



DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-2-135-143

EDN: AQTХРТ

УДК 621.165.536.2462-135

Научная статья / Research article

Влияние отклонений параметров в процессе пуска на термонапряженное состояние оборудования ТЭС

Ю.А. Радин^{a,b}, Т.С. Конторович^a, В.У. Мнацаканян^c

^aПАО «Мосэнерго», Москва, Российская Федерация

^bРоссийский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

^cНациональный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, Российская Федерация

✉ RadinYA@mosenrgo.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 29 ноября 2022 г.

Доработана: 17 января 2023 г.

Принята к публикации: 25 февраля 2023 г.

Ключевые слова:

высокое давление, среднее давление, ротор, цилиндр, пароперегреватель, выходной коллектор

Аннотация. Действующие руководящие документы рекомендуют оценивать качество проведения пусковых и остановочных режимов, а также режимов работы под нагрузкой по соответствию пусковых параметров графикам-заданиям, типовым инструкциям, режимной карте, критериям надежности и их предельным значениям. Качество ведения эксплуатационных режимов предлагается оценивать по назначенным отклонениям параметров от значений, указанных в типовых инструкциях или графиках-заданиях. Проанализированы предложенный подход и принятые значения допустимых отклонений параметров, по которым производится оценка качества проведения пусковых операций с точки зрения термонапряженного состояния критических элементов тепловой схемы. Анализ выполнен на основе расчетов термонапряженного состояния наиболее нагруженных ротора высокого давления паровой турбины и выходного коллектора пароперегревателя высокого давления котла-утилизатора при отклонениях температуры свежего пара от графика-задания. Предложено оценку качества пусковых режимов проводить на основе расчета циклической прочности «критических» элементов энергоустановки, а не по превышению значений контрольных параметров без учета конкретного времени возникновения этого превышения по отношению к графику-заданию, температурного состояния рассматриваемого элемента, расхода пара и т. д. Все рассмотренные в качестве примера отклонения параметров не оказывают влияния на циклическую прочность рассматриваемого оборудования. Наиболее точно оценить качество проведения режима можно посредством мониторинга режимов работы турбины и котлоагрегата, что позволит контролировать соблюдение критериев надежности, не допуская их превышения.

Для цитирования

Радин Ю.А., Конторович Т.С., Мнацаканян В.У. Влияние отклонений параметров в процессе пуска на термонапряженное состояние оборудования ТЭС // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 2. С. 135–143. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-2-135-143>



Influence of parameter deviations during start-up on the power plant equipment thermal stressed state

Yuri A. Radin^{a,b}  , Tatiana S. Kontorovich^a , Victoria U. Mnatsakanyan^c 

^aJoint-Stock Company for Power and Electrification “Mosenergo”, Moscow, Russian Federation

^bRUDN University, Moscow, Russian Federation

^cNational Research Technological University “MISIS”, Moscow, Russian Federation

 RadinYA@mosenergo.ru

Article history

Received: November 29, 2022

Revised: January 17, 2023

Accepted: February 25, 2023

Keywords:

high pressure, medium pressure, rotor, cylinder, stream overheater, output manifold

Abstract. The current guidelines recommend evaluating the quality of start-up and shut-down modes, as well as operation modes under load, according to the compliance of start-up parameters with start-up assignment schedules, standard instructions, a regime map, reliability criteria and their limit values. The quality of maintaining operating modes is proposed to be assessed by the assigned deviations of parameters from the values specified in standard instructions or start-up schedules. The authors analyze the suggested approach and the accepted values of the parameter permissible deviations, according to which the start-up operations quality is assessed in terms of the thermal stressed state of the thermal scheme critical elements. The analysis was performed on the basis of the thermal stressed state calculations of the most loaded steam turbine high-pressure rotor and the high-pressure heat recovery steam generator superheater outlet header with deviations of the live steam temperature from the start-up schedule. It is proposed to evaluate the quality of start-up modes based on the calculation of the cyclic strength the power plant “critical” elements, and not by exceeding the control parameters values without taking into account the specific time of this excess occurrence in relation to the schedule, the temperature state of the element under consideration, steam flow, etc. All parameters deviations considered as an example do not affect the cyclic strength of the equipment in question. The most accurate assessment of the regime quality can be carried out as a result of monitoring the turbine and the boiler unit operation modes, which will make it possible to control compliance with the reliability criteria, preventing them from being exceeded.

For citation

Radin YuA, Kontorovich TS, Mnatsakanyan VU. Influence of parameter deviations during start-up on the power plant equipment thermal stressed state. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(2):135–143. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-2-135-143>

Введение

Действующий в настоящее время руководящий документ¹ определяет порядок организации работ по анализу качества пусков (остановов) основного энергетического оборудования с барабанными и прямоточными котлами, конденсационными и теплофикационными турбинами, установленными на ТЭС в России.

Оценка качества проведения пусковых режимов теплоэнергетического оборудования производится на основании соответствия пусковых параметров графикам-заданиям, типовым инструкциям, режимной карте, критериям надежности и их предельным значениям.

При точном следовании этим документам нестационарные температурные напряжения не превышают предельно допустимых значений. Однако при различного рода отклонениях, неизбежных на практике, эти напряжения могут изменяться, даже превышая в отдельных случаях допустимые значения [1–3].

При этом критерии разделяются на основные и дополнительные. К основным критериям относятся

¹ РД 153-34.0-20.585-00. Руководящие указания по анализу качества пуска (останова) основного теплоэнергетического оборудования ТЭС. Утв. Российским акционерным обществом энергетики и электрификации «ЕЭС России» 28.12.1999 г. М.: СПО ОРГРЭС, 2000. 49 с.

те, при превышении которых не предусматривается действие технологических защит, но при их несоблюдении запрещается выполнять пуск оборудования либо требуется разгрузка работающего оборудования вплоть до его останова, а также критерии, несоблюдение которых свидетельствует о нарушении правил проведения пусковых операций, регламентированных инструкциями по эксплуатации.

К дополнительным критериям отнесены такие, влияние которых на надежность оборудования определяется временем и величиной нарушений этих критериев, то есть носит скорее накопительный характер.

Современный эксплуатационный оперативный контроль параметров, позволяющий избежать превышения допустимых значений критериев надежности, может быть осуществлен с применением информационно-вычислительного комплекса АСУ ТП, локальной подсистемы диагностического контроля оборудования, например с использованием электрической части системы регулирования (ЭЧСР) турбины и т. п.

Для энергоблоков, где отсутствует такой контроль, документ предлагает ряд предельно допустимых отклонений параметров от значений, предлагаемых графиками-заданиями и типовыми инструкциями.

Справедливость предложенного подхода и приведенных значений допустимых отклонений параметров, по которым производится оценка качества проведения пусковых операций, проверена на примере положений, изложенных в РД 153-34.0-20.585-00.

Для современных блочных паровых турбин с двухстенной конструкцией корпусов и эффективной системой обогрева фланцев высокотемпературных цилиндров высокого и среднего давления (ЦВД и ЦСД соответственно) наиболее нагруженными элементами являются роторы высокого и среднего давления (РВД и РСД), нестационарные температурные напряжения в которых ограничивают скорость переходных режимов. Нестационарные температурные напряжения в корпусных деталях (блоках клапанов, внутреннем и наружных корпусах ЦВД и ЦСД) ниже, чем в роторах; к тому же они более инерционны к изменениям режима работы турбин.

Одним из основных критериев обеспечения надежности роторов является резкий прогрев или захлаживание (за время менее 10 минут) металла паровпуска ЦВД, которые определяются по пока-

заниям температуры пара в камере регулирующей ступени (для турбин с сопловым парораспределением). Допустимые отклонения температуры пара в камере регулирующей ступени на начальных этапах пуска ограничиваются значением, меньшим 70 °С. Предполагается, что только при таких отклонениях температуры обеспечивается допустимый уровень температурных напряжений. При значениях, больших или равных заданной, ставится оценка «неудовлетворительно» за проведение пуска.

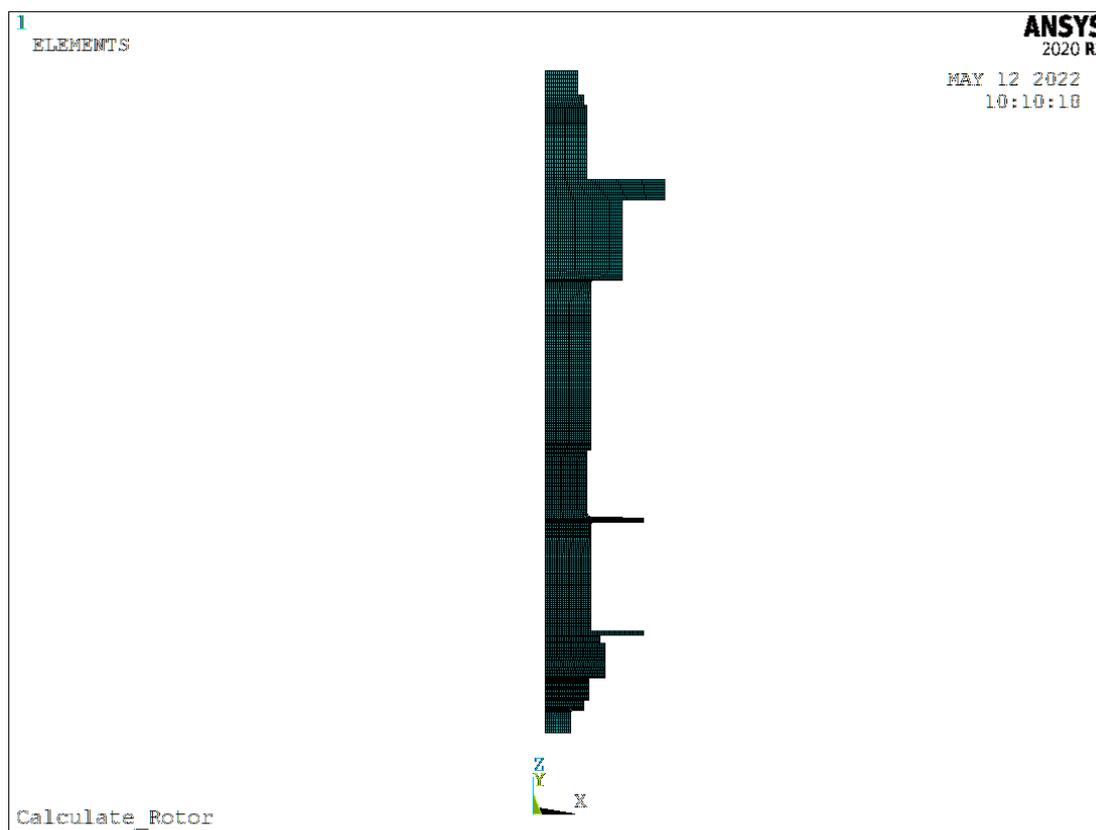
1. Моделирование термонапряженного состояния ротора при отклонении температуры пара

Для проверки данного положения проведены расчеты термонапряженного состояния ротора высокого давления турбины Т-125/150-7,7 при увеличенной на 100 °С по отношению к графику-заданию температуре пара перед первой ступенью на начальном этапе пуска из холодного состояния на протяжении более 60 минут и на этапе нагружения турбины в течение 10 минут. Расчет проводился при помощи программного комплекса ANSYS, позволяющего совместно решать краевые задачи теплопроводности и механики сплошной среды.

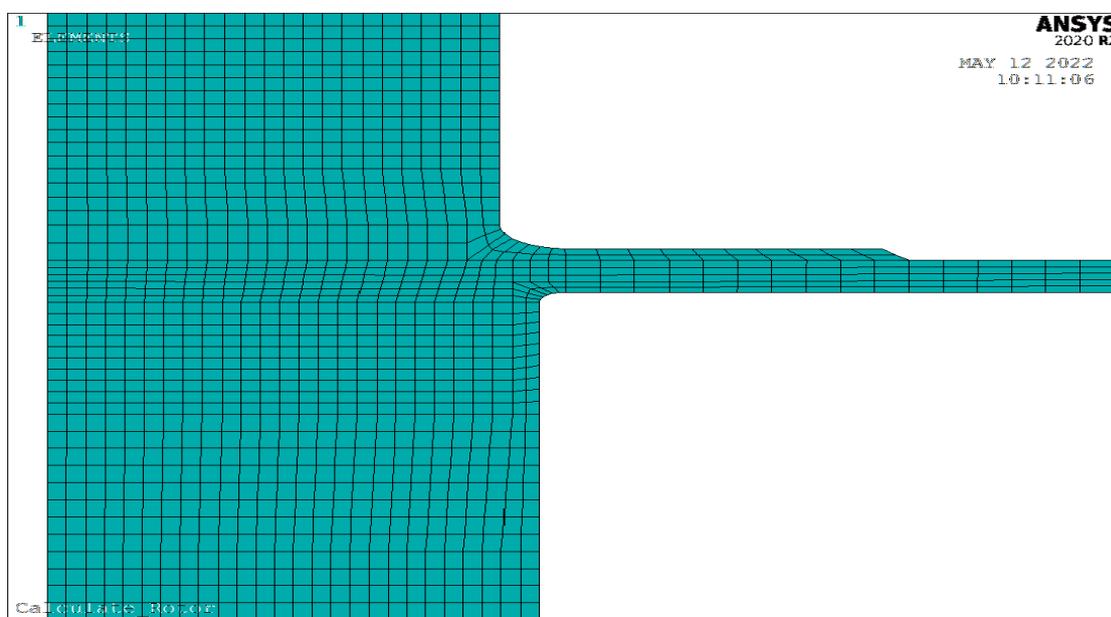
Расчетная объемная осесимметричная конечноэлементная модель ротора высокого давления, учитывающая его конструктивные особенности и схему движения пара, представлена на рис. 1.

Пар в ЦВД движется сначала в сторону переднего подшипника (левый поток), затем совершает поворот на 180° и направляется между корпусами в ступени правого потока. Поэтому в модели оставлены первая и последняя (восьмая) ступени перед поворотом потока и последняя ступень после поворота потока. Эти ступени определяют характер термонапряженного состояния ротора высокого давления. Первая, регулирующая, ступень при переменных режимах эксплуатации испытывает наибольшие напряжения в галтелях, как со стороны промежуточного уплотнения, так и со стороны проточной части. Турбина снабжена паровыми концевыми и промежуточными уплотнениями. Коэффициент концентрации тепловых канавок в уплотнениях рассчитывался в соответствии с РТМ 108.021.1093-85².

² РТМ 108.021.1093-85. Детали паровых стационарных турбин. Расчет на малоцикловую усталость. Утв. 13.09.1985 г. Введ. 01.07.1986 г. Л.: НПО ЦКТИ, 1985. 49 с.

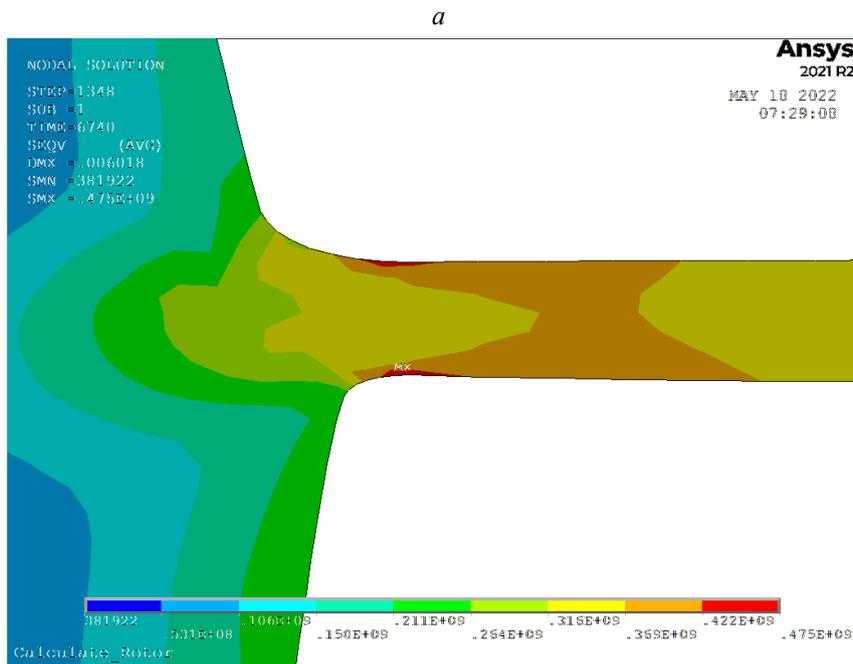
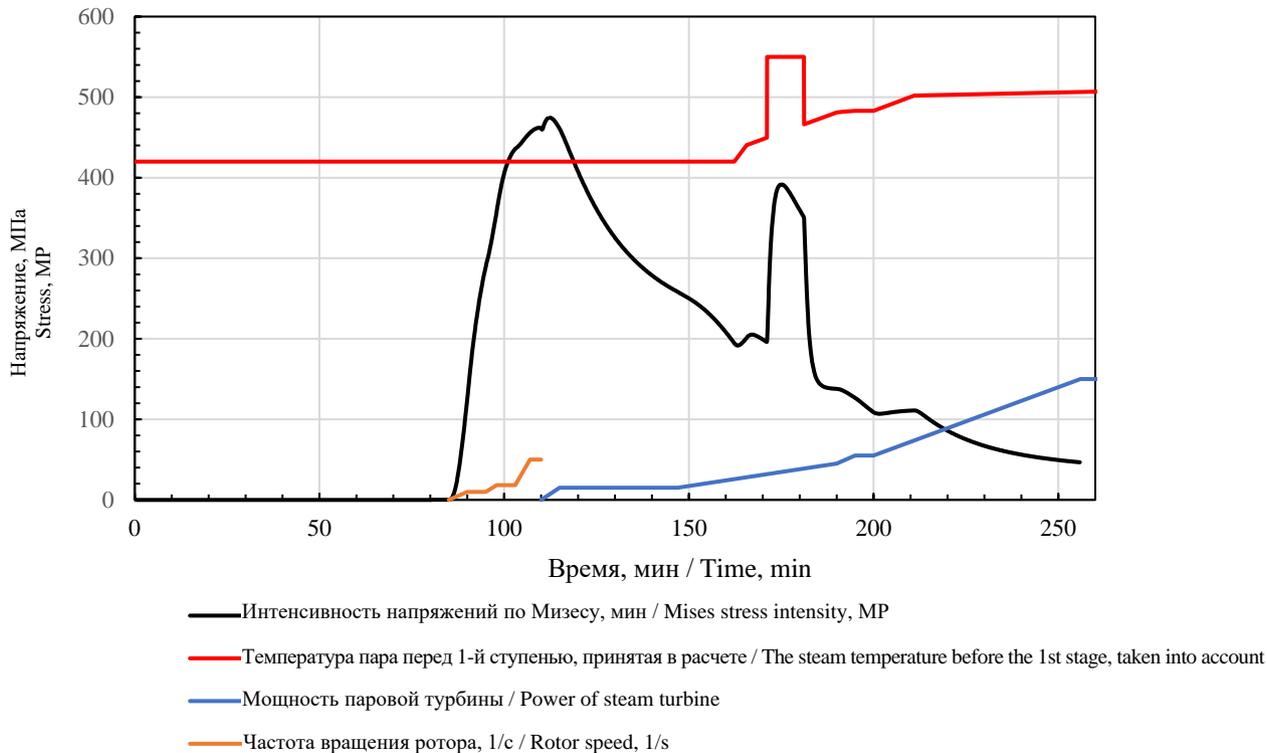


a



б

Рис. 1. Конечноеэлементная модель ротора высокого давления турбины Т-150-7,4:
а – общий вид модели; б – модель ротора в зоне регулирующей ступени
Figure 1. Finite element model of the T-150-7.7 turbine high-pressure rotor:
а – model view illustration; б – rotor model in the control stage zone



б

Рис. 2. Результаты расчета термических напряжений в роторе высокого давления турбины Т-125/150-7,7 при пуске из холодного состояния с превышением температуры пара перед первой ступенью на 100 °С:
 а – изменение значений интенсивности напряжений в галтели первой ступени со стороны промежуточного уплотнения;
 б – поле напряжений в галтелях первой ступени турбины Т-125/150-7,7 при пуске из холодного состояния
Figure 2. The results of the thermal stress calculation in the turbine T-125/150-7,7 high-pressure rotor during cold start-up with an excess of steam temperature before the first stage by 100 °С:
 а – change in the stress intensity values in the first stage fillet on the side of intermediate seal;
 б – the stress field in the turbine T-125/150-7,7 first stage during cold start-up

Зонами максимальных напряжений при нагружении и разгрузке являются галтели первой ступени и первый отсек промежуточного уплотнения. В расчетах учитывалось изменение температуры пара, протекающего через лабиринты уплотнений, за счет дросселирования и теплообмена с ротором при переменных режимах. Учет этого явления проводился по хорошо апробированной методике из [4]. Границы элементов выбраны таким образом, чтобы они совпадали с сечениями подвода или отвода пара, что позволяет учесть изменение температуры греющего пара (или воздуха).

Задача механики решалась в условиях закрепления в осевом направлении левого торца ротора турбины, правый торец был свободен.

Вал ротора высокого давления турбины, цельнокованный, изготовлен из стали 25Х1М1ФА (Р2МА). Теплофизические и механические свойства этой стали, принятые при расчете напряжений, заданы в соответствии с [5–7] линейно зависящими от температуры.

К числу критических с точки зрения малоциклового усталостной прочности элементов относится также поверхность центрального осевого канала, где велико влияние ползучести на номинальном режиме эксплуатации.

Как показали проведенные расчеты, при повышении температуры пара перед первой ступенью во время пуска из холодного состояния максимальные по абсолютной величине значения интенсивности напряжений возникают в галтели регулирующей ступени со стороны промежуточного уплотнения. Их величина составляет $\sigma_i = 475$ МПа. Результаты расчета представлены на рис. 2.

2. Расчет циклической прочности ротора

Расчет циклической прочности показал, что этим напряжениям соответствует 21 300 допускаемых циклов по теоретической кривой малоциклового усталости. Согласно СТО 70238424.27.100.016-2009³, оборудование парогазовых установок (ПГУ) (кроме газотурбинных установок, ГТУ) должно быть рассчитано на не менее чем 10 000 пусков-прерываний за весь срок службы. При этом ко-

личество пусков из холодного состояния должно составлять не менее 20 % от общего количества пусков. Полученное значение допускаемого числа пусков из холодного состояния с превышением на 100 °С температуры перед первой ступенью отвечает этим требованиям, и такое превышение параметров относительно графика-задания не подлежит оценке.

Отклонение температуры пара в 100 °С в течение 10 минут перед первой ступенью на этапе нагружения турбины, когда ротор уже достаточно прогрет привело к возникновению в галтели первой ступени напряжений, интенсивность которых равна 391,5 МПа. Допускаемое число таких режимов, как показали расчеты циклической прочности, составляет 22 200. Как и в предыдущем случае, такое превышение параметров по отношению к графику-заданию не подлежит оценке.

Что касается котлоагрегата, то был рассмотрен резкий прогрев или захлаживание на 100 °С и более температуры металла выходных коллекторов ВД. Число таких нарушений критерия пуска более 15 раз оценивается как неудовлетворительное.

Рассматривался выходной коллектор пароперегревателя высокого давления типоразмером 426×34 мм, широко применяемый в ПГУ-450, работающий при начальной температуре металла 50 °С, температуре пара 400 °С, которая поддерживается неизменной на протяжении двух минут, затем скачком температура пара повышается до 500 °С и поддерживается неизменной в течение 10 минут. Далее скачком температура пара понижается до исходного значения 400 °С.

В первом варианте расчета при начальном расходе пара 20 кг/с и давлении 3,5 МПа коэффициент теплоотдачи, рассчитанный по формуле теплоотдачи при турбулентном течении пара [8]

$$Nu = 0,021Re^{0,8}Pr^{0,43}, \quad (1)$$

где Nu – критерий Нуссельта

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda},$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); l – характерный размер, в данном случае внутренний диаметр, м; λ – коэффициент теплопроводности Вт/(м·К); Re – критерий Рейнольдса;

³ СТО 70238424.27.100.016-2009. Парогазовые установки. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования. Утв. и введ. в действие приказом НП «ИНВЭЛ» от 21.12.2009 г. № 94/3. Введ. 29.01.2010 г. М.: НП «ИНВЭЛ», 2009. 41 с.

$$Re = \frac{wd}{\nu},$$

где w – характерная скорость, м/с; ν – кинематическая вязкость среды, м²/с; d – гидравлический диаметр, м; Pr – критерий Прандтля, составивший $\alpha = 500\text{--}506$ Вт/(м²·К).

Максимальное значение амплитуды интенсивности напряжений при этом равно 167 МПа. Допустимое число таких режимов составляет 10 960, и данный режим не должен подлежать оценке.

Результаты расчета представлены на рис. 3 в виде зависимости от времени амплитуды интенсивности напряжений на внутренней поверхности коллектора, температур пара и металла.

Даже если принять значение коэффициента теплоотдачи $\alpha = 1000$ Вт/(м²·К), то расчет циклической прочности показал, что допустимое количество таких скачкообразных изменений температуры пара на начальных этапах пуска

составляет 3354, что отвечает требованиям к маневренности парогазовых установок и не должно подлежать оценке.

Если рассмотреть график-задание пуска ПГУ-450 из холодного состояния (рис. 4) и принять, что скачкообразный подъем температуры происходит в процессе пуска в интервале от 450 до 490 °С с последующей выдержкой при этой температуре в течение 10 минут и скачкообразным снижением температуры до исходного значения 450 °С, а также что начальная температура металла составила 440 °С, рассчитанный коэффициент теплоотдачи равен $\alpha = 1010$ Вт/(м²·К), что соответствует расходу пара, равному 0,7 от номинального значения $G = 65$ кг/с, давлению $p = 5,39$ МПа, то максимальное значение амплитуды интенсивности напряжений – 35,7 МПа. Число таких режимов не ограничено и оценке подлежать не должно.

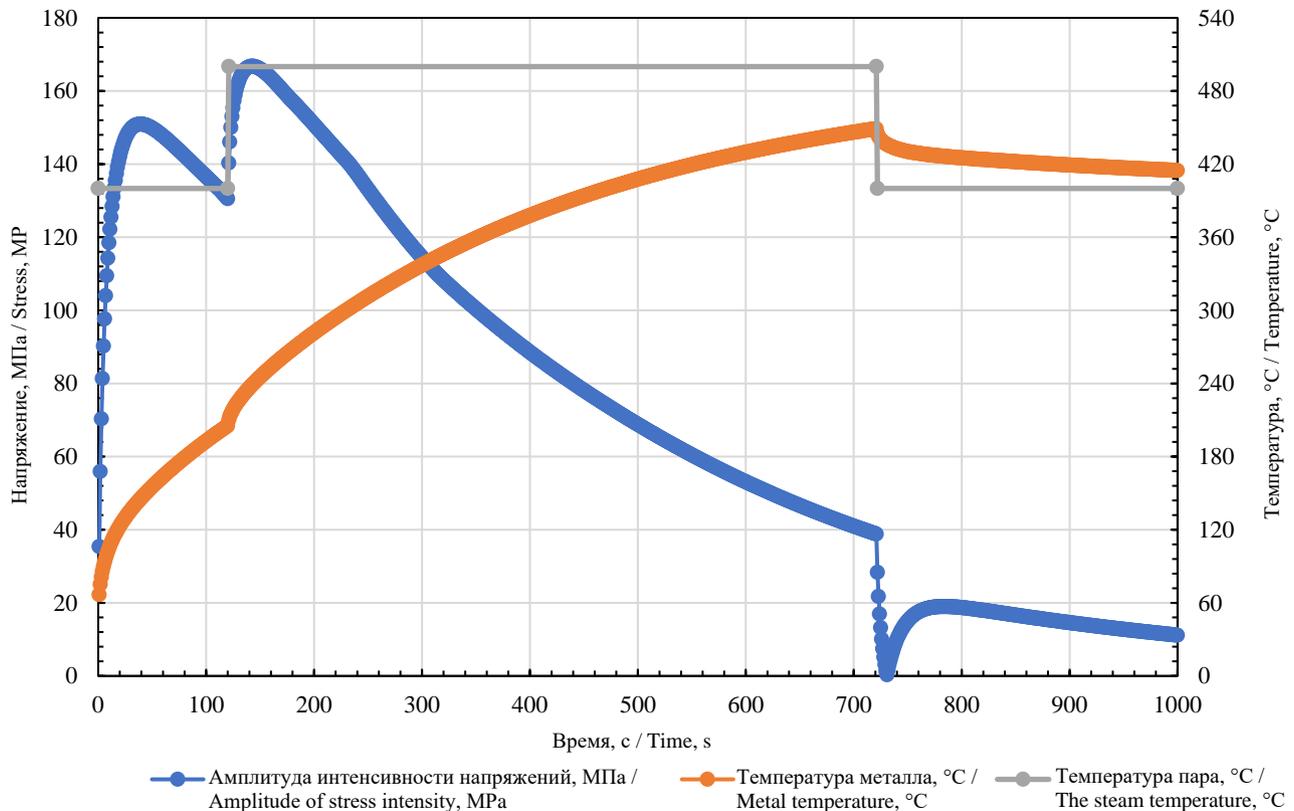


Рис. 3. Результаты расчета термонапряженного состояния выходного коллектора пароперегревателя ВД типоразмера 426×34 со скачкообразным повышением температуры

Figure 3. The results of the HP superheater output header of size 426×34 thermal stressed state calculation with a temperature spike

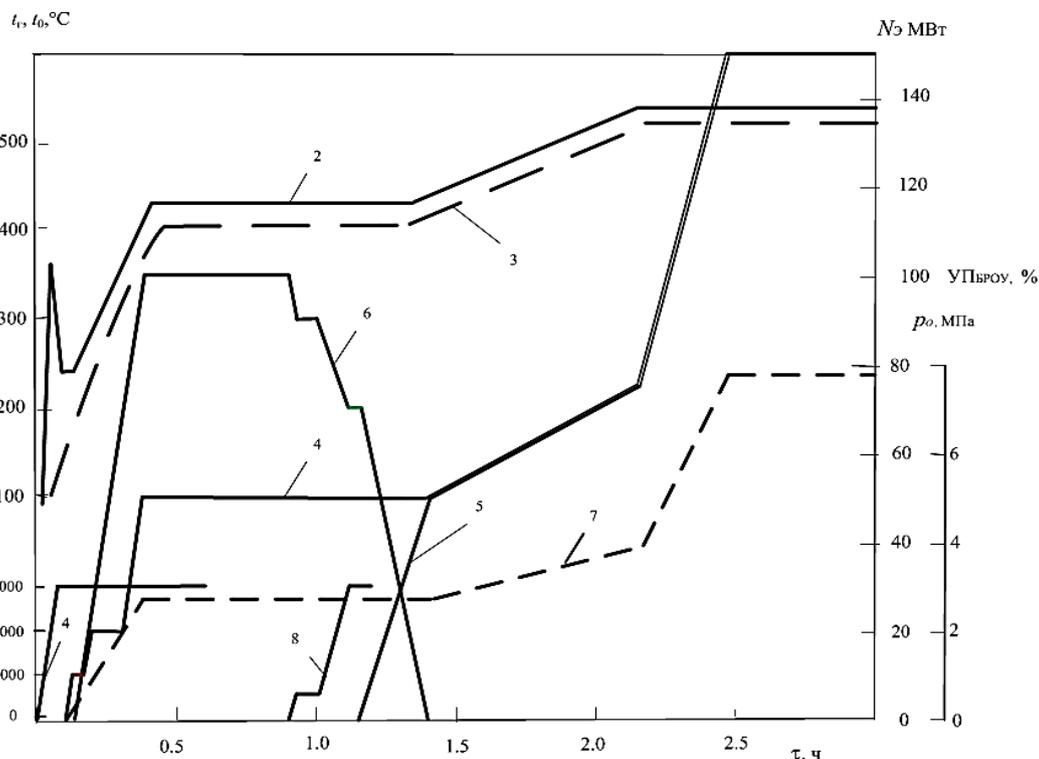


Рис. 4. График-задание пуска ПГУ-450 из холодного состояния:

1 – частота вращения ротора ГТ, 1/мин; 2 – температура газов за ГТУ, °С; 3 – температура свежего пара, °С; 4 – мощность ГТУ, МВт; 5 – мощность ПТ, МВт; 6 – индикатор положения БРОУ; 7 – давление свежего пара, кг/см²; 8 – частота вращения ротора ПТ, 1/мин

Figure 4. CCGP-450 cold start-up schedule:

1 – GT rotor speed, 1/min; 2 – gas temperature of gas turbine downstream, °C; 3 – live steam temperature, °C; 4 – gas turbine power, MW; 5 – steam turbine power, MW; 6 – bypass station position indicator; 7 – live steam pressure, kg/cm²; 8 – steam turbine rotor speed, 1/min

Заключение

Подводя итог всему, можно сделать следующие выводы:

1. Оценка качества проведения пусковых режимов должна проводиться на основе расчета циклической прочности критических элементов энергоустановки. Выставление оценок по превышению значений контрольных параметров без учета конкретного времени возникновения этого превышения по отношению к графику-заданию, температурного состояния рассматриваемого элемента, расхода пара и т. д. не позволяет судить о выполнении критериев надежности.

2. Наиболее точная оценка качества проведения режима может быть получена посредством мониторинга работы турбины и котлоагрегата и автоматического управления работой энергоустановки по термонапряженному состоянию ее критических элементов. Это позволит не только контролировать соблюдение критериев надежности, но и не допустить их превышения.

Список литературы

1. Jackson P.S., Moelling D.S., Anderson F.C., Mailoy J.W. Operating experience of large reheat HRSG's in merchant service // Proceedings of POWER-GEN International. Orlando: POWER-GEN International, 2004. 32 p. URL: https://tetra-eng.com/PDF/Papers/paper_OPERATINGEXPERIENC E.pdf (дата обращения: 22.05.2022)
2. Богачев А.Ф., Радин Ю.А., Герасименко О.Б. Особенности эксплуатации и повреждаемость котлоутилизаторов бинарных парогазовых установок. М.: Энергоатомиздат, 2008. 231 с.
3. Boiler codes require updating to address failure mechanisms exacerbated by cycling // Combined Cycle Journal. 2006, First Quarter.
4. Плоткин Е.Р., Лейзерович А.Ш. Пусковые режимы паровых турбин энергоблоков. М.: Энергия, 1980. 192 с.
5. Либерман Л.Я., Пейсихис М.Н. Свойства сталей и сплавов, применяемых в котлотурбостроении: в 3 т. Л.: ЦКТИ, 1966–1967.
6. Зубченко А.С., Колосков М.М., Каширских Ю.В., Астахов Ю.И., Голеньшина Л.Г., Григорьева Н.Н., Гудков В.Н., Десярев А.Ф., Долбенко Е.Т., Жаров В.В.,

Кириллова О.М., Клауч Д.Н., Кузнецов Е.В., Меньшова Н.Ф., Митина Е.Н., Петропавловская З.Н., Русинова И.Н., Рязанова Е.Д., Скоробогатых В.Н., Томина С.П., Тыкочинская Т.В., Шиrolapova Т.Б. Марочник сталей и сплавов / под общ. ред. А.С. Зубченко. М.: Машиностроение, 2003. 784 с.

7. Неймарк Б.Е. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике: справочник. М. – Л.: Энергия, 1967. 240 с.

8. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 343 с.

References

1. Jackson PS, Moelling DS, Anderson FC, Mailoy JW. Operating experience of large reheat HRSG's in merchant service. *Proceedings of POWER-GEN International*. Orlando: POWER-GEN International; 2004. Available from: https://tetra-eng.com/PDF/Papers/paper_OPERATINGEXPERIENC E.pdf (accessed: 05/22/2022)

2. Bogachev AF, Radin YuA, Gerasimenko OB. *Features of operation and damage of heat recovery boilers*

of binary combined-cycle gas installations. Moscow: Energoatomizdat Publ.; 2008. (In Russ.)

3. Boiler codes require updating to address failure mechanisms exacerbated by cycling. *Combined Cycle Journal*. 2006, First Quarter.

4. Plotkin ER, Lazerovich AS. *Starting modes of steam turbines of power units*. Moscow: Energiya Publ.; 1980. (In Russ.)

5. Lieberman LYa, Peisikhis MN. *Properties of steels and alloys used in boiler-turbine construction*. Leningrad: CKTI Publ.; 1966–1967. (In Russ.)

6. Zubchenko AS, Koloskov MM, Kashirskikh YuV, Astakhov YuI, Golenypina LG, Grigorieva NN, Gudkov VN, Degtyarev AF, Dolbenko ET, Zharov VV, Kirillova OM, Klauch DN, Kuznetsov EV, Menshova NF, Mitina EN, Petropavlovsk ZN, Rusinova IN, Ryazanova ED, Skorobogatykh VN, Tomina SP, Tykochinskaya TV, Shirolapova TB. *Steel and alloy grader* (A.S. Zubchenko, Ed.). Moscow: Mashinostroeniye Publ.; 2003. (In Russ.)

7. Neymark BE. *Physical properties of steels and alloys used in power engineering: handbook*. Moscow, Leningrad: Energiya Publ.; 1967. (In Russ.)

8. Mikheev MA, Mikheeva IM. *Fundamentals of heat transfer*. Moscow: Energiya Publ.; 1977. (In Russ.)

Сведения об авторах

Радин Юрий Анатольевич, доктор технических наук, главный специалист службы вибродиагностики и наладки, Инженерное управление, ПАО «Мосэнерго», Российская Федерация, 119526, Москва, пр-кт Вернадского, д. 101, корп. 3; заведующий кафедрой энергетического машиностроения, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0009-0008-5895-5578, Scopus Author ID: 6602835955, eLIBRARY SPIN-код: 7058-4682; RadinYA@mosenergo.ru

Конторович Татьяна Савельевна, кандидат технических наук, ведущий специалист, Инженерное управление, ПАО «Мосэнерго», Российская Федерация, 119526, Москва, пр-кт Вернадского, д. 101, корп. 3; ORCID: 0009-0009-0084-2674, Scopus Author ID: 6505938504, eLIBRARY SPIN-код: 4894-0720; kontorovich_ts@mail.ru

Мнацаканян Виктория Умедовна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры горного оборудования, транспорта и машиностроения, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Российская Федерация, 119049, Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1; ORCID: 0000-0001-9276-7599, Scopus Author ID: 6603501339, eLIBRARY SPIN-код: 8693-8313; artvik@bk.ru

About the authors

Yuri A. Radin, Doctor of Sciences (Techn.), chief specialist of the vibration diagnostics and adjustment service, Engineering Department, Joint-Stock Company for Power and Electrification “Mosenergo”, 101 Prospekt Vernadskogo, bldg 3, Moscow, 119526, Russian Federation; Head of the Department of Power Engineering, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0009-0008-5895-5578, Scopus Author ID: 6602835955, eLIBRARY SPIN-code: 7058-4682; RadinYA@mosenergo.ru

Tatiana S. Kontorovich, PhD, chief specialist, Engineering Department, Joint-Stock Company for Power and Electrification “Mosenergo”, 101 Prospekt Vernadskogo, bldg 3, Moscow, 119526, Russian Federation; ORCID: 0009-0009-0084-2674, Scopus Author ID: 6505938504, eLIBRARY SPIN-code: 4894-0720; kontorovich_ts@mail.ru

Victoria U. Mnatsakanyan, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Mining Equipment, Transport and Mechanical Engineering, National Research Technological University “MISIS”; 4 Leninskii Prospekt, bldg 1, Moscow, 119049, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-9276-7599, Scopus Author ID: 6603501339, eLIBRARY SPIN-code: 8693-8313; artvik@bk.ru