

УДК 621.165

*А.В. Захаров, Г.Г. Шпензер, В.А. Рассохин*

## УСТОЙЧИВОСТЬ ПОТОКА В РАБОЧЕМ КОЛЕСЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ НА ВХОДЕ В СТУПЕНЬ

*A.V. Zakharov, G.G. Shpenzer, V.A. Rassokhin*

## STEAM FLOW STABILITY IN THE ROTOR WHEEL UNDER THE DIFFERENT STAGE INLET CONDITIONS

В статье рассмотрена проблема устойчивости течения потока в последних ступенях цилиндра низкого давления. Рассмотрены и проанализированы различные условия на входе в ступень, влияющие на потери энергии, стабильность и устойчивость потока.

УПРАВЛЕНИЕ. УСТОЙЧИВОСТЬ. СТАБИЛЬНОСТЬ. КПД. ОПТИМИЗАЦИЯ.

An issue of steam flow stability in LPC last stages is examined in the article. Different stage inlet conditions, which influence on energy losses and flow stability, are also examined and analyzed.

MANAGEMENT. STABILITY. PERFORMANCE INDEX. OPTIMIZATION.

Поскольку важнейшими характеристиками эффективности ступени при различных условиях на входе в ступень служат КПД ступени и устойчивость потока в рабочем колесе, необходимо изучить их взаимосвязь. Потери энергии, конечно, оказывают влияние на устойчивость потока в ступени, но оно различно в зависимости от структуры потока. К наиболее сильным факторам, влияющим на устойчивость потока, относятся те, которые стимулируют развитие пульсаций в корневой зоне. К числу источников пульсаций относятся, например, изломы на корневом обводе направляющего аппарата. Их влияние сказывается на всех режимах работы. Причем степень влияния меняется от условий течения потока перед направляющим аппаратом (например, при больших углах атаки в корневой зоне). Излом делает ступень чувствительной к любым возмущениям в корневой области. Причем влияние излома сказывается как на номинальном режиме, так и на режимах в области малых объемных пропусков пара  $Gv$ . На рис. 1 показано, что при устранении излома в направляющем аппарате ступени типа РЛ-960 на режиме близком к номинальному увеличился КПД ступени приблизительно на 3,0 %, в то время как зона отрыва на режиме торможения изменилась на

величину  $\Delta \bar{l}_{30} \approx 0,4$  ( $l_{30}$  — высота зоны отрыва;  $\bar{l}_{30} = l_{30}/l_2$ , где  $l_2$  — высота рабочей лопатки), что означает  $1 - \bar{l}_{30} \approx 0,6$  (рис. 1, вариант 1).

Второй пример сильного влияния излома как источника потерь в рабочем колесе — переход от двухступенчатого отсека к трехступенчатому. Это привело к резкому снижению КПД последней ступени при номинальном режиме. Введение такого, казалось бы, незначительного дополнительного сопротивления, каким является излом, при неблагоприятных условиях течения на номинальном режиме снизило КПД на  $\Delta \eta \approx 2,0 \%$ , а зона устойчивости в рабочем колесе на режиме торможения изменилась на  $\Delta \bar{l}_{30} \approx 30 \%$ , чему соответствует  $1 - \bar{l}_{30} \approx 0,7$  (рис. 1, вариант 2).

Третий пример (рис. 1, вариант 3) — случай, когда перед исследуемой ступенью типа РЛ-960 при угле раскрытия  $\gamma'' = 55^\circ$  устанавливалась либо подготовительная неподвижная решетка, либо предшествующая ступень. На номинальном режиме КПД отсека с предшествующим рабочим колесом оказался на  $\Delta \eta \approx 3,0 \%$  выше, чем КПД отсека с подготовительной решеткой, а зона отрыва потока за рабочим колесом на режиме торможения уменьшилась на  $\Delta \bar{l}_{30} \approx 35 \%$ , чему соответствует  $1 - \bar{l}_{30} \approx 0,65$ .

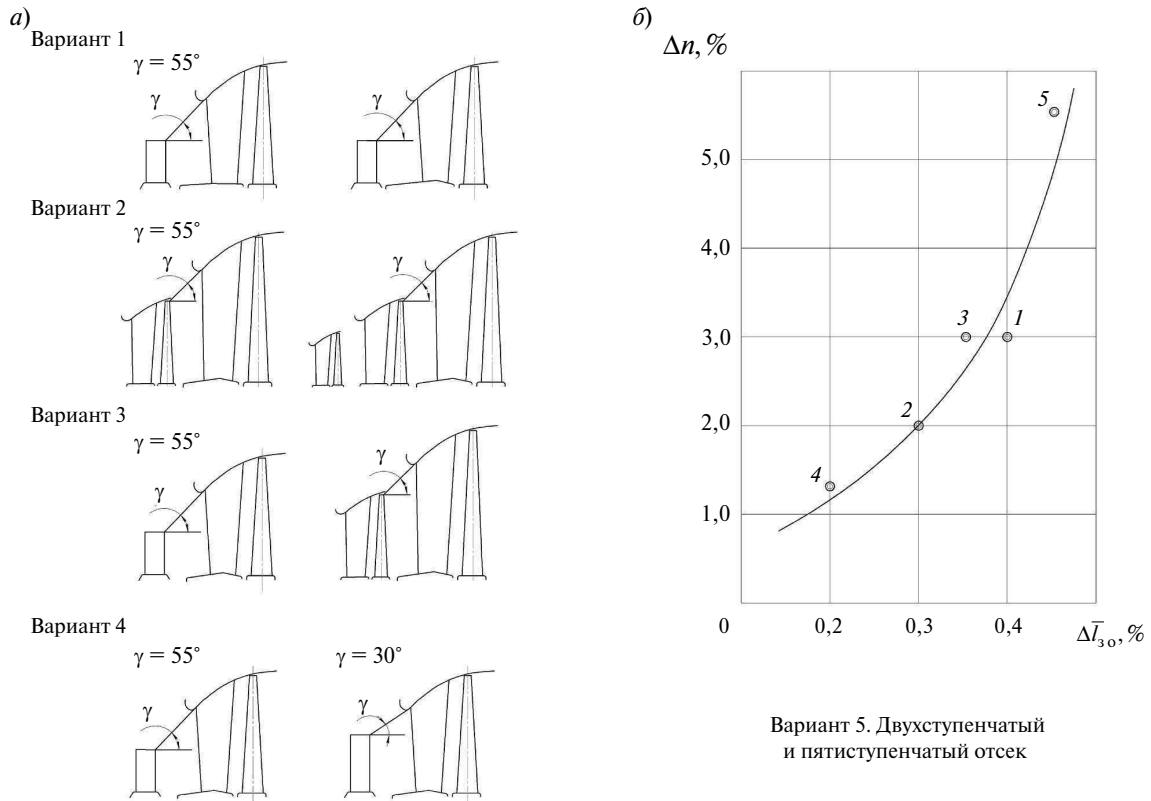


Рис. 1. Схемы к выявлению неучтенных потерь (а) и КПД последней ступени К-300–240 ЛМЗ (б) до и после модернизации (пять вариантов)

Возвращаясь к оценке влияния угла  $\gamma''$  на КПД последней ступени типа РЛ-960 при номинальном режиме и на устойчивость потока в режиме торможения, отметим, что для указанной модели при  $\gamma'' = 55^\circ$  КПД по сравнению с осевым входом в ступень снизился на 6,0 %, а при уменьшении угла  $\gamma''$  от  $55^\circ$  до  $30^\circ$  — возрос на 3,5 %. Вместе с тем, согласно расчетам [4] при том же изменении угла  $\gamma''$  от  $55^\circ$  до  $30^\circ$  КПД изменился на 2,3 %. При этом расчете не учитывались потери в корневой зоне. Разность в КПД ( $\Delta \eta = 3,5 - 2,4 = 1,2 \%$ ) — это неучтенная указанная выше формулами потеря, приходящаяся на корневую зону. Последняя потеря возникла под влиянием большого угла  $\gamma''$  у периферии, при котором течение было близким к срывному и сопровождалось пульсациями. При этом пульсации генерировались не только в периферийной, но и в корневой зоне.

Таким образом, в данном случае снижение КПД при номинальном режиме происходило из-за пульсаций в потоке. На режиме торможе-

ния амплитуды колебаний сильно возрастали в срывной зоне рабочего колеса.

Из всего сказанного следует, что необходимым условием для расширения области устойчивой работы последней ступени является высокий КПД при номинальном режиме. А последнее возможно лишь при устранении всех существенных стимуляторов локальных отрывов потока, порождающих его пульсации уже при номинальном режиме. Этот тезис имеет особое значение для ступеней, работающих на влажном паре [2].

Для наглядности на рис. 1 представлена взаимосвязь между потерей КПД  $\Delta \eta$ , неучтенной в расчетных формулах (в основном это — пульсации) для последней ступени типа РЛ-960 на номинальном режиме, и относительной величиной  $\Delta \bar{I}_{30}$  устойчивой зоны в РК. Подчеркнем, что в ряде опытов исправление сравнительно незначительных дефектов приводило к резкому расширению устойчивой зоны ( $1 - \bar{I}_{30}$ ) в рабочем колесе на режиме торможения ( $\bar{G}U_{кз}$ ).

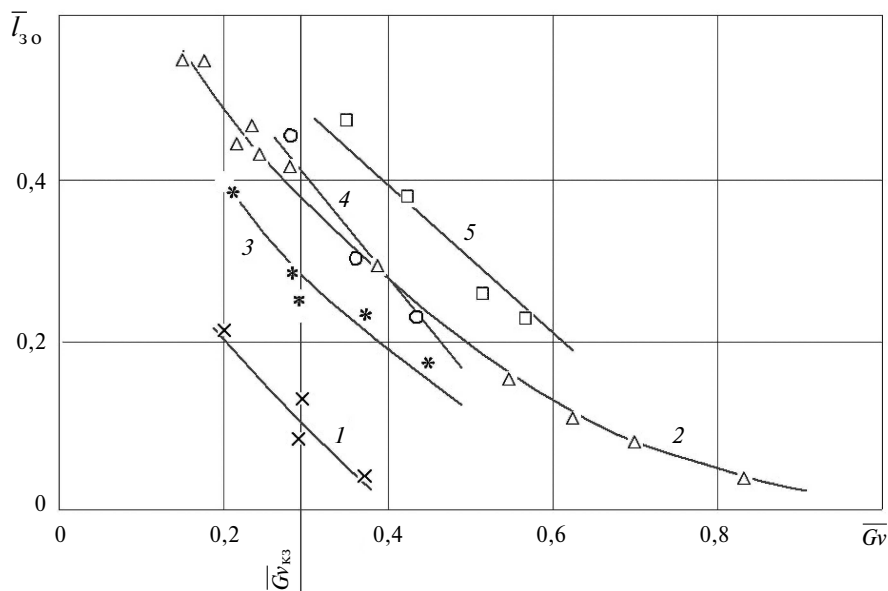


Рис. 2. Зависимость зоны отрыва потока  $\bar{l}_{30}$  за рабочим колесом (ступень типа РЛ-960) от режима работы

(1 — двухступенчатый отсек; 2 — К-300–240 ЛМЗ после модернизации (5 ступеней); 3 — подготовительная решетка на входе в ступень,  $\gamma'' = 30^\circ$ ; 4 — одиночная ступень; 5 — подготовительная решетка на входе в ступень,  $\gamma'' = 55^\circ$ )

Таким образом, полученная прямая на рис. 1 позволяет непосредственно связать области устойчивости в рабочем колесе (рис. 2) с потерями кинетической энергии на номинальном режиме. Помимо изломов в модернизируемых проточных частях, могут быть и другие стимуляторы пульсаций потока в корневых зонах последнего рабочего колеса. Например, аналогичный эффект дают концевые струи, особенно в корневой области. Могут оказаться опасными для устойчивости потока и чрезмерные осевые размеры между ступенями в последнем отсеке

$\bar{S}_{Z2}$ , а также отрицательная степень реактивности  $\rho_T''$ .

В последнем случае увеличение угла  $\alpha_1''$  снижает отрицательную степень реактивности и тем самым повышает устойчивость потока в последнем рабочем колесе. Однако при этом существенно изменяются другие важные параметры —  $M_{W2}''$  и  $M_{C1}'$ . Этот метод повышения устойчивости, а в ряде случаев — и КПД последнего отсека, был подробно изучен в работе [3] и нашел практическое применение на ЛМЗ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Носовицкий, А.И. Газодинамика влажнопаровых турбинных ступеней [Текст] / А.И. Носовицкий, Г.Г. Шпензер. — Л.: Машиностроение, 1977. — С. 184.
2. Кириллов, И.И. Вынужденные колебания параметров потока в срывных зонах сопла Лавала [Текст] / И.И. Кириллов, Г.Г. Шпензер, С. Саркар // Теплоэнергетика. — 1983. — №12. — С. 60–62.
3. Симкин, М.С. Повышение экономичности проточных частей низкого давления паровых турбин на базе разработки усовершенствованных методов

- расчета [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / М.С. Симкин. — Л., 1978. — С. 20.
4. Кириллов, И.И. [Текст]: / И.И. Кириллов, Г.Г. Шпензер, А.М. Варшавчик. — Известия вузов Энергетика. — 1988. — №5. — С. 61–65.
5. Захаров, А.В. Критические режимы работы последних ступеней мощных паровых турбин с лопатками предельной длины [Текст] / А.В. Захаров, Г.Г. Шпензер., В.А. Рассохин. — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2013.

## REFERENCES

1. **Nosovitskii, A.I.** Gazodinamika vlazhnoparovykh turbinnykh stupenei [Tekst] / A.I. Nosovitskii, G.G. Shpenzer.— L.: Mashinostroenie, 1977.— S. 184. (rus.).
2. **Kirillov, I.I.** Vynuzhdennye kolebaniia parametrov potoka v sryvnykh zonakh sopla Lavalia [Tekst]: / I.I. Kirillov, G.G. Shpenzer, S. Sarkar.— Teploenergetika.— 1983.— №12.— S. 60–62. (rus.).
3. **Simkin, M.S.** Povyshenie ekonomichnosti protochnykh chastei nizkogo davleniia parovykh turbin na baze razrabotki usovershenstvovannykh metodov rascheta [Tekst]: avtoref. dis.— na soiskanie uchenoi stepeni kand. tekhn. nauk / M.S. Simkin.— L., 1978.— S. 20, (rus.).
4. **Kirillov, I.I.** [Tekst]: / I.I. Kirillov, G.G. Shpenzer, A.M. Varshavchik // Izvestiia vuzov Energetika, 1988.— №5.— S. 61–65. (rus.).
5. **Zakharov, A.V.** Kriticheskie rezhimy raboty poslednikh stupenei moshchnykh parovykh turbin s lopatkami predel'noi dliny [Tekst] / A.V. Zakharov, G.G. Shpenzer., V.A. Rassokhin.— SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2013.— (rus.).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / AUTHORS

**ЗАХАРОВ Александр Владимирович** — аспирант кафедры турбинных двигателей и установок Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, Россия, ул. Политехническая, д. 29; e-mail: vobla777@mail.ru

**ZAKHAROV Aleksandr V.** - St.-Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia; e-mail: vobla777@mail.ru

**ШПЕНЗЕР Геннадий Григорьевич** — кандидат технических наук доцент кафедры турбинных двигателей и установок Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29; e-mail: shpenzer.g@gmail.com

**SHPENZER Gennadiy G.** — St.-Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia; e-mail: shpenzer.g@gmail.com

**РАССОХИН Виктор Александрович** — доктор технических наук профессор заведующий кафедрой турбин, гидромашин и авиационных двигателей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

**RASSOKHIN Victor A.** — St.-Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia; e-mail: turbo@pef.spbstu.ru