

DOI 10.5862/JEST.219.2

УДК 621.165

Г.Г. Шпензер

СРЫВНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ ВО ВЛАЖНОПАРОВЫХ СТУПЕНЯХ ЦИЛИНДРОВ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ПАРОВЫХ ТУРБИН

G.G. Shpenzer

FLOW SEPARATION AND NONSTATIONARY PROCESSES IN LP WET STAGES

Рассмотрены особенности формирования проточной части цилиндров низкого давления мощных паровых турбин с учетом работы последних ступеней в пульсирующих потоках. Получены и обобщены результаты исследований проточных частей низкого давления на экспериментальных стендах на влажном паре. Проанализировано влияние различных факторов на возникновение и усиление опасных колебаний параметров пульсирующих потоков влажного пара.

ПАРОВЫЕ ТУРБИНЫ; ВЛАЖНОСТЬ; ПОСЛЕДНИЕ СТУПЕНИ; ПУЛЬСАЦИИ ПОТОКА; ЭФФЕКТИВНОСТЬ СТУПЕНИ.

The paper considers forming a LP running part of large power steam turbines allowing for the performance in the last stages of pulsating streams. The authors have obtained and generalized the results of researching LP running parts at experimental stands with wet steam. This paper discusses the physical model of a wet steam flow in LP last stages and the influence of various factors on the increase in flow pulsations and energy losses and on the reduction in the turbine stage efficiency. The research results of the experimental turbine are presented and analyzed. Important dependences have been obtained, including flow fluctuations and stability zones, as well as dynamic stresses while changing the operating mode.

STEAM TURBINES; MOISTURE; LAST STAGES; FLOW PULSATIONS; STAGE EFFICIENCY.

Введение

Методы расчета срывных явлений и нестационарных процессов в концевых зонах последних ступеней цилиндров низкого давления (ЦНД), работающих на влажном паре, только начинают развиваться. Известны лишь единичные результаты в этом направлении. В работах [1–3] проанализированы и обобщены результаты исследований проточных частей низкого давления на экспериментальных стендах. Выявлены различия между результатами расчетов потерь кинетической энергии последних ступеней ЦНД и результатами экспериментов. Одна из главных причин этого расхождения — в том, что в расчетах не учитывается ряд важных факторов, ускоряющих развитие срывных нестационарных процессов в концевых зонах влажнопаровых ступеней.

Известны результаты газодинамических исследований проточных частей низкого давления на экспериментальных стендах фирм Siemens [4], Alstom [5, 6], Hitachi [7], Mitsubishi Heavy Industries [8] и др. Аналогичные исследования проводились в университетах Дюссельдорфа, Штутгарта, Гливице [9–12]. В ряде публикаций экспериментальные характеристики последних ступеней ЦНД приведены в сравнении с результатами численного моделирования. Сложность изучения газодинамических процессов двухфазных потоков приводит к некоторой противоречивости информации, полученной разными авторами, при сопоставлении теоретических и экспериментальных исследований. Из ряда публикаций известно, что интегральные характеристики последних ступеней, полученные опытным и численным методами, имеют определенные различия. Та-

ким образом, существует актуальная проблема учета и описания пульсирующих турбулентных течений, в том числе отрывных явлений, требующая комплексного подхода с использованием экспериментальных и теоретических методов.

В предлагаемой статье обращено внимание на крайне негативное влияние пульсаций потока на эффективность работы последних ступеней. С ростом предельной высоты рабочих лопаток это влияние будет усиливаться. Поэтому конструкция проточной части низкого давления мощных и сверхмощных паровых турбин АЭС и ТЭС должна по возможности обеспечивать минимальные возмущения потока.

Факторы, ускоряющие развитие срывных и нестационарных процессов на влажном паре

Для повышения экономичности и надежности работы ЦНД необходимо исследовать физические явления, происходящие в высокоскоростном влажнопаровом потоке, и их влияние на характеристики турбинных ступеней. В результате такого исследования появится возможность определенными мероприятиями ослабить негативное влияние срывных явлений на показатели работы ступени.

Срывные явления считаются наименее изученными. Причина заключается в особой сложности их протекания в концевых зонах ступеней ЦНД. Срывные явления в турбинных ступенях рассматриваются изолированно, в то время как их протекание связано со всеми показателями структуры потока: степенью неравномерности

$\chi_{c1} = \frac{c_{1\max} - c_{1\min}}{2c_{1cp}}$; степенью турбулентности ϵ_0 ;

степенью влажности и пульсациями потока.

Влияние степени турбулентности, пульсаций потока и степени влажности при рассмотрении нестационарных процессов во влажнопаровых ступенях ЦНД практически не учитывалось в силу сложности их одновременного учета. Настоящая работа направлена на решение проблемы аэродинамического совершенствования проточной части ЦНД мощных паровых турбин для ТЭС и АЭС за счет ослабления влияния нестационарных и срывных явлений на влажном паре и их последствий на экономичность и надежность ступеней ЦНД.

Сложность поставленной задачи потребовала рассмотрения накопленного в турбиностроении экспериментального материала, полученного в разные годы.

На стендах ЛПИ [13–15] исследовалось влияние степени турбулентности и пульсаций давления на выпадение мелкодисперсных аэрозолей на поверхность проточной части турбины. В результате исследования установлено, что наличие возмущений в потоке приводит к более раннему выпадению капельной влаги на поверхностях лопаточных аппаратов, в то время как расчеты по осредненным значениям параметров состояния пара показывают ее практически полное отсутствие. Стала ясна необходимость учета потерь из-за более раннего выпадения влаги, особенно в концевых зонах ступеней ЦНД, где нестационарные эффекты наиболее интенсивны. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют об увеличении неравномерности потока при наличии жидкой фазы, а следовательно, и усилении взаимного влияния последовательно расположенных ступеней.

При исследованиях на экспериментальных стендах ЛПИ впервые обнаружено явление значительного роста срывных и нестационарных процессов в пульсирующих потоках влажного пара. Эффект от этого явления настолько значителен, что его учет при проектировании проточной части ЦНД мощных паровых турбин гарантированно повысит эффективность работы последней ступени ЦНД.

Локальные отрывы потока

Рассмотрим развитие нестационарных и срывных явлений в концевых зонах ступеней ЦНД.

Согласно результатам исследований [13] даже слабые срывные явления в переохлажденном потоке могут резко усиливаться из-за появления в этом месте скачка конденсации и явлений конденсационной нестационарности. Так, например, в опытах ЛПИ у периферии направляющего аппарата (НА) последней ступени с рабочими лопатками РЛ-960 (ЛМЗ) были обнаружены местные замкнутые отрывы потока. На сравнительно небольшом расстоянии от них наблюдается открытый отрыв на выпуклой стороне направляющих лопаток.

Локальный отрыв не всегда приводит к существенному снижению КПД ступени, однако

может проявляться его опасная активность, особенно вредная при наличии неблагоприятных условий на входе в ступень. Для устранения локальных отрывов необходимо воздействовать на поток в непосредственной близости от места их образований. Как показали опыты ЛПИ, к числу таких мер следует отнести эффективность безлопаточного диффузорного участка, на которую особое влияние оказывают уменьшение угла раскрытия на входе в ступень, правильная организация периферийной струи из предыдущего рабочего колеса, непосредственное воздействие на периферийный концевой вихрь, например местными турбулизаторами потока при входе в диффузор. Широкие лопатки могут устранить существенную часть переходного диффузора и тем самым ликвидировать стимул для образования локальных отрывов.

Такое решение проблемы было проверено на модельном стенде ЛПИ применительно к последней ступени типа РЛ-960 (масштаб 1:3). Несмотря на наличие небольших отрывов на выпуклой стороне профиля, на вогнутой стороне локальные отрывы практически были ликвидированы. В этих же опытах было выявлено заметное положительное влияние турбулизаторов при входе как в узкий, так и в широкий направляющий аппарат.

Влияние турбулентности и пульсаций давления на характеристики последней ступени мощной паровой турбины

Возникновение углов атаки происходит в любой ступени по многим причинам, например из-за наличия изломов в проточной части ЦНД, значительных углов γ_2'' и v'' раскрытия

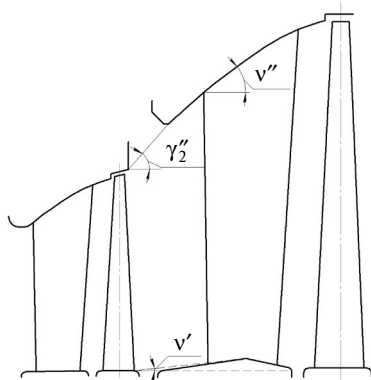


Рис. 1. Вход потока в направляющий аппарат последнего отсека ЦНД

проточной части у периферии (рис. 1), неправильно выбранных осевых зазоров и по ряду других причин.

На режиме $(u/c_0)_{\text{opt}}$ потери энергии, связанные с углами атаки в данной ступени, и потери энергии на входе в ступень в двухступенчатом отсеке обычно невелики (десятые доли процента от КПД ступени). При большом числе ступеней в ЦНД и наличии стимуляторов пульсаций потока эффекты от углов атаки накладываются и могут приводить к серьезным последствиям.

Рассмотрим совместное влияние на отрывные явления в последних ступенях ЦНД сильных факторов, а именно углов раскрытия периферийного обвода γ_2'' , v'' и последнего рабочего колеса (РК). То есть рассмотрим одновременное влияние двух главных стимуляторов на экономичность ступени. В ЛПИ проводились опыты с рабочим колесом РЛ-960 при одних и тех же углах раскрытия $\gamma_2'' = v'' = 55^\circ$ (рис. 2).

На рис. 2 характеристики 1 и 2 относятся к результатам испытаний двухступенчатого отсека с подготовительной ступенью на входе. Отсек испытывался при двух значениях объемного расхода $\overline{Gv} = 1,0$ и $\overline{Gv} = 0,3$.

Характеристика 3 относится к результатам опытов с той же последней ступенью РЛ-960 без предшествующей ступени, турбулизирующей поток на входе, но с установленной подготовительной решеткой, имеющей угол $\gamma_2'' = 55^\circ$. Опыты проводились на режиме $\overline{Gv} = 0,4$. На режимах, близких к холостому ходу, наблюдалось увеличение потерь энергии на 15–20 %. Такое падение КПД ступени можно объяснить сильными отрывами потока в корневой зоне рабочего колеса. Зона отрыва потока за рабочим колесом на этом режиме достигала 49 % от высоты рабочей лопатки l_2 .

Характеристика 3 дает представление об увеличении потерь энергии под влиянием локальных отрывов (стимуляторы пульсаций) в периферийной зоне ступени. Травесирование потока за последним рабочим колесом в двухступенчатом отсеке показало, что в корневой области зона отрыва потока составляла на режимах близких к холостому ходу не более 10–15 % от высоты рабочей лопатки l_2 .

Проведенный анализ углов атаки и линий тока по высоте ступени (рис. 3) свидетельствуют о том, что во всех ступенях при переходе от

$(u/c_0)_{\text{opt}}$ к удвоенной его величине углы атаки изменяются одинаково, тогда как последствия от этих углов атаки оказываются совершенно различными.

Таким образом, результаты опытов свидетельствуют о том, что при отсутствии подготовительной ступени углы атаки и отрывы потока в направляющем аппарате при больших углах раскрытия совершенно иначе стимулируют отрывы потока по всей высоте рабочих лопаток. Следовательно, турбулизация потока за подготовительной ступенью — это сильнейший фактор, снижающий отрывы потока в последнем рабочем колесе.

В полукорпусе ЦНД (рис. 4) не был обнаружен значительный рост потерь на периферии направляющего аппарата при номинальном режиме работы ступени типа РЛ-960. Высокий уровень турбулентности потока за РК предшествующей ступени по опытным данным МЭИ, БИТМ, ЛПИ, ЦКТИ достигал 20–25 % и устранял сильные отрывы потока у периферии исследуемой ступени [16]. Однако, если конструктор будет опираться только на существующие методики расчета и не учитывать негативное влияние пульсаций потока во влажнопаровых ступенях с резким раскрытием периферийных границ и высокими значениями M''_{w2} , то никакая турбулизация потока на входе в последнюю ступень не окажется достаточной, чтобы предотвратить расхождение результатов расчетов и опытов, а в итоге будет снижение КПД и надежности работы последней ступени [1, 2, 14].

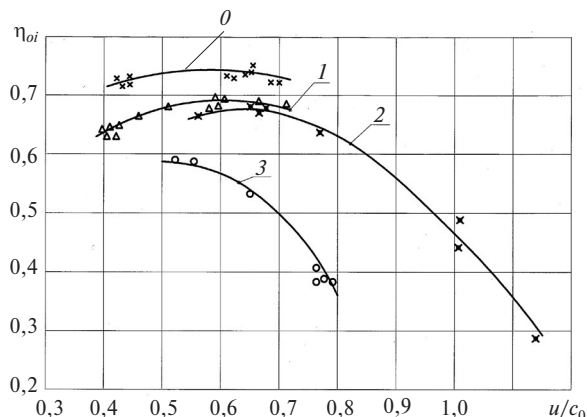


Рис. 2. Влияние углов атаки при наличии срывных явлений в направляющем аппарате на КПД ступени типа РЛ-960: 0 — одиночная ступень, 1 — двухступенчатый отсек с подготовительной ступенью на входе ($\overline{Gv} = 1,0$); 2 — двухступенчатый отсек с подготовительной ступенью на входе ($\overline{Gv} = 0,3$); 3 — ступень с подготовительной решеткой с углом $\gamma''_2 = 55^\circ$ ($\overline{Gv} = 0,4$)

В испытаниях ЛПИ, ЛМЗ и ЦКТИ, когда число предшествующих ступеней перед последней ступенью типа РЛ-960 увеличивалось от 2 до 5, КПД снижался на 5 % [3]. В опытах со ступенью ВК-50 увеличение числа ступеней от 2 до 5 снизило КПД последней ступени на 9 %.

При проектировании проточной части ЦНД при высоких значениях углов γ''_2 и v'' на развитие срывных и нестационарных процессов существенное влияние могут оказывать такие стимуляторы пульсаций и особенно их наложение, как, например, периферийные струи, условия входа в НА и выхода из него для предшествующих

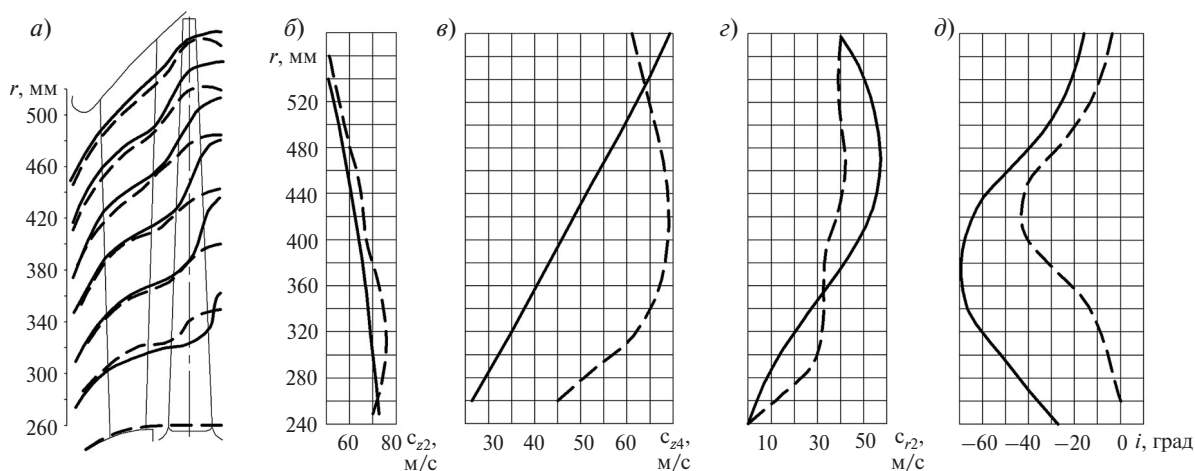


Рис. 3. Влияние отношения u/c_0 на распределение газодинамических параметров потока в ступени: ---- — $u/c_0 = (u/c_0)_{\text{opt}}$; — — $u/c_0 = 1,2$

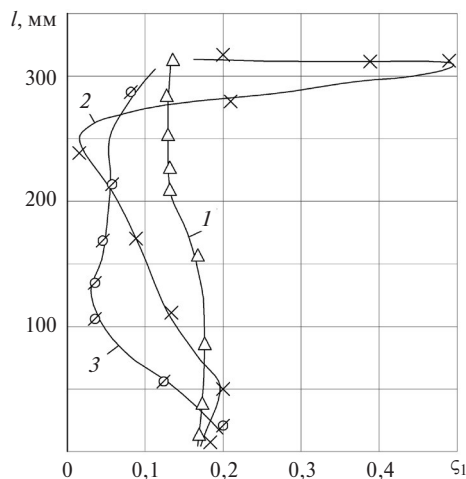


Рис. 4. Распределение потерь энергии за направляющим аппаратом 29-й ступени К-300–240 ЛМЗ [16]:
 1 — полуторный отсек (НА с предшествующей ступенью); 2 — решетка на входе, угол $\gamma_2'' = 55^\circ$;
 3 — решетка на входе, угол $\gamma_2'' = 30^\circ$

ступеней, не исключая первую ступень, перекрыши на входе в рабочее колесо и другие факторы [9].

В работе [2] изучена взаимосвязь отрывов потока в рабочем колесе на режимах близких холостому ходу на КПД ступени при номинальном режиме ее работы. Установлено, что устойчивое течение в последних ступенях зависит от различных факторов, стимулирующих развитие пульсаций параметров потока. Высокий КПД ступени на номинальном режиме расширяет область устойчивой работы ступени на переменных режимах. При проектировании ЦНД необходимо учитывать отрицательное влияние стимуляторов пульсаций и по возможности сводить их к минимуму.

Раскрытие проточной части в корневой области целесообразно для снижения больших углов раскрытия у периферии и устранения локальных срывов. Корневая зона чувствительна к диффузорным эффектам, поэтому можно допустить лишь небольшое корневое раскрытие проточной части. Для опытов была выбрана проточная часть с рабочей лопаткой РЛ-960. Периферийный угол за подготовительными решетками во всех опытах поддерживался равным $\gamma_2'' = 55^\circ$. Для того чтобы проследить влияние на устойчивость потока угла раскрытия $\nu' = -10^\circ$ и накопления пограничного слоя на поверхно-

стях перед направляющим аппаратом, было испытано три варианта меридионального обвода.

В первом варианте поток подводился по цилиндрической поверхности.

Во втором варианте поверхность перед направляющим аппаратом была значительно опущена ($\nu' = -10^\circ$).

В третьем варианте перед направляющим аппаратом имелась коническая поверхность, на которой накапливался пограничный слой, что заметно ухудшало структуру потока за рабочим колесом и снижало КПД ступени приблизительно на 1,5 % по сравнению со вторым вариантом.

Анализ испытаний, выполненных на режимах объемного расхода пара $\overline{Gv} = 0,30-0,35$ [16], позволяет сделать вывод, что раскрытие проточной части в корневой зоне до $\nu' = -10^\circ$ (вариант 2) практически не дает снижения КПД ступени по сравнению с подводом по цилиндрической поверхности.

Влияние влажности в современных конструкциях мощных паровых турбин

В турбинных ступенях значительная часть влаги сосредоточена в кромочных следах. Из-за дробления влаги при ее сходе с лопаток и дальнейшем разгоне ее в межвенцовых зазорах снижается скорость пара в кромочном следе. В результате этого возрастает неравномерность потока, а также замедляется его выравнивание при значительной степени влажности, что требует увеличения межвенцовых зазоров на периферии. Нестационарный эффект, связанный с влажностью потока, с особой силой проявляется в периферийной зоне ступени из-за повышенного содержания влаги и сильных вторичных течений в этой зоне.

Чтобы снизить вредное влияние влажности потока на экономичность ступени и устойчивость потока в РК, необходимо соблюдать меры, которые рекомендуются с целью организации безотрывного течения в проточной части турбины, а именно избегать больших углов раскрытия на периферии, взаимодействия корневых и периферийных струй с основным потоком, наличия изломов, уступов, перекрыш, больших открытых камер, а также значительных разрывов «твердых» ограничивающих поверхностей [3]. В противном случае нарастание негативных не-

стационарных процессов и срывных явлений в многоступенчатой турбине может принять лавинообразный характер, снижая как экономичность, так и надежность работы последней влажнопаровой ступени ЦНД.

Для удаления влаги из проточной части турбины может быть рекомендована высокоэффективная бескамерная система влагоудаления [17, 18].

В эксперименте на турбине К-300–240 ЛМЗ на ГРЭС-19 коэффициент влагоудаления в широком диапазоне режимов через бескамерную систему влагоудаления (от $\overline{G}u_{\text{ном}}$ до $\overline{G}u_{\text{холостого хода}}$) достигал значений $\psi = 4,3\text{--}5\%$.

Источники потерь энергии в проточной части ЦНД

К числу основных источников потерь энергии могут быть отнесены: диффузорно-конфузорный участок с углом раскрытия ν'' внутри НА; безлопаточный диффузор, предшествующий НА, с углом γ_1'' ; диффузорный неограниченный твердыми стенками участок с углом γ_2'' ; диффузорно-конфузорные зоны с углом раскрытия ν' ; зона между предшествующим РК и НА последней ступени размером \overline{S}_{Z2} ; осевой зазор между НА и РК $\overline{\delta}_{Z\alpha}$; сверхзвуковые течения в корневой зоне НА (M'_{c1}) и в периферийной области РК (M''_{w2}); процессы конденсации, порождающие пульсации в потоке. Размеры \overline{S}_{Z2} и $\overline{\delta}_{Z\alpha}$ входят в состав характеристик источников отрывов, так как сильно влияют на степень турбулентности и неравномерность потока.

Существует еще ряд важных факторов, стимулирующих пульсации потока и влияющих на потери энергии. Эти факторы характеризуют влияние предшествующих ступеней на последнюю ступень. Их условимся называть «z-факторами». К числу факторов, порождающих дополнительные потери во влажнопаровой ступени, относятся: концевые периферийные и корневые струи; перекрыши между НА и РК; уступы, изломы и резкие переходы на ограничивающих поверхностях проточной части; большие отборы пара; аэродинамически несовершенная организация потока при входе в первую ступень ЦНД.

Эта группа потерь в существующих турбинах все еще играет весьма заметную роль. Технические средства для устранения или смягчения этих потерь найдены. Разумеется, конструктор

всегда стремится избежать в проточной части уступов и изломов, выбирать оптимальные перекрыши, а также наилучшим образом направлять концевые струи.

Однако проектирование проточной части ЦНД современных турбин встречается с большими трудностями, и нередко конструктор по технологическим и экономическим соображениям вынужден принимать решения, способные исказить аэродинамику потока. В совокупности небольшие погрешности при числе ступеней более двух—трех могут в сумме вызвать при неблагоприятных условиях появление пульсаций, больших углов атаки, трудно предсказуемых последствий. Соответствующие этим z-факторам снижение запаса по устойчивости потока и потери энергии зависят от тех компромиссных решений, которые принимает конструктор, далеко не всегда располагая достоверными оценками влияния различных технологических упрощений.

Резкое раскрытие периферийных обводов и высокие значения M''_{w2} являются одними из главных стимуляторов пульсаций потока — источников роста потерь энергии в концевых зонах влажнопаровых ступеней большой веерности [19, 20]. Повышенные потери при наличии локальных отрывов потока усиливаются вынужденными колебаниями в зонах интенсивной конденсации [13].

Эти обстоятельства требуют уменьшения углов раскрытия периферийного обвода ступени. Оптимизируя меридиональные обводы, можно допускать корневой угол раскрытия в последнем двухступенчатом отсеке $\nu' = -10^\circ$ с углом раскрытия в предшествующем отсеке $\nu' = -5^\circ$ (с суммарным отклонением $\nu'_\Sigma = -15^\circ$). Это позволяет значительно снизить угол раскрытия проточной части у периферии последней влажнопаровой ступени ЦНД.

Заключение

Взаимосвязь КПД последней ступени на номинальном режиме с устойчивостью потока в РК требует для повышения эффективности работы этой ступени ЦНД проектировать проточную часть с минимальными возмущениями потока. Необходимо устранять локальные отрывы потока в последней ступени. Стимуляторами локальных отрывов могут быть углы атаки на входе

в ступень и другие возмущения потока, исходящие из проточной части, передаваемые импульсы со стороны периферийной зоны РК из сверхзвукового потока, неравномерного по окружности, а также из направляющего аппарата, где могут быть локальные отрывы на профилях не только в периферийной зоне при значительном местном падении давления (зона интенсивной конденсации). В корневой зоне РК локальный отрыв может формироваться из-за углов атаки, которые возможны уже на номинальном режиме, но особенно значительны на режимах торможения.

Таким образом, в последней ступени ЦНД формируется треугольник пульсаций: корневая зона РК — периферийная зона РК — периферийная зона НА. В этот треугольник пульсаций

прямо или косвенно поступают сигналы от стимуляторов отрывов и из проточной части ЦНД.

Большое количество стимуляторов отрывов потока для ступеней, работающих на влажном паре, требует от конструктора формирования треугольника пульсаций, обеспечивающего надежную работу ступени по устойчивости потока в рабочем колесе и с минимальными потерями энергии в широком диапазоне режимов. С ростом предельной высоты рабочих лопаток задача усложняется, что требует разработки физической модели потока в ЦНД, без которой в настоящее время невозможно гарантировать высокоэффективную конструкцию, наметить необходимый эксперимент и разработать расчетные формулы для влажнопаровых ступеней ЦНД с лопатками предельной длины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Захаров А.В., Шпензер Г.Г.** Критические режимы работы последних ступеней мощных паровых турбин с лопатками предельной длины // Научно-технические ведомости СПб ГПУ. 2013. №1(166). С. 41–44.
2. **Захаров А.В., Шпензер Г.Г., Рассохин В.А.** Устойчивость потока в рабочем колесе при различных условиях на входе в ступень // Научно-технические ведомости СПб ГПУ. 2013. №3(178). С. 28–30.
3. **Шпензер Г.Г., Захаров А.В., Тюхтяев А.М.** Устойчивость потока в последних ступенях цилиндров низкого давления паровых турбин // Научно-технические ведомости СПб ГПУ. 2014. №3(202). С. 54–61.
4. **Starzmann J., Kaluza P., Casey M.V., Sieverding F.** On kinematic relaxation and deposition of water droplets in the last stages of low pressure steam turbines // Journal of turbomachinery. 2013. Vol. 136. № 7. 071001. TURBO-13-1137.
5. **Megerle B., Rice T.S., McBean I., Ott P.** Numerical and experimental investigation of the aerodynamic excitation of a model low-pressure steam turbine stage operating under low volume flow // J. Eng. Gas Turbines Power. 2012. Vol. 135. № 1. 012602. GTP-12-1199.
6. **Megerle B., Rice T.S., McBean I., Ott P.** Unsteady aerodynamics of low-pressure steam turbines operating under low volume flow // J. Eng. Gas Turbines Power. 2012. Vol. 136. № 9. 091008. TURBO-13-1252.
7. **Shigeki Senoo, Hideki Ono, Takanori Shibata1, Susumu Nakano, Yutaka Yamashita, Kunio Asai1, Kazuya Sakakibara, Hideo Yoda, Takeshi Kudo.** Development of titanium 3600rpm-50inch and 3000rpm-60inch last stage blades for steam turbines // International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems. 2014. Vol. 6. №2. P. 9–16.
8. **Satoshi Miyake, Itsuro Koda, Satoru Yamamoto, Yasuhiro Sasao, Kazuhiro Momma, Toshihiro Miyawaki, Hiroharu Ooyama.** Unsteady wake and vortex interactions in 3-D steam turbine low pressure final three stages // ASME Turbo Expo 2014: Turbine technical conference and exposition. 2014. GT2014-25491.
9. **Stetter H., Eyb G., Zimmermann C., Hosenfeld H.-G.** Experimental verification of the improvements achieved by a new LP-blade design in a steam turbine // International gas turbine and aeroengine congress and exposition cologne. Germany. 1992. 92-GT-225.
10. **Grübel M., Starzmann J., Schatz M., Eberle T., Vogt D.M., Sieverding F.** Two-phase flow modeling and measurements in low-pressure turbines // J. Eng. Gas Turbines Power. 2014. Vol. 137. №4. 042602. GTP-14-1442.
11. **Wróblewski W., Dykas S., Gardzilewicz A., Kolovratnik M.** Numerical and experimental investigations of steam condensation in LP part of a large power turbine // J. Fluids Eng. 2009. Vol. 131. 4. 041301. DOI: 10.1115/1.3089544.
12. **Zhang L.Y., He L., Stueer H.** A numerical investigation of rotating instability in steam turbine last stage // Journal of turbomachinery. 2013. Vol. 135. № 1. 011009. TURBO-11-1092.
13. **Кириллов, И.И. Шпензер Г.Г., Саркар С.** Вынужденные колебания параметров потока в срывных зонах сопла Лавала // Теплоэнергетика. 1983. №12. С. 60–62.
14. **Базаров С.М., Шпензер Г.Г.** К кинетике влагообразования в возмущенных потоках // Инженерно-физический журнал. 1979. Т.36, № 6. С. 1018–1023.
15. **Безюков О.К.** Исследование влияния возмущенности потока на образование и трансформацию

влаги в турбинных ступенях: дис. ... канд. техн. наук / Ленинградский политехнический университет. Ленинград, 1978. 155 с.

16. **Носовицкий А.И., Шпензер Г.Г.** Газодинамика влажнопаровых турбинных ступеней. Л.: Машиностроение, 1977. 184 с.

17. **Kirillov I.I., Shpenzer G.G.** Problems of moisture collection and moisture removal in flow part of steam turbine // *Thermal Engineering*. 1993. №3. P. 22–24.

18. **Патент 2126088 РФ.** МПК F 01 D 25/32. Ступень паровой турбины со средствами сепарации влаги / Н.А. Забелин, Г.Г. Шпензер, В.И. Кириллов

[и др.]; Заявитель и патентообладатель ОАО «Ленинградский металлический завод». 95116898/06; заявл. 04.10.1995; опубл. 10.02.1999. 3с.: ил.

19. **Сандовский В.Б.** Исследование и отработка последних ступеней паровых турбин большой мощности: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ленинград: ЛПИ, 1977. 21 с.

20. **Байбаков А.Б.** Исследование работы ступеней и отсеков турбин большой мощности в широком диапазоне режимов с целью повышения эксплуатационных характеристик: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ленинград: ЛПИ, 1983. 22 с.

REFERENCES

1. **Zakharov A.V., Shpenzer G.G.** Kriticheskiye rezhimy raboty poslednikh stupeney moshchnykh parovykh turbin s lopatkami predelnoy dliny [Critical operating modes of the last stages of powerful steam turbines]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPb GPU*. 2013. №1(166). S. 41–44. (rus.)

2. **Zakharov A.V., Shpenzer G.G., Rassokhin V.A.** Ustoychivost potoka v rabochem kolese pri razlichnykh usloviyakh na vkhode v stupen [Steam flow stability in the rotor wheel under the different stage inlet conditions]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPb GPU*. 2013. №3(178). S. 28–30. (rus.)

3. **Shpenzer G.G., Zakharov A.V., Tyukhtyayev A.M.** Ustoychivost potoka v poslednikh stupenyakh tsilindrov nizkogo davleniya parovykh turbin [Stability of the steam flow in LPC last stages.]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPb GPU*. 2014. №3(202). S. 54–61. (rus.)

4. **Starzmann J., Kaluza P., Casey M.V., Sieverding F.** On kinematic relaxation and deposition of water droplets in the last stages of low pressure steam turbines // *Journal of turbomachinery*. 2013. Vol. 136. № 7. 071001. TURBO-13-1137.

5. **Megerle B., Rice T.S., McBean I., Ott P.** Numerical and experimental investigation of the aerodynamic excitation of a model low-pressure steam turbine stage operating under low volume flow. *J. Eng. Gas Turbines Power*. 2012. Vol. 135. № 1. 012602. GTP-12-1199.

6. **Megerle B., Rice T.S., McBean I., Ott P.** Unsteady aerodynamics of low-pressure steam turbines operating under low volume flow. *J. Eng. Gas Turbines Power*. 2012. Vol. 136. № 9. 091008. TURBO-13-1252.

7. **Shigeki Senoo, Hideki Ono, Takanori Shibata1, Susumu Nakano, Yutaka Yamashita, Kunio Asai1, Kazuya Sakakibara, Hideo Yoda, Takeshi Kudo** Development of titanium 3600rpm-50inch and 3000rpm-60inch last stage blades for steam turbines. *International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems*. 2014. Vol. 6. №2. P. 9–16.

8. **Satoshi Miyake, Itsuro Koda, Satoru Yamamoto, Yasuhiro Sasao, Kazuhiro Momma, Toshihiro Miyawaki, Hiroharu Ooyama.** Unsteady wake and vortex interactions

in 3-D steam turbine low pressure final three stages. *ASME Turbo Expo 2014: Turbine technical conference and exposition*. 2014. GT2014-25491.

9. **Stetter H., Eyb G., Zimmermann C., Hosenfeld H.-G.** Experimental verification of the improvements achieved by a new LP-blade design in a steam turbine. *International gas turbine and aeroengine congress and exposition cologne*. Germany. 1992. 92-GT-225.

10. **Grübel M., Starzmann J., Schatz M., Eberle T., Vogt D.M., Sieverding F.** Two-phase flow modeling and measurements in low-pressure turbines. *J. Eng. Gas Turbines Power*. 2014. Vol. 137. №4. 042602. GTP-14-1442.

11. **Wróblewski W., Dykas S., Gardzilewicz A., Kolvratnik M.** Numerical and experimental investigations of steam condensation in LP part of a large power turbine. *J. Fluids Eng*. 2009. Vol. 131. 4. 041301. DOI: 10.1115/1.3089544.

12. **Zhang L.Y., He L., Stueer H.** A numerical investigation of rotating instability in steam turbine last stage. *Journal of turbomachinery*. 2013. Vol. 135. №1. 011009. TURBO-11-1092.

13. **Kirillov I.I., Shpenzer G.G., Sarkar S.** Vynuzhdennyye kolebaniya parametrov potoka v sryvnykh zonakh sopla Lavalya [Forced oscillations of flow parameters in separation zones of the Laval nozzle]. *Teplotenergetika*. 1983. №12. S. 60–62. (rus.)

14. **Bazarov S.M., Shpenzer G.G.** K kinetike vlagoo-brazovaniya v vozmushchennykh potokakh [The kinetics of development of moisture in disturbed flows]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*. 1979. T.36, № 6. S. 1018–1023. (rus.)

15. **Bezyukov O.K.** Issledovaniye vliyaniya vozmushchennosti potoka na obrazovaniye i transformatsiyu vlagi v turbinnykh stupenyakh: dis. ... kand. tekhn. nauk [An investigation of the influence of flow disturbance on the formation and transformation of moisture in turbine stages] / Ленинградский политехнический университет. Ленинград, 1978. 155 с.

16. **Nosovitskiy A.I., Shpenzer G.G.** Gazodinamika vlazhnoparovykh turbinnykh stupeney [Gas dynamics of wet turbine stages]. Ленинград: Mashinostroyeniye, 1977. 184 с. (rus.)

17. **Kirillov I.I., Shpenzer G.G.** Problems of moisture collection and moisture removal in flow part of steam turbine. *Thermal Engineering*. 1993. №3. P. 22–24.

18. Patent 2126088 RF, MPK F 01 D 25/32. Stupen parovoy turbiny so sredstvami separatsii vlagi [Steam turbine stage with the moisture separation means] / N.A. Zabelin, G.G. Shpenzer, V.I. Kirillov [i dr.]; Zayavitel i patentoobladatel OAO «Leningradskiy metallicheskiy zavod». 95116898/06; zayavl. 04.10.1995; opubl. 10.02.1999. 3s.: il. (rus.)

19. **Sandovskiy V.B.** Issledovaniye i otrabotka poslednikh stupeney parovykh turbin bolshoy moshchnosti: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [An investigation and development of the last stages of large power steam turbines]. Leningrad: LPI, 1977. 21 s.

20. **Baybakov A.B.** Issledovaniye raboty stupeney i otsekov turbin bolshoy moshchnosti v shirokom diapazone rezhimov s tselyu povysheniya ekspluatatsionnykh kharakteristik: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Leningrad: LPI, 1983. 22 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ШПЕНЗЕР Геннадий Григорьевич — кандидат технических наук доцент кафедры турбинных двигателей и установок Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: shpenzer.g@gmail.com

AUTHORS

SHPENZER Gennadii G. — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: shpenzer.g@gmail.com