

## Исследование влияния отбора воздуха на параметры центробежной компрессорной ступени

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»*

Представлены результаты численного исследования влияния отбора рабочего тела из проточной части центробежной компрессорной ступени на ее термогазодинамические характеристики. Приведены суммарные характеристики рабочего колеса и ступени, радиальные распределения параметров потока на входе в рабочее колесо при различных величинах расхода отбираемого воздуха. Рассмотрена структура двумерного течения внутри рабочего колеса вблизи области отбора. Проведен анализ влияния изменения расхода отбираемого рабочего тела и расположения мест отбора на параметры потока и суммарные характеристики исследуемой ступени. Все расчеты выполнены с помощью программного комплекса AxSvm.

**Ключевые слова:** центробежная компрессорная ступень, метод расчета осесимметричного течения, отбор воздуха, суммарные характеристики, структура течения

### 1. Введение и постановка проблемы

В составе компрессоров современных газотурбинных двигателей (ГТД) и установок различного назначения достаточно широко используются высоконапорные центробежные компрессорные ступени. Эффективность их работы зависит от многих факторов. Одним из важных факторов является отбор воздуха из проточной части на различные нужды, такие, как охлаждение "горячей" части двигателя, наддув топливных баков, система кондиционирования и т. п.

Отбор воздуха из проточной части ступени компрессора оказывает существенное влияние на структуру течения, что приводит к изменению ее суммарных характеристик. Это определяет целесообразность учета отбора рабочего тела из проточной части центробежной ступени еще на стадии ее проектирования.

Возможность в численном эксперименте определить влияние расхода отбираемого воздуха на параметры потока и суммарные характеристики центробежной компрессорной ступени, оценить его допустимые значения, а также рациональное расположение мест отбора имеет важное практическое значение.

Этот вопрос остается актуальным как для осевых, так и центробежных компрессоров ГТД. В открытой печати работы по экспериментальным исследованиям влияния отбора воздуха из проточной части компрессора на его характеристики представлены достаточно редко. Вопросы численного анализа течения в многоступенчатых осевых компрессорах и влияния на их характеристики отбора (перепуска) воздуха в широком диапазоне режимов работ отражены в трудах [1, 2 и др.]. Исследование отбора в центробежных компрессорных ступенях зачастую ограничивается вопросами устойчивости [3, 4 и др.].

В данной статье рассмотрены вопросы, связанные с отбором воздуха, и приведены результаты расчетного исследования влияния изменения расхода отбираемого рабочего тела и расположения мест отбора в проточной части на параметры центробежной ступени, выполненные с помощью двумерного метода расчета.

## 2. Моделирование течения в центробежной ступени с учетом отбора воздуха

Моделирование течения в центробежной компрессорной ступени с учетом отбора рабочего тела из проточной части проведено с помощью разработанного в Проблемной научно-исследовательской лаборатории газотурбинных двигателей и установок Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского "ХАИ" программного комплекса (ПК) *АхСВт*, в котором реализован метод расчета до- и трансзвуковых течений в центробежных компрессорных ступенях [5, 6]. Данный метод позволяет определять структуру осредненного в окружном направлении течения и суммарные характеристики центробежных компрессорных ступеней с осерадиальными пространственными лопатками рабочих колес.

Особенностью данного метода расчета является возможность учета влияния отбора рабочего тела из проточной части ступени. Это дает возможность осуществлять оценку влияния изменения величины расхода отбираемого воздуха и расположения мест отбора на суммарные характеристики ступени и поля параметров потока в ней.

ПК *АхСВт* позволяет проводить моделирование течения в центробежной компрессорной ступени при наличии нескольких отборов в разных местах, как со стороны периферии, так и со стороны втулочной поверхности проточной части.

Для моделирования отбора воздуха при постановке граничных условий на ограничивающих проточную часть поверхностях в области отбора вместо условия непротекания вводится полиномиальная зависимость, которая описывает изменение значения функции тока  $\psi$ . На рис. 1 показано изменение функции тока, позволяющее учесть влияние отбора на периферии вдоль длины проточной части  $\bar{l}$ :

$$\begin{aligned} \text{на участке } AB & \quad \psi = \psi_{\text{пер}}, \\ \text{на участке } CD & \quad \psi = \psi_{\text{пер}} - \Delta\psi_{\text{отб}}, \end{aligned}$$

где  $\Delta\psi_{\text{отб}}$  – величина изменения функции тока, определяемая отбором воздуха.

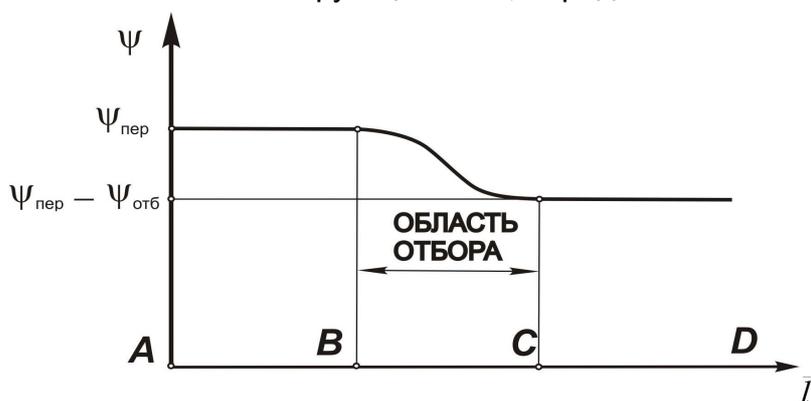


Рис. 1. Задание граничных условий с учетом отбора рабочего тела

Коэффициенты полинома определяются из условия равенства соответствующих значений функции  $\psi$  на границах области отбора слева и справа от точек B и C:

$$\psi_{B-} = \psi_{B+} \quad \text{и} \quad \psi_{C-} = \psi_{C+},$$

а также равенства нулю ее первых производных вдоль меридионального обвода

ступени:

$$\psi'_{B-} = \psi'_{B+} = \psi'_{C-} = \psi'_{C+} = 0.$$

При наличии нескольких зон отбора граничные условия ставятся аналогично.

Отбор воздуха оказывает существенное влияние на интегральные параметры ступени. Изэнтропический КПД ступени, посчитанный по заторможенным параметрам потока, определяется с помощью зависимости, учитывающей затраты мощности на сжатие отбираемого воздуха:

$$\eta_{ст\ отб}^* = \frac{\eta_{ст}^*}{1 + \sum_{i=1}^n \left( \frac{\Delta \bar{G}_i}{1 - \Delta \bar{G}_i} \cdot \frac{T_{отб\ i}^* - T_{\epsilon}^*}{T_{\kappa}^* - T_{\epsilon}^*} \right)},$$

где  $n$  – количество областей отбора воздуха;

$\eta_{ст}^*$  – изэнтропический КПД ступени без учета отбора;

$\Delta \bar{G}$  – относительный расход отбираемого воздуха,  $\Delta \bar{G} = \frac{\Delta G}{G_{\epsilon}}$ ;

$G_{\epsilon}$  – расход воздуха на входе в ступень;

$T_{\kappa}^*$  – полная температура на выходе из ступени;

$T_{\epsilon}^*$  – полная температура на входе в ступень;

$T_{отб}^*$  – полная температура в точке О области отбора.

На рис. 2 показаны линии тока в проточной части рабочего колеса центробежной ступени, на периферии которого осуществляется отбор рабочего тела. В зоне отбора заметна деформация линий тока, и замыкание их на периферию, где часть воздуха уходит из проточной части.

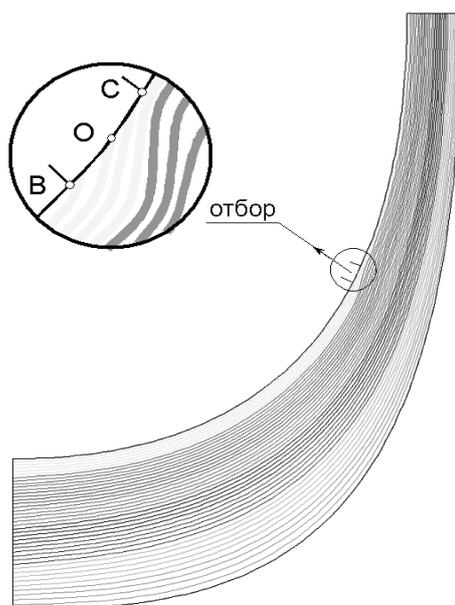


Рис. 2. Линии тока в рабочем колесе при наличии отбора рабочего тела на периферии

## 2. Влияние отбора воздуха на структуру течения и суммарные характеристики ступени

Влияние отбора рабочего тела рассмотрено на примере течения в центробежной компрессорной ступени авиационного ГТД.

Расчеты выполнены при стандартных атмосферных условиях на входе на расчетной приведенной частоте вращения ( $\bar{n}_{np} = 1,0$ ); распределения параметров потока на входе в расчетную область приняты равномерными.

На рис. 3 представлены суммарные характеристики рабочего колеса при отсутствии и наличии отбора воздуха (3 % и 6 % от расхода на входе в ступень).

Все суммарные характеристики, приведенные в статье, безразмерные и даны в виде зависимостей  $\bar{\pi}^*$ ,  $\bar{\eta}^*$  от  $\bar{G}_{внр}$ . Значения параметров отнесены к соответствующим опытным данным на расчетном режиме ступени  $\pi_{стр}^*$  и  $\eta_{стр}^*$ :

$$\bar{G}_{внр} = \frac{G_{внр}}{G_{внрр}}, \quad \bar{\pi}^* = \frac{\pi^*}{\pi_{стр}^*}, \quad \bar{\eta}^* = \frac{\eta^*}{\eta_{стр}^*}.$$

При работе ступени с постоянно действующим отбором увеличивается количество воздуха, поступающего на вход, что приводит к смещению суммарной характеристики, построенной в зависимости от расхода на входе, в область больших расходов и снижению изоэнтальпического КПД колеса, рассчитанного с учетом затрат мощности на сжатие отбираемого воздуха (обозначен сплошными линиями на рис. 3, штриховыми линиями – без этого учета). Отсутствие учета отбора воздуха вносит существенные погрешности при определении характеристик ступени

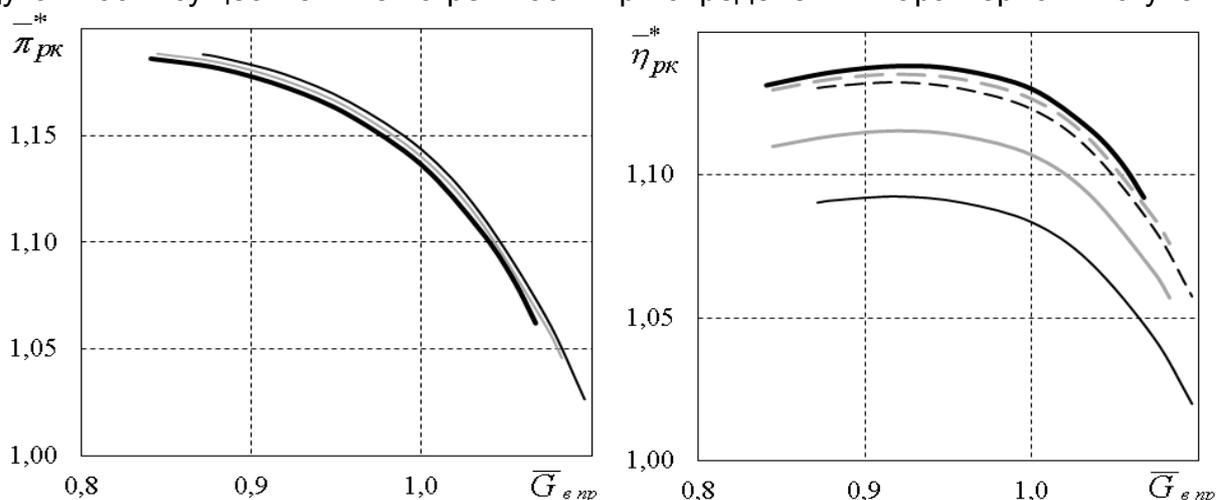


Рис. 3 Влияние расхода отбираемого воздуха на характеристики рабочего колеса

- — без отбора  $\Delta\bar{G} = 0\%$ ;
- - - с отбором  $\Delta\bar{G} = 3\%$ ;
- · - с отбором  $\Delta\bar{G} = 6\%$ ;
- - - - с отбором  $\Delta\bar{G} = 3\%$ , расчет КПД без учета отбора;
- · - · с отбором  $\Delta\bar{G} = 6\%$ , расчет КПД без учета отбора

и ее элементов. Чем больше величина расхода отбираемого воздуха, тем сильнее наблюдаемое расслоение характеристик.

Кроме того, наличие отбора существенно изменяет структуру течения в ступени. Распределения меридиональной составляющей скорости  $W_m$  по высоте канала вблизи области отбора представлены на рис. 4. Непосредственно перед областью отбора воздуха вблизи периферии (точка В, на рис. 2) наблюдается ускорение потока. Далее поток начинает тормозиться (точки О и С). При этом, чем большее количество воздуха отбирается, тем сильнее проявляются названные явления.

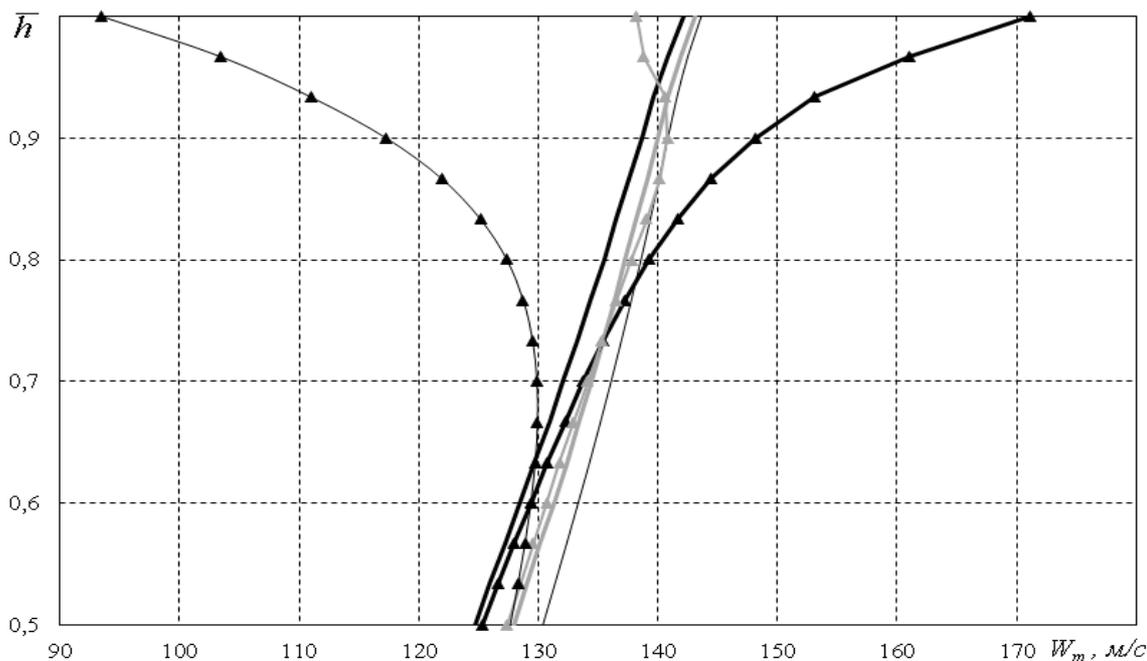


Рис. 4. Влияние отбора воздуха на распределения меридиональной составляющей скорости  $W_m$  по высоте канала вдоль проточной части при наличии отбора (линия с маркером) и без него (линия без маркера):

— — точка В; — — точка О; — — точка С

Следует отметить, что влияние отбора заметно не только вблизи области отбора в периферийных сечениях, но и на достаточно большой протяженности по высоте лопатки.

Это подтверждают и приведенные на рис. 5 распределения меридиональной составляющей скорости  $W_m$  вдоль продольных  $\xi$ -линий расчетной сетки вблизи втулочной ( $\bar{h} = 0$ ) и периферийной поверхностей ( $\bar{h} = 1,0$ ), а также в среднем сечении ( $\bar{h} = 0,5$ ) проточной части при наличии отбора и без него. Для данной ступени на рассматриваемом режиме по расходу влияние отбора рабочего тела проявляется на расстоянии, соизмеримом с высотой канала, в направлении, противоположном течению. Величина скорости  $W_m$  возрастает и достигает своего максимума в начале этой области. Далее на этом участке меридиональная скорость течения уменьшается. За областью отбора на расстоянии половины высоты канала его влияние снижается (см. рис. 5) и поток выравнивается, при этом пониженный уровень скоростей сохраняется до сечения выхода из межлопаточного канала рабочего колеса. Следует отметить, что для рассмотренных величин рас-

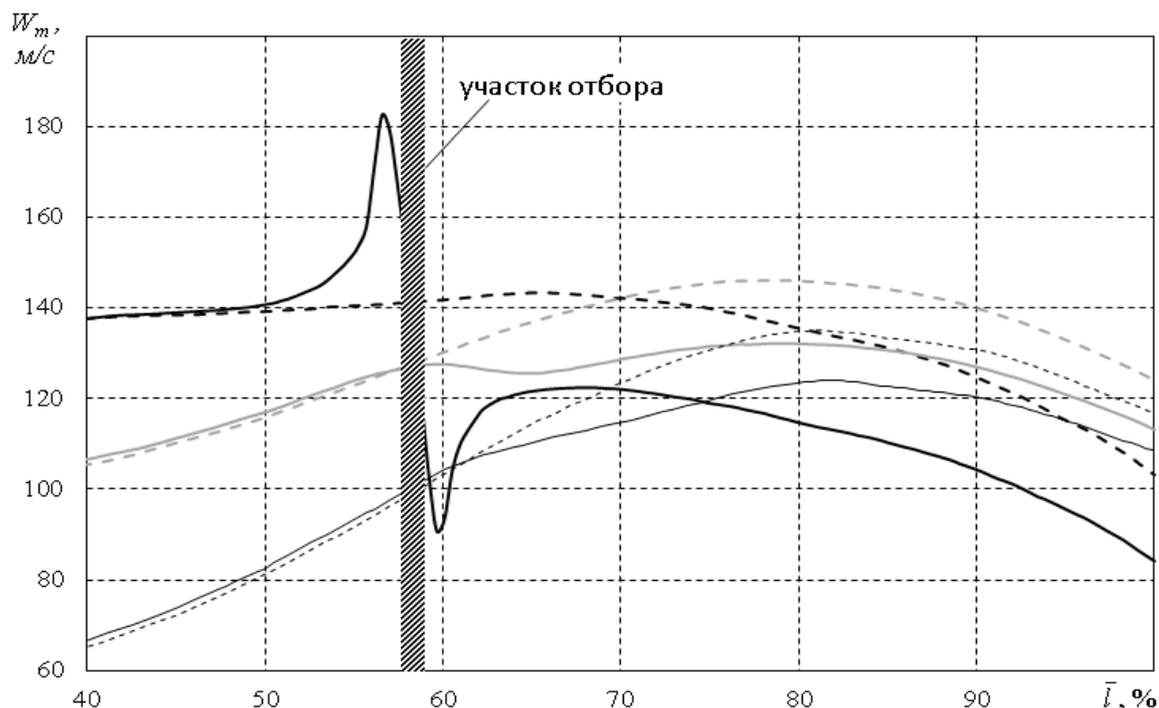


Рис. 5. Распределения меридиональной составляющей скорости  $W_m$  вдоль продольных линий сетки при наличии отбора (сплошная) и без него (пунктирная):

— —  $\bar{h} = 0$ ; — — — —  $\bar{h} = 0,5$ ; — — — — —  $\bar{h} = 1$

хода отбираемого воздуха  $\Delta \bar{G}$  влияние отбора распространяется в поперечном направлении на половину высоты проточной части. Во втулочном сечении такое влияние начинает сказываться уже после области отбора.

На основании представленных результатов можно сделать вывод о том, что отбор воздуха существенно сказывается на структуре течения и суммарных характеристиках ступени. Отсутствие его учета при определении КПД приводит к значительным погрешностям.

На следующем этапе исследований рассмотрено влияние расположения места отбора на структуру течения и суммарные характеристики центробежной ступени.

Так, в процессе численного моделирования течения в рассматриваемой ступени ЦБК варьировалось расположение места отбора воздуха из проточной части на периферии рабочего колеса, соответствующая схема приведена на рис. 6. Место отбора смещалось как ко входу в РК (вариант 2), так и к выходу из РК (вариант 3) по сравнению с рассмотренной ранее модификацией, (вариант 1, см. рис. 2). Соответствующая схема приведена на рис. 6. Величина расхода отбираемого воздуха для всех вариантов принята постоянной и равной  $\Delta \bar{G} = 6\%$ .

На рис. 7 показаны значения изоэнтропического КПД ступени на "расчетном" режиме для трех указанных выше вариантов расположения точек отбора и уровень КПД без отбора. Значения КПД на рисунке представлены в виде отношения величины КПД ступени с отбором к соответствующему значению КПД без отбора. Очевидно, что чем ближе к выходу из рабочего колеса расположена точка отбора, тем меньшее значение КПД ступени будет получено, что объясняется увеличением мощности, затраченной на повышение давления отобранного рабо-

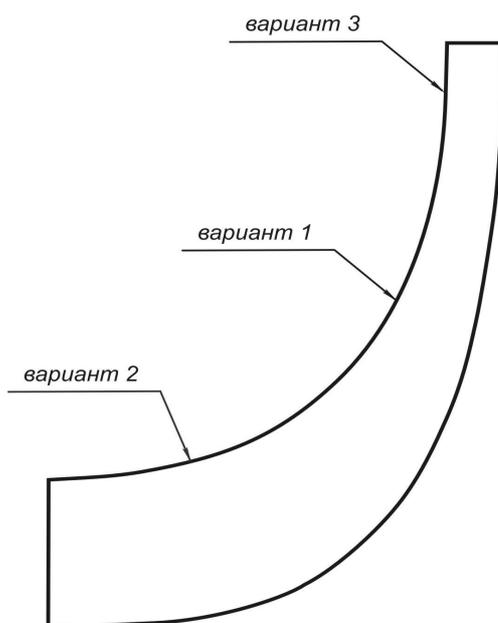


Рис. 6. Схема смещения положения точки отбора

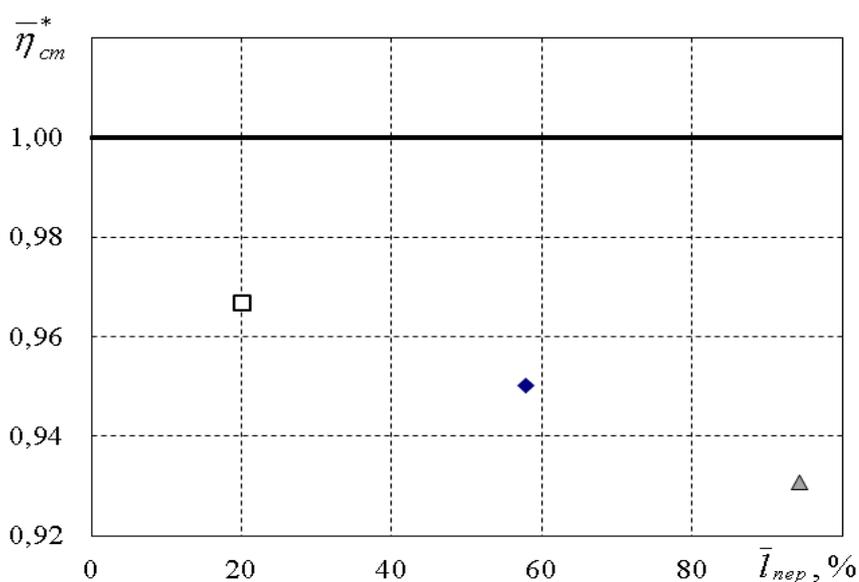


Рис. 7. Безразмерные значения КПД ступени на "расчетном" режиме в зависимости от положения  $\bar{l}_{пер}$  точки отбора воздуха вдоль меридионального обвода проточной части:

- — вариант без отбора;
- ◆ — вариант 1;
- — вариант 2;
- ▲ — вариант 3

чего тела. Проведенные расчеты дали возможность получить соответствующую количественную оценку.

Далее исследован вариант ступени, в которой отбор воздуха осуществлен перед рабочим колесом на периферии. На рис. 8 приведена схема такой ступени.

Величина расхода отбираемого воздуха  $\overline{\Delta G} = 5\%$ .

Результаты расчета суммарных характеристик данного варианта ступени представлены на рис. 9. Наличие отбора обуславливает смещение суммарных характеристик ступени в область больших расходов и весьма существенное изменение структуры течения на входе.

На рис. 10 показано радиальное распределение меридиональной составляющей абсолютной скорости на входе в рабочее колесо  $V_{m1}$  и углов натекания  $i_1 = \beta_{1,l} - \beta_1$  по высоте лопатки РК на режимах с отбором и без отбора воздуха. Как видно из этого рисунка, при наличии отбора на периферии рабочего колеса на исследуемом режиме угол натекания потока резко возрастает и достигает 8,5 град.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что наличие отбора перед рабочим колесом и смещение суммарных характеристик в область боль-

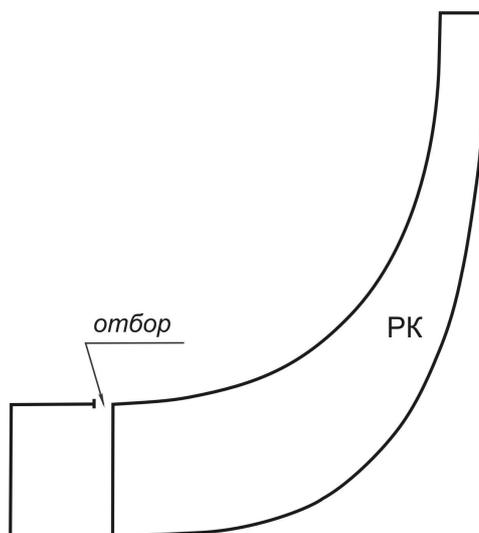


Рис. 8. Схема расположения области отбора

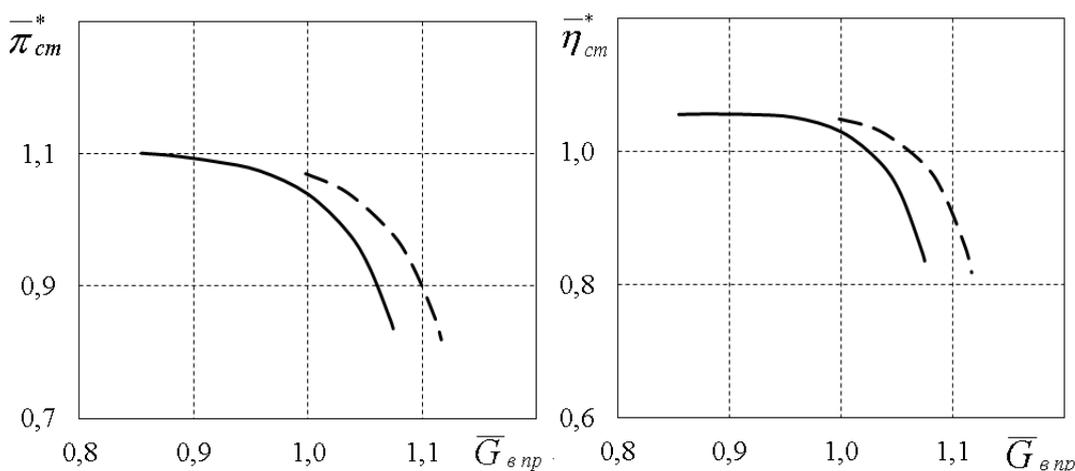


Рис. 9. Влияние отбора воздуха перед рабочим колесом на суммарные характеристики ступени:

— — без отбора  $\overline{\Delta G} = 0\%$ ,

- - - с отбором перед рабочим колесом  $\overline{\Delta G} = 5\%$

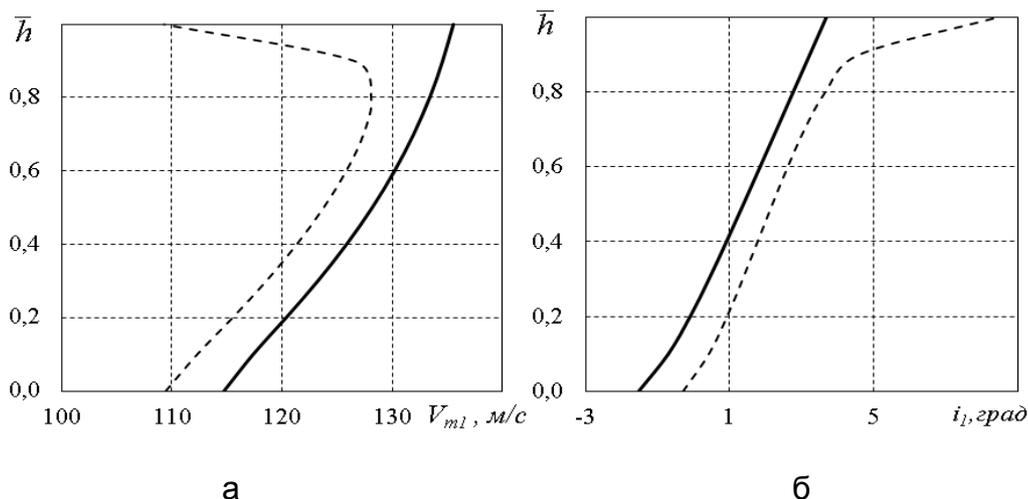


Рис. 10. Влияние отбора воздуха перед рабочим колесом на структуру течения

— — без отбора  $\Delta G = 0\%$ ;

- - - с отбором перед рабочим колесом  $\Delta G = 5\%$

ших расходов приводит к появлению больших положительных углов натекания в этой области и может быть причиной возникновения срывных явлений и сужения рабочего диапазона ступени.

### 3. Заключение

В статье представлены результаты расчетных исследований влияния расхода отбираемого из проточной части центробежной компрессорной ступени воздуха на структуру течения и ее суммарные характеристики. Полученные результаты обосновывают необходимость учета отбора рабочего тела еще на стадии проектирования центробежной ступени компрессора.

Проведенные с помощью программного комплекса *AxCBM* расчетные исследования течения в центробежной ступени компрессора авиационного двигателя позволяют получить количественную оценку влияния данного явления, дополнив тем самым результаты экспериментальных исследований. Данный комплекс дает возможность прогнозировать влияние расхода отбираемого воздуха и расположения мест отбора на структуру течения и суммарные характеристики в процессе проектирования и доводки центробежной компрессорной ступени.

### Список литературы

1. Горячкин, Е. С. Моделирование рабочего процесса трехступенчатого компрессора низкого давления газотурбинного двигателя [Текст] / Е. С. Горячкин, Г. М. Попов, В. Н. Матвеев // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2014.- № 8 (115). – С. 61—65.

2. Расчетное исследование течения в многоступенчатом осевом компрессоре приводного турбовального ГТД на пониженных режимах [Текст] / Л. Г. Бойко, А. Е. Дёмин, О. Д. Дегтярёв, Ю. Ф. Ахтёменко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2014.- № 6 (13). – С. 63—69.

3. Dai, S. M. Numeric simulation of inducer shroud bleeding effect on centrifugal compressor performance [Text] / S. M. Dai // *Journal of Aerospace Power*. – 2005. –

Vol. 20 – P. 125—129.

4. Leishman, B. A. Effects of Bleed Rate and Endwall Location on the Aerodynamic Behavior of a Circular Hole Bleed Off-Take [Text] / B. A. Leishman, N. A. Cumpsty, J. D. Denton // ASME Journal of Turbomachinery. – 2007. – Vol. 129. – P. 645—658.

5. Барышева, Е. С. Метод расчета течения в центробежных компрессорах с осерадиальными пространственными лопатками [Текст] /Е. С. Барышева, Л. Г. Бойко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007.- № 1 (37). – С. 45—51.

6. Бойко, Л. Г. Исследование структуры течения и суммарных характеристик центробежной компрессорной ступени с осерадиальными лопатками [Текст] / Л. Г. Бойко, Е. С. Барышева // Тяжелое машиностроение – 2010.- № 3 – С. 6—10.

Поступила в редакцию 20.05.2015

### **Дослідження впливу відбору повітря на параметри відцентрового компресорного ступеня**

Подано результати числового дослідження впливу відбору робочого тіла з проточної частини відцентрового компресорного ступеня на його термогазодинамічні характеристики. Наведено сумарні характеристики робочого колеса і ступеня, радіальний розподіл параметрів течії на вході до робочого колеса при різній кількості втрат повітря, що відбирається. Розглянуто структуру двовимірної течії в робочому колесі ступеня поблизу області відбору. Проведено аналіз впливу змінення втрат робочого тіла, що відбирається, і розташування місць відбору на параметри течії та сумарні характеристики досліджуваного ступеня. Усі розрахунки виконано за допомогою програмного комплексу AxCBm.

**Ключові слова:** відцентровий компресорний ступінь, метод розрахунку осесиметричної течії, відбір повітря, сумарні характеристики, структура течії.

### **Investigation of the Air Bleed Influence on the Centrifugal Compressor Stage Parameters**

The numerical investigation results of the air bleeding from the flow of centrifugal compressor stage running influence at its thermogas dynamics performances. The summary characteristics of the impeller and the stage are presented. The radial distributions of the flow at the inlet of the impeller at various bleed air flow are shown. The structure of two-dimensional flow inside the impeller near the air bleeding area was considered. The influence of bleeding air flow rate changing and bleed location on the flow parameters and summary characteristics of the study stage was analyzed. All calculations were performed using the original software package AxCBm.

**Keywords:** centrifugal compressor stage, checking calculation method of axisymmetric flow, bleed air, overall characteristics, flow structure.