

Ю. О. БАХМУТСКАЯ, В. Н. ГОЛОЩАПОВ

ИЗМЕНЕНИЕ УСЛОВИЙ ПРОГРЕВА РОТОРА ЦВД В ОБЛАСТИ ПЕРЕДНИХ КОНЦЕВЫХ УПЛОТНЕНИЙ ПРИ ПУСКЕ ИЗ ХОЛОДНОГО СОСТОЯНИЯ

АННОТАЦИЯ Выполнено исследование потоков пара в переднем концевом уплотнении (ПКУ) ЦВД турбины К-325-23,5 ПАО «Турбоатом» при ее подготовке к пуску из холодного состояния (ХС) на временном интервале от начала набора вакуума до толчка ротора. Показано, что при принятой схеме уплотнений и прогреве ЦВД через выхлопной патрубок прогревается только ограниченная концевая часть ротора в области ПКУ. Предложено изменение исходной конструкции ПКУ, позволяющее обеспечить равномерный прогрев ротора по всей длине ПКУ на всем временном интервале подготовки турбины к пуску, которое заключается в выполнении дополнительных камер с помощью обойм-вставок в существующую обойму внутреннего корпуса и их подключения к источникам повышенного давления (коллектор 1,3 МПа) и пониженного давления (конденсатор) с переключением их в процессе предпусковой подготовки. Определены расходы пара через каждый сегмент уплотнения и граничные условия для расчетного исследования температурного и термонапряженного состояния ротора ЦВД при пуске турбины из ХС.

Ключевые слова: ЦВД, уплотнение, ротор, пуск из холодного состояния (ХС), прогрев.

JU. BAKHMUTSKA, V. GOLOSHCHAPOV

CHANGING THE HEATING CONDITIONS OF THE ROTOR OF HIGH PRESSURE CYLINDER IN THE REGION OF END SEALS IN THE COLD START MODE

ABSTRACT The steam flows in the front end seal (FES) of the high pressure cylinder of the turbine K-325-23.5 operated by PJSC "Turboatom" were studied to get prepared for the cold start at the time interval from the beginning of picking up the vacuum to the rotor push. The purpose of this research was to analyze the rotor heating in the FES region in the cold start mode and find the solution that would enable a more uniform rotor heating. Consideration was given to the superheated steam motion in FES sections. The FES length is equal to approximately one third of that of high pressure rotor. It has been shown that for the adopted seal scheme and high pressure cylinder heating only small end section is heated. Up to the point of steam supply through control valves at the rotor push about 80 % of the FES have low surface temperature and when the steam of 290 °C reaches the surface it results in the thermal shock and as a consequence in high thermal stresses in stress concentration regions, in particular at the angular points of cavities of a stepwise type. To provide the uniform rotor heating in the entire time interval from the beginning of picking up the vacuum to the rotor push we proposed to modify the initial FES structure. This enables the creation of an additional chamber using holding inserts and their connection to increased pressure sources (the collector of 1.3 MPa, cold industrial superheating when the high pressure cylinder is heated through the exhaust nozzle) and decreased pressure sources (the capacitor). The steam flow rate for every other seal segment and the boundary conditions for the computation investigation of thermal and thermostressed states of the rotor of high pressure cylinder in the cold start mode of the turbine have been defined.

Key words: high pressure cylinder, seal, rotor, cold start, and the heating.

Введение

Ротора высокого и среднего давлений (РВД и РСД) – это одни из основных элементов паровых турбин, которые ограничивают срок их службы. ЦКТИ и ВТИ проведено обследование РВД и РСД (при наличии промежуточного перегрева пара) паровых турбин, отработавших более 80 тыс. часов [1]. При обследовании были обнаружены трещины и дефекты в области первых ступеней ЦВД и ЦСД, в термокомпенсационных канавках, на галтелях дисков регулирующих ступеней и на участках роторов, в области концевых уплотнений (КУ). Образование трещин чаще всего связано с тем, что ротора работают при высоких параметрах пара; в них возникают напряжения от центробежных сил; при пусках и остановах турбин в них появляются значительные температурные напряжения. Наиболее напряженными являются пуски турбин из холодного состояния (ХС). В [2] приведены результаты определения параметров

пара в КУ на временном интервале от момента набора вакуума до толчка ротора при пуске турбины К-325-23,5 из ХС. Было получено распределение давлений и расходов пара по секциям КУ и граничные условия на поверхностях РВД в области ПКУ. Полученные результаты свидетельствуют о нерациональной схеме прогрева РВД, возникновении высокого уровня термонапряжений, которые могут приводить к образованию трещин.

Цель работы

Целью данного исследования является анализ прогрева ротора в области ПКУ на примере турбины К-325-23,5 при пуске из ХС. Поиск решения, позволяющего проводить его прогрев при подготовке к пуску на временном интервале от начала набора вакуума до толчка ротора. Поставленная цель может быть достигнута изменением конструкции ПКУ и схемы уплотнений.

Изложение основного материала

На рис. 1а показан фрагмент переднего концевого уплотнения (ПКУ) ступенчатого типа ЦВД турбины К-325-23,5 [3]. Часть элементов КУ размещена во внутреннем цилиндре, а часть – во

внешнем. Во внешней части ЦВД установлены кольцами обоймы с КУ, формирующие камеры.

Одним из возможных режимов образования трещин считается пуск турбины из ХС. Появления трещин или снижение надежности возможно на этапе подготовки турбины к пуску.

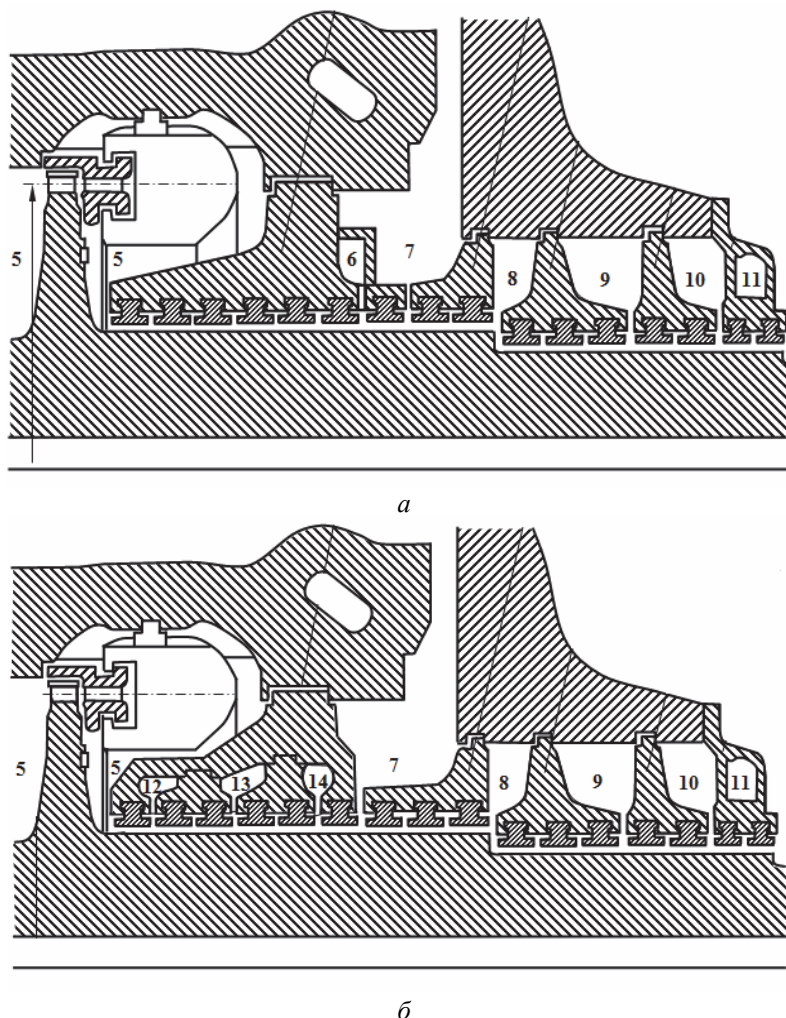


Рис. 1 – РВД турбины К-325-23,5:

а – исходное расположение камер ПКУ; *б* – предложенный вариант модернизации ПКУ; 5 – проточная часть; 6-11 – камеры ПКУ; 12-14 – дополнительные камеры ПКУ

К предпусковой подготовке следует отнести подачу пара на КУ, включение эжекторов уплотнения, углубление вакуума и прогрев корпуса ЦВД подачей пара из котла через холодный пром-перегрев (ХПП) и выхлопной патрубков в ЦВД.

Предпусковую подготовку турбины при пуске ее из ХС можно разделить на два этапа: 1-й временной интервал – набор вакуума (рис. 2а); 2-й временной интервал – подача пара через выхлопной патрубков (рис. 2б). Согласно инструкции [4] к 3-му временному интервалу можно отнести подачу пара в турбину через регулирующий клапан, толчок ротора, набор оборотов, выход на режим холо-

стого хода, набор мощности турбины до выхода на номинальный режим.

Первый временной интервал длится 90 минут. За это время давление в конденсаторе и соединенных с ним областях ЦВД понижается от 100 кПа до 23 кПа. При начале набора вакуума в камеру № 2 заднего концевого уплотнения (ЗКУ) и в камеру № 10 ПКУ поступает перегретый пар с давлением $P = 0,11-0,13$ МПа и температурой $T = 180$ °С. Паровоздушная смесь из камер № 1 и № 11 отсасывается эжектором уплотнения, обеспечивая в них давление ~ 97 кПа. При пуске из ХС температура элементов турбины принята 20 °С.

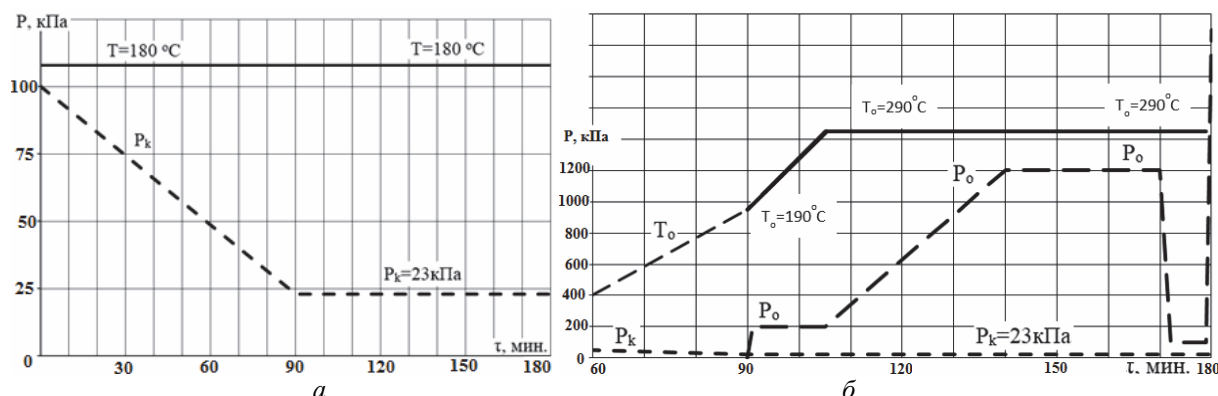


Рис. 2 – Графики подачи пара в ЦВД турбины К-325-23,5:
а – 1-й временной интервал; б – 2-й временной интервал

Из камер № 3 и № 9 пар направляется в подогреватель низкого давления [2]. Часть пара из камеры № 9 проходит в камеру № 8. Следовательно на 1-м временном интервале большая часть элементов РВД и участок ПКУ, остается холодной.

К началу 2-го временного интервала давление в конденсаторе и внутренних полостях устанавливается ~ 23 кПа, а заканчивается при показаниях глубинной термопары в области паровпуска температуры равной $\sim 130^\circ\text{C}$. 2-й временной интервал длится примерно 90 минут.

На 2-м временном интервале (рис. 2б) пар из котла через ХПП при давлении $P = 0,2$ МПа и с $T = 190^\circ\text{C}$ подается через выхлопной патрубков во внутреннюю полость ЦВД и длится 15 минут, после чего давление повышается до 1–1,2 МПа, а температура до $290\text{--}300^\circ\text{C}$. Эти параметры пара выдерживаются до толчка ротора. Перед пуском турбины происходит обеспаривание внутренней полости ЦВД, длительность которого 5–7 минут.

Такое изменение параметров пара на 2-м временном интервале вызывает следующие процессы: пар конденсируется на ограниченной длине КУ. При конденсации КТО достигают высоких значений. После достижения поверхностями элементов ротора температуры насыщения, происходит резкое снижение КТО и дальнейший нагрев элементов ротора и статора проходит перегретым

паром при низких значениях КТО, определяемых структурой потока в проточной части и в межкорпусном пространстве (МКП).

Пар в МКП поступает через кольцевую щель между внутренним корпусом и обоймой и формирует структуру, близкую к струйной, с мощными отрывами [5]. Затем пар проходит через узкую кольцевую щель в камеру № 7 и создает протечки через уплотнения в камеры № 8 и № 9. Давление в камере № 7 зависит от длительности конденсации пара на поверхности МКП. Камера № 6 соединена с выходом пара из 10-й ступени. На 2-м временном интервале давление в камере № 6 практически равно давлению в камере № 7 и давлению в проточной части на входе в кольцевое уплотнение перед диском регулирующей ступени. Видно, что через большую часть ПКУ, расположенную в обойме между камерами № 7 и № 5, пар не перетекает, прогрев этой части КУ отсутствует.

Для оценки условий формирования КТО на поверхностях МКП с учетом структуры потока была разработана методика определения давления в камере № 7 и определены величины расходов пара через КУ с учетом изменения давлений в камерах (табл. 1). Это позволяет определить граничные условия на поверхностях РВД, меняющиеся во времени на этапе подготовки к пуску (табл. 2).

Таблица 1 – Распределение расходов пара в секциях уплотнения для исходного варианта ПКУ

Время, мин.	Расход пара через ПКУ, кг/сек.						
	G_{6-5}	G_{7-6}	G_{8-7}	G_{9-8}	G_9	G_{10-9}	G_{10-11}
0,1	0	0	0,0004	0,0006	0,0313	0,032	0,05
45	0	0	0,0006	0,0007	0,038	0,038	0,05
90	0	0	0,0007	0,001	0,0473	0,048	0,05
91	0	0	0,046	0,046	0,09	0,042	0,05
101	0	0	0,046	0,046	0,09	0,042	0,05
102	0	0	0,045	0,045	0,087	0,042	0,05
105	0	0	0,045	0,045	0,087	0,042	0,05
140	0	0	0,27	0,27	0,314	0,045	0,05
170	0	0	0,27	0,27	0,314	0,045	0,05
179	0	0	0,022	0,022	0,064	0,042	0,05

Таблиця 2 – КТО на поверхні ротора в області КУ для исходного варіанта прогрева ЦВД турбіни

Время, мин.	КТО на поверхности ЗКУ, Вт/м ² К			КТО на поверхности ПКУ, Вт/м ² К						
	α_{2-1}	α_{2-3}	α_{3-4}	α_{4-5}	α_{5-6}	α_{6-7}	α_{7-8}	α_{8-9}	α_{10-9}	α_{11-10}
0,1	2670	2520	12	5	5	5	5	5	3120	2670
45	210	200	15	5	5	5	6	6	165	210
90	210	215	17	5	5	5	7	7	180	210
91	210	2750	3250	5	5	5	7	7	180	210
91	210	215	232	5	5	5	106	103	182	210
101	210	215	245	5	5	5	106	103	182	210
102	210	215	245	5	5	5	3250	2750	193	210
105	210	215	260	5	5	5	117	115	193	210
140	210	210	960	5	5	5	416	405	203	210
170	210	210	960	5	5	5	416	405	203	210

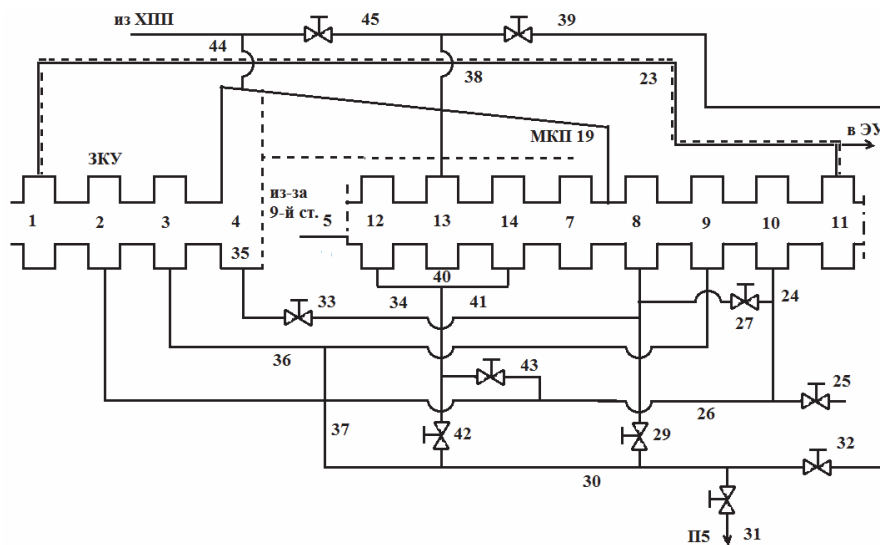


Рис. 3 – Схема уплотнений предложенного варианта подключения камер;

ХПП – холодный промпрегрев; П5 – подогреватель 5; ЭУ – эжектор уплотнений; 1–4, 7–14 – камеры уплотнений; 5 – проточная часть; 19 – МКП; 23, 24, 26, 30, 34, 36–38, 40, 41, 44 – система трубопроводов; 25, 27, 29, 31–33, 39, 42, 43, 45 – вентили и задвижки; 35 – выхлопной патрубок

КТО при конденсации пара на поверхностях МКП меняются от 1500–4700 Вт/(м²·К) и снижаются до 30–220 Вт/(м²·К) после достижения поверхностями температуры насыщения. Такое температурное состояние КУ при прогреве ЦВД со стороны выхлопного патрубка показывает, что при подаче свежего пара с температурой, повышающейся в процессе пуска от 300 до 523 °С, приводит в непрогретой части КУ, к резкому термоудару. Это может в углах впадин вызвать пластические деформации и появление трещин усталости.

Поэтому для снижения уровня напряжений целесообразно сохраняя количество гребней в КУ изменить его конструкцию (рис. 1б) и схему подключения камер КУ (рис. 3). Для улучшения прогрева ротора в области ПКУ сохраняя график пуска целесообразно использовать принцип чередования камер, подключенных к источникам повышенного и пониженного давлений (рис. 3).

На рис. 1б приведено предложенное изменение конструкции ПКУ. Оно состоит в том, что в обойме, которая установлена во внутреннем кор-

пусе с помощью дополнительных обойм-вставок, формируют три камеры. Это в сочетании с камерами, сформированными обоймами, установленными во внешнем корпусе, позволяет обеспечить перетоки пара, имеющего одинаковую начальную температуру пара по всей длине ПКУ.

На 1-м временном интервале пар с повышенным температурным потенциалом, поступающий в камеры, отбирается из соединительной магистрали. На 2-м временном интервале пар, с повышенными давлением и температурой, отбирается из ХПП. Пересоединение камер на источники повышенного и пониженного давлений, которыми являются соединительная магистраль (1,3 МПа), ХПП и конденсатор (23 кПа), производится с помощью паропроводов и вентилей, дополнительно устанавливаемых в схеме уплотнений (рис. 3).

При этом на 1-м временном интервале камеры № 12, № 14 и № 8 соединены с коллектором 1,3 МПа (как камеры № 2 и № 10). Через регулирующий клапан в них пар подается с давлением 130 кПа и температурой 180 °С. Внутренние по-

лости ЦВД и камера № 7 находятся под понижающимся давлением от 100 кПа до 23 кПа.

На 2-м временном интервале камеры № 5, № 7 и № 13 подсоединены к ХПП, а камеры № 9, № 12 и № 14 подсоединены к конденсатору, да-

вление в котором поддерживается 23 кПа. При таком подключении камер ротор прогревается по всей длине ПКУ. Распределение расходов пара для предложенного варианта ПКУ приведено в табл. 3.

Таблица 3 – Распределение расходов пара в секциях ПКУ для предложенного варианта

Время, мин.	Расход пара через ПКУ, кг/сек.											
	G ₁₂₋₅	G ₁₂	G ₁₂₋₁₃	G ₁₃	G ₁₄₋₁₃	G ₁₄	G ₁₄₋₇	G ₈₋₇	G ₈₋₉	G ₉	G ₁₀₋₉	G ₁₀₋₁₁
0,1	0,045	X	0,032	0,064	0,032	X	0,032	0,032	0,022	0,05	0,027	0,05
45	0,062	X	0,044	0,088	0,044	X	0,044	0,044	0,031	0,068	0,038	0,05
90	0,07	X	0,05	0,1	0,05	X	0,05	0,05	0,034	0,077	0,042	0,05
91	0,11	0,18	0,074	X	0,074	0,152	0,078	0,042	0,042	0,084	0,042	0,05
101	0,11	0,18	0,074	X	0,074	0,152	0,078	0,042	0,042	0,084	0,042	0,05
102	0,107	0,182	0,075	X	0,075	0,151	0,075	0,041	0,041	0,083	0,042	0,05
105	0,108	0,184	0,076	X	0,076	0,152	0,076	0,041	0,041	0,083	0,042	0,05
140	0,66	1,12	0,46	X	0,46	0,93	0,46	0,25	0,25	0,29	0,04	0,05
170	0,66	1,12	0,46	X	0,46	0,93	0,46	0,25	0,25	0,29	0,04	0,05
179	0,053	0,09	0,037	X	0,037	0,075	0,037	0,02	0,02	0,062	0,042	0,05

Таблица 4 – КТО на поверхности ротора в области ПКУ для предложенного варианта прогрева ЦВД

Время, мин.	КТО на поверхности ПКУ, Вт/м ² К								
	α ₅₋₁₂	α ₁₂₋₁₃	α ₁₃₋₁₄	α ₁₄₋₇	α ₇₋₈	α ₈₋₉	α ₉₋₁₀	α ₁₁₋₁₀	
0,1	3120	3120	3120	3120	3120	3040	3120	2670	
45	217	170	170	170	170	150	170	210	
90	235	184	184	184	184	160	184	210	
91	315	249	249	233	169	169	184	210	
101	315	249	249	233	169	169	184	210	
102	347	272	272	272	198	198	184	210	
105	362	284	284	284	206	206	184	210	
140	1334	1050	1050	1050	1630	1630	180	210	
170	1334	1050	1050	1050	1630	1630	180	210	
179	219	172	172	172	125	125	184	210	

Обсуждение результатов

Предложенный подход к формированию потоков пара между камерами КУ позволяет получить примерно равные граничные условия третьего рода, как на 1-м, так и на 2-м временном интервалах предпусковой подготовки. Температурные поля и термонапряжения, выполненные на участках ротора № 8, 9 и 10 исходного варианта КУ, не превышает 348 МПа, что соответствует 0,7 от предела упругих напряжений. Поэтому можно ожидать, что для предложенной схемой КУ, термонапряжения не будут превышать предела упругости.

Выводы

Рассмотрен новый подход установки камер в области ПКУ. Предложена новая схема формирования потоков пара в секциях КУ для прогрева ПКУ ЦВД. Показано, что полученные расходы пара через КУ позволяют добиться равномерного прогрева ротора в области ПКУ. Получены граничные условия (табл. 4) для расчетного исследования термонапряженного состояния ротора.

Список литературы

- 1 **Судаков, А. В.** Обоснование продления срока службы паровых турбин, имеющих детали с отклонениями от требований нормативной документации / **А. В. Судаков, С. Н. Гаврилов, А. И. Левченко, Е. В. Георгиевская, Л. В. Федорова** // *Neftgaz.RU*. – 2015. – № 1–2. – С. 42–47. – ISSN 2410-3837.
- 2 **Голошапов В. Н.** Характеристики течения пара в концевых уплотнениях ЦВД на этапе набора вакуума / **В. Н. Голошапов, Ю. О. Бахмутская** // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 8(1180). – С. 122–128. – ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2016.08.17.
- 3 **Створення парових турбін нового покоління потужністю 325 МВт** / **В. Г. Суботін, С. В. Левченко, В. Л. Швецов, О. Л. Шубенко, А. О. Тарелін, В. П. Суботович**. – Харків : Фоліо, 2009. – 256 с. – ISBN 978-966-03-4952-0.
- 4 **ПАО «Турбоатом».** Турбина паровая К-325-23,5. Руководство по эксплуатации. – Харьков : ПАО «Турбоатом», 2006. – 80 с.
- 5 **Теплообмен в элементах конструкций паровых турбин** / **Ю. М. Мацевитый, С. В. Алехина, В. Н. Голошапов, О. В. Котульская** / Под общ. ред.

акад. НАН України Ю. М. Мацевитого. – Харьков : Институт проблем машиностроения НАН Украины, 2012. – 288 с. – ISBN 978-966-02-6322-2.

Bibliography (transliterated)

- 1 **Sudakov, A., Gavrilov, S., Georgievskaya, Ye., Levchenko, A., Fedorova, L.** (2015), *Obosnovaniye prodleniya sroka sluzhby parovykh turbin, imeyushchikh detali s otkloneniyami ot trebovaniy normativnoy dokumentatsii [Justification of the extension of the service life of steam turbines that have parts with deviations from the requirements of regulatory documentation]*, Neftegaz.RU, Moscow, Russia, no. 1–2, pp. 42–47, ISSN 2410-3837.
- 2 **Goloshchapov, V. and Bakhmutska, Ju.** (2016), "Characteristics of the Steam Flow in the End Seals of High Pressure Cylinders in the State of Vacuum Augmentation", Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment, no. 8(1180), pp. 122–128, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2016.08.17.
- 3 **Subotin, V., Levchenko, S., Shvecov, V., Shubenko, O., Tarelin, A. and Subotovykh, V.** (2009), *Stvorennjaparovih turbin novogo pokolinnja potuzhnistiju 325 MVt [Creating steam turbines of new generation with the capacity of 325 MW]*, Folio, Kharkiv, Ukraine, ISBN 978-966-03-4952-0.
- 4 **JSC "Turboatom".** (2006), *Turbina parovaja K-325-23,5. Rukovodstvo po jekspluatatsii [Steam turbine K-325-23.5. Manual]*, JSC Turboatom, Kharkiv, Ukraine.
- 5 **Matsevityy, YU., Alekhina, S., Goloshchapov, V., Kotul'skaya, O.** (2012) *Teploobmen v elementakh konstruksiy parovykh turbin [Heat exchange in the elements of steam turbine]*, A.N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems NAS of Ukraine, Kharkov, Ukraine, P.288, ISBN 978-966-02-6322-2.

Сведения об авторах (About authors)

Бахмутская Юлия Олеговна – инженер, отдел моделирования и идентификации тепловых процессов, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного Национальной академии наук Украины, г. Харьков, Украина; e-mail: julia.bakhmutska@gmail.com, ORCID 0000-0002-2334-7432.

Bakhmutska Julija – engineer, Department for Modeling and Identification of Thermal Processes, Institute of Problems of Mechanical Engineering A.N. Podgorny NAS of Ukraine, Kharkov, Ukraine.

Голощанов Владимир Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, старший научный сотрудник отдела моделирования и идентификации тепловых процессов; г. Харьков, Украина; e-mail: paramonova@ipmach.kharkov.ua, ORCID 0000-0002-2075-5326.

Goloshchapov Vladimir – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Department for Modeling and Identification of Thermal Processes, A.N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems (IPMach) NAS of Ukraine, Kharkov, Ukraine.

Please cite this article as:

Бахмутская, Ю. О. Изменение условий прогрева ротора ЦВД в области передних концевых уплотнений при пуске из холодного состояния / **Ю. О. Бахмутская, В. Н. Голощанов** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 10(1232). – С. 38–43. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.10.05.

Please cite this article as:

Bakhmutska, Ju. and Goloshchapov, V. (2017), "Changing the Heating Conditions of the Rotor of High Pressure Cylinder in the Region of End Seals in the Cold Start Mode", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 10(1232), pp. 38–43, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2017.10.05.

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Бахмутська, Ю. О. Зміна умов прогріву ротора ЦВД в області передніх кінцевих ущільнень при пуску з холодного стану / **Ю. О. Бахмутська, В. М. Голощанов** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 10(1232). – С. 38–43. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.10.05.

АНОТАЦІЯ Виконано дослідження потоків пару в передньому кінцевому ущільненні (ПКУ) ЦВД турбіни K-325-23,5 ПАТ «Турбоатом» при її підготовці до пуску з холодного стану (ХС) на тимчасовому інтервалі від початку набору вакууму до пошивку ротора. Показано, що при прийнятій схемі ущільнень і прогріву ЦВД через вихлопний патрубок прогрівається лише обмежена кінцева частина ротора в області ПКУ. Запропонована зміна вихідної конструкції ПКУ, що дозволяє забезпечити рівномірне прогрівання ротора по всій довжині ПКУ на всьому інтервалі підготовки турбіни до пуску, яке полягає у виконанні додаткових камер за допомогою обойм-вставок в існуючу обойму внутрішнього корпусу і їх підключення до джерел підвищеного тиску (колектор 1,3 МПа) і зниженого тиску (конденсатор) з перемиканням їх в процесі передпускової підготовки. Визначені витрати пари через кожен сегмент ущільнення і граничні умови для розрахункового дослідження температурного і термонапруженого стану ротора ЦВД при пуску турбіни з ХС.

Ключові слова: ЦВД, ущільнення, ротор, пуск з холодного стану (ХС), прогрів.

Поступила (received) 08.02.2017