відсотків.

**Ключові слова:** розрахунок, верифікація, осьовий компресор, високонапірний ступінь, напірні характеристики.

### METHODS OF ESTIMATION AND CALCULATION OF THE PERFORMANCE AXIAL COMPRESSOR WITH HIGH PRESSURE BY FIRST STAGE.

*A.A. Sorokin, M.S. Tsepayev*

On Association "Saturn" is designed methods of the estimation and calculation of the performance axial compressor with high pressure by first stage, allowing with high validity to value the parameters of the designed compressor. Verification of the methods was conducted more then on ten different on type axial compressor. In process of verification is organized researching of the influence of the radial clearance, roughness and lengthening blades. The designed methods allows to value the features a compressor with high pressure by step with inaccuracy before two percents.

**Key words:** calculation, verification, axial compressor, high pressure stage, pressure performance.

**Сорокин Андрей Артурович** – Начальник сектора Систем Инженерного Анализа ОАО «НПО «Сатурн» НТЦ им. А. Люльки»; Аспирант кафедры «Теория воздушно-реактивных двигателей», Московский авиационный институт (государственный технический университет), Москва, Россия, e-mail: andrey.sorokin@ntc.npo-saturn.ru.

**Цепяев Михаил Сергеевич** – аспирант кафедры «Теория воздушно-реактивных двигателей», Московский авиационный институт (государственный технический университет), Москва, Россия.