

УДК 621.165

В.Н. ГОЛОЩАПОВ\*, канд. техн. наук, В.И. КАСИЛОВ\*\*, канд. техн. наук,  
А.Ю. КОЗЛОКОВ\*\*\*, инженер

\* *Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины,  
г. Харьков, Украина*

\*\* *Национальный технический университет «Харьковский политехнический  
институт», г. Харьков, Украина*

\*\*\* *ОАО Харьковская ТЭЦ-5, г. Харьков, Украина*

### ТОЧКА ПОЯВЛЕНИЯ ПРИВТУЛОЧНОГО ОТРЫВА ЗА НАПРАВЛЯЮЩИМ АППАРАТОМ ТУРБИНОЙ СТУПЕНИ

У статті розглянуто визначення точки початку відриву від втулки потоку, що крутиться, за направляючими апаратами турбінних ступенів.

The estimation of the hub flow separation point behind the turbine nozzle cascade is proposed.

Уменьшение отношения  $d_{cp}/l$  в турбинных ступенях привело к появлению в них отрывных явлений, причина которых – неустойчивость вращающегося потока за лопаточным аппаратом. Поток рабочего тела, в направляющем аппарате (НА) переходит от осевого (всегда устойчивого) течения перед ним, ускоряясь в лопаточных каналах под действием перепада давлений, к неустойчивому, вращающемуся в пространстве за НА.

Вращающийся поток под действием неуравновешенных центробежных сил перемещается к внешней поверхности, формируя область привтулочного отрыва. Перемещение потока в радиальном направлении продолжается до тех пор, пока он не приобретёт устойчивую форму течения, при которой распределение статического давления будет соответствовать условию упрощённого радиального равновесия.

Развитие привтулочного отрыва характеризуется положением линии  $\bar{G}_0 = 0$ , которая в плоскости меридионального сечения НА начинается от точки «А» отрыва потока от втулки (рис. 1) и достигает максимального удаления от втулки в переходном сечении  $V$ .

Отсутствие втулки за НА практически не влияет на положение области привтулочного отрыва и слабо влияет на положение линии  $\bar{G}_0 = 0$ , отделяющей область основного потока от области циркулирующего вихревого течения (области привтулочного отрыва). Сопоставление начальной стадии развития привтулочного отрыва за НА при наличии и отсутствии втулки показало, что влияние сил вязкости несколько задерживает подъём линий тока, который наблюдается за НА при отсутствии втулки. В то же время точка «А» при отсутствии втулки легко может быть представлена как пересечение линии втулки с линией  $G = 0$  экстраполируемой на линию втулки в области резкого её подъёма.

Целью данного исследования является определение положения точки «А» начала отрыва «А» потока от втулки за НА, имеющими различные геометрические характеристики.

Рассмотрены результаты экспериментального исследования 23 кольцевых решёток с различной геометрией [1, 2]. Метод исследования – траверсирование

воздушного потока перед и за решётками, дополнительно положение линии отрыва потока от втулки определялось по краске, наносимой на втулку за выходными кромками направляющих лопаток.

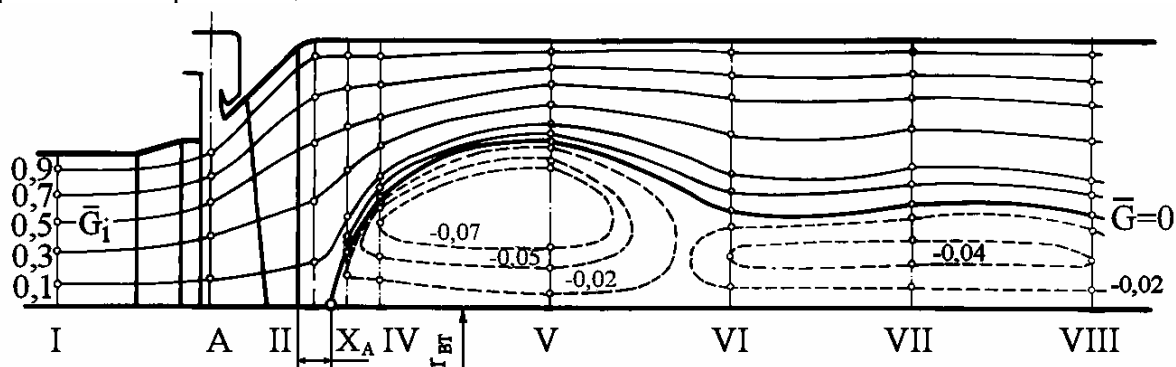


Рис. 1. Привтулочный отрыв за направляющим аппаратом турбинной ступени

Экспериментальные значения расстояния линии отрыва от кромок лопаток НА (усреднённое с учётом её неравномерности)  $\bar{X}_A = \frac{X_A}{b_k}$  – представлены как отношение размера  $X_A$  (см. рис. 1) к длине хорды лопатки в корневом сечении  $b_k$ .

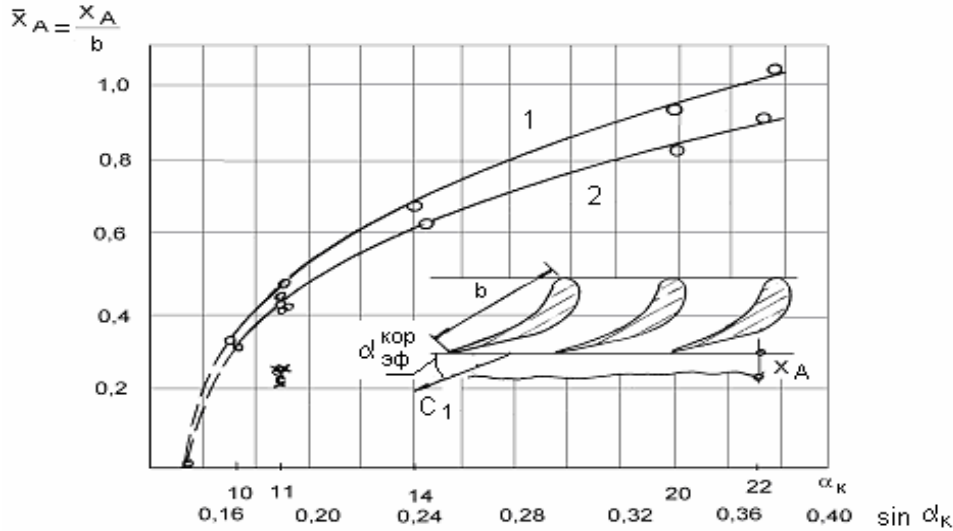
Исследованные решётки имели профили лопаток: Н-11 (С-1 ЦНИИ им. Крылова), Н-12 (С-2), ТС-2Б (МЭИ) и профиль с удлинителем входной части, применяемый на ОАО «Турбоатом».

На рис. 2 приведено изменение относительного расстояния  $\bar{X}_A$  от угла выхода потока в корневом сечении решётки при цилиндрических меридиональных обводах (линия 1,  $\gamma_{\text{п}} = 0^\circ$ ) и коническом меридиональном обводе (линия 2,  $\gamma_{\text{п}} = 45^\circ$ ). Установлено, что на размер  $X_A$  влияет величина угла выхода потока  $\alpha_{1\text{эф}}^{\text{корн}}$  в корневом сечении решётки, а его увеличение, независимо от закона закрутки лопаточного аппарата приводит к увеличению значения  $\bar{X}_A$ . Зависимость  $\bar{X}_A = f(\sin \alpha_{1\text{эф}}^{\text{корн}})$  имеет монотонный характер, а нулевое значение ( $\bar{X}_A = 0$ ) соответствует углу  $\alpha_{1\text{к}} \approx 8^\circ 30'$ , независимо от угла наклона  $\gamma_{\text{п}}$  наружного меридионального обвода. Это свидетельствует, что при  $\alpha_{1\text{к}} \leq 8^\circ 30'$  отрыв потока начинается от втулки в плоскости выходных кромок лопаточного аппарата НА.

Для решёток, лопатки которых имеют «классическую» форму профиля (Н-11, Н-12, ТС-2Б и подобные), форма профиля на положение точки «А» отрыва потока от втулки не повлияла. Каналы решётки, сформированные лопатками, имеющими профиль с удлинителем (применяемый ОАО «Турбоатом»), показали меньшее значение размера  $\bar{X}_A$  (на рис. 2. экспериментальные точки обозначены крестиками), что связано с определением длины хорды  $b_k$ . Для значения  $b_k$ , принятого по вписанному в профиль с удлинителем исходного профиля, соответствующего ТС-2Б, значения  $\bar{X}_A$  совпали с приведенной зависимостью (см. рис. 2 линии 1, 2).

Для исследованных решёток с малым втулочным отношением влияние угла выхода потока в корневом сечении  $\alpha_{1\text{эф}}^{\text{корн}}$  на положение точки отрыва с учётом угла наклона меридионального обвода  $\gamma_{\text{п}}$ , втулочного отношения  $\bar{r}_{\text{вт}}$  и периферийного угла

выхода потока из лопаточных каналов в корневом сечении может быть описано зависимостями:



1 –  $\gamma_n = 0^\circ$ , 2 –  $\gamma_n = 45^\circ$

Рис. 2. Положение точки отрыва потока за направляющим аппаратом при разных углах выхода потока

при  $\bar{d}_{cp} < 1,923$

$$\bar{X}_A = 1 + (2,1838 - 0,2421 \cdot \operatorname{tg} \gamma_n) \cdot (\sin \alpha_{1\text{эф}}^{\text{корн}} - \sin 8^\circ 30')^{0,5} - 3,3283 \cdot (\bar{r}_{\text{вт}} - 0,08)^{0,90}; \quad (1)$$

при  $\bar{d}_{cp} \geq 1,923$  (в области  $0,3157 \leq \bar{r}_{\text{вт}} \leq \bar{r}_{\text{отр.макс}}$ )

$$\bar{X}_A = 1 + (2,1838 - 0,2421 \cdot \operatorname{tg} \gamma_n) \cdot (\sin \alpha_{1\text{эф}}^{\text{корн}} - \sin 8^\circ 30')^{0,5} - 1,301 \cdot (\bar{r}_{\text{вт}} - 0,08)^{0,25}, \quad (2)$$

где  $\bar{r}_{\text{отр.макс}} = 1 - (1,015 - 0,350 \cdot \operatorname{tg} \gamma_n) \cdot \operatorname{tg} \alpha_{1\text{эф}}^{\text{cp}}$  при  $\gamma_{\text{вт}} = 0^\circ$ .

Влияние угла наклона корневого меридионального обвода на положение точки отрыва «А» потока от втулки может быть представлено зависимостью

$$\bar{X}_{A\gamma_{\text{вт}}} = X_{A\gamma_{\text{вт}}=0} - 0,0879 \cdot \operatorname{tg}(\pm \gamma_k) \quad (3)$$

для которой изменение угла наклона исследовано в диапазоне  $-20^\circ \leq \gamma_k \leq 20^\circ$ .

Сопоставление расчётных, полученных по зависимостям (1) и (2), и экспериментальных значений  $\bar{X}_A$  дало удовлетворительное совпадение, а погрешность определения  $\bar{X}_A$  не превысила  $\delta \bar{X}_A = \pm 0,03$ .

#### Литература

1. Голощапов В.Н. О роли направляющего аппарата в формировании течения рабочего тела в турбинной ступени / В.Н. Голощапов, В.И. Касилов, А.Ю. Козлоков // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. научн. трудов. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – № 6 – С. 56-67.

2. Голощапов В.Н. Особенности течения рабочей среды в проточной части паровых турбин при работе в широком диапазоне изменения их нагрузок / В.Н. Голощапов, В.И. Касилов, А.Ю. Козлоков, А.Л. Шубенко / Энергетика и электрификация. – 2008. – № 5. – С. 26-34.