

УДК 620.179.14

Н.Г. ШУЛЬЖЕНКО<sup>1</sup>, Н.Г. ГАРМАШ<sup>1</sup>, В.П. ГОНТАРОВСКИЙ<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков<sup>2</sup>ПАО Харьковская ТЭЦ-5, Харьков, Украина

## ОЦЕНКА ЩАДЯЩИХ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТУРБИНЫ ПО ТЕРМОНАПРЯЖЕННОМУ СОСТОЯНИЮ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО РОТОРА

Проведена оценка термонапряженного состояния высокотемпературного ротора высокого давления турбины Т-250/300-240 на различных пусковых и переходных режимах его эксплуатации с помощью разработанной компьютерной системы диагностики. На основе оценки срабатывания ресурса ротора от малоциклового усталости определены щадящие режимы эксплуатации турбины. При этом значительно снижается уровень интенсивности напряжений и повреждаемости материала, возникающих в наиболее напряженных зонах ротора. Результаты исследований позволяют разработать рекомендации по проведению пуско-остановочных режимов турбин.

**Ключевые слова:** ресурс, ротор, турбоагрегат, повреждаемость, малоцикловая усталость, термоупругость, ползучесть.

### Введение

Разработана компьютерная система диагностики термонапряженного состояния и оценки срабатывания ресурса ротора высокого давления (РВД) на фактических режимах работы турбоагрегата Т-250/300-240, определяемых по архивированным параметрам АСУ ТП [1]. Программный комплекс позволяет получить характеристики пара и условия теплообмена по ступеням и уплотнениям ротора турбины, которые используются при решении нестационарных задач теплопроводности и термоупругости с автоматизированным выбором временных шагов. Затем определяется поврежденность материала от малоциклового усталости и ползучести за все время работы турбоагрегата.

### Основной материал

При работе системы диагностики используются следующие технологические параметры АСУ ТП:

- скорость вращения ротора  $\omega$ , рад/с;
- температура острого пара  $T_p$ , °С;
- давление острого пара  $P_p$ , атм;
- мощность турбогенератора  $N$ , МВт;
- расход острого пара при работе турбины в теплофикационном режиме  $G$ , кг/с;
- температура в стационарном коллекторе  $T_k$ , °С;
- давление в стационарном коллекторе  $P_k$ , атм;
- давление вакуума в конденсаторе  $P_w$ , атм.

Анализ термонапряженного состояния и срабатывания ресурса ротора от малоциклового усталости и ползучести осуществляется в восьми наиболее нагруженных зонах РВД (рис. 1), которые определены по результатам ранее проведенных исследований [2].

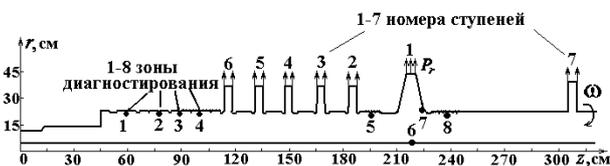


Рис. 1. Расчетная схема РВД

Система диагностики снабжена графическим интерфейсом, показывающим на экране монитора изменение во времени используемых параметров АСУ ТП, а также распределение температур и эквивалентных напряжений в зонах диагностирования. Система может использовать не только архивированные параметры АСУ ТП, но и заданные в виде таблиц зависимости, аппроксимирующие гипотетические изменения параметров по кусочно-линейным законам. Это позволяет оценить влияние возможных режимов эксплуатации на срабатывание ресурса.

В качестве примера рассмотрены инструкционные режимы расхолаживания турбоагрегата перед остановом на ремонт (рис. 2), пуск турбоагрегата из холодного состояния, останов турбоагрегата без срыва вакуума и пуск его из горячего состояния после простоя в течении 3,7 часов.

Для уменьшения уровня эквивалентных напря-

жений и срабатывания ресурса, после анализа расчетных данных, указанные режимы были скорректированы и с ними получены следующие результаты.

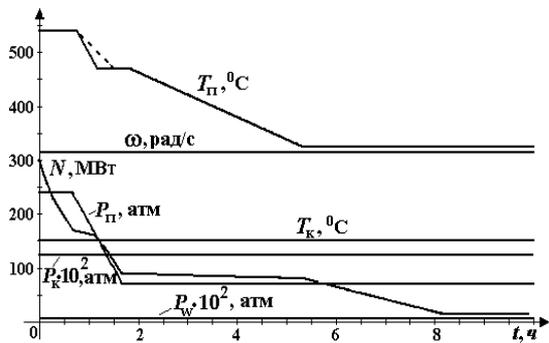


Рис. 2. Распределение технологических параметров при расхолаживании турбоагрегата

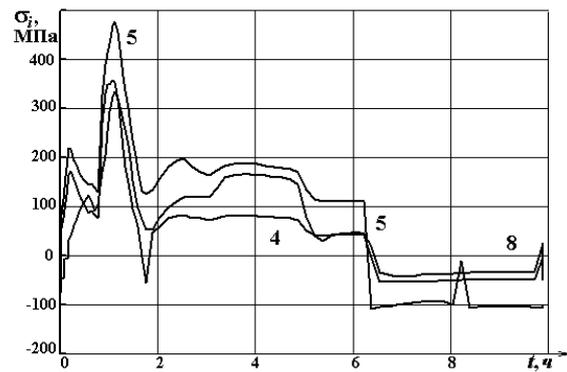
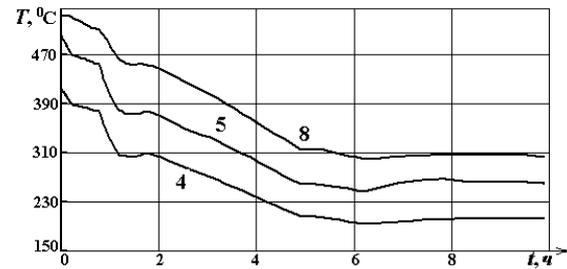
На рис. 3 приводятся данные моделирования расхолаживания турбоагрегата. Распределение температур и эквивалентных напряжений в точках диагностирования 4, 5, 8 при соблюдении нормативных зависимостей для технологических параметров представлено на 3, а. В других точках получены результаты, близкие к приведенным.

Снижение максимальных эквивалентных напряжений с 470 до 360 МПа (см. рис. 3, б) достигается уменьшением скорости падения температуры острого пара (показано пунктиром на рис. 2). Если в начальном варианте наблюдалась повреждаемость  $45 \cdot 10^{-6}$  без учета запаса и  $224 \cdot 10^{-6}$  с учетом запаса, то на шадящем режиме повреждаемость, вызванная малоцикловой усталостью, была незначительной по сравнению с указанной.

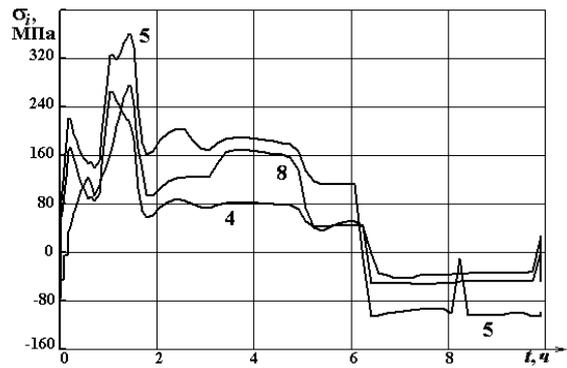
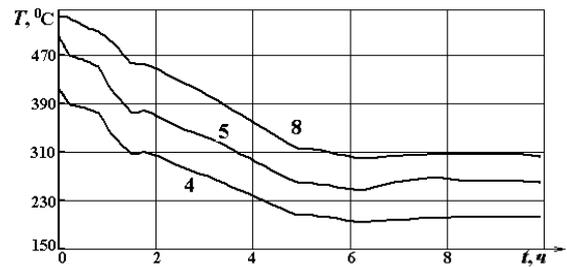
Изменение технологических параметров при пуске турбины из холодного состояния показано на рис. 4. Распределение температур и эквивалентных напряжений в точках диагностирования 1, 5, 8 представлено на рис. 5. При нормативных значениях технологических параметров (рис. 4, а) максимальные напряжения наблюдаются в канавках внутреннего уплотнения (т. 8) и уплотнения между первой и второй ступенями (т. 5) после толчка ротора (рис. 5, а).

Графики распределения параметров при пуске из холодного состояния были скорректированы для оценки шадящих режимов (рис. 4, б). Время прогрева уплотнений сокращено на один час, поскольку температура после часового прогрева изменяется мало. Температура пара при толчке ротора была понижена на 12 °С, на 1 час сокращен выстой турбины на холостом ходу, а также увеличена скорость набора мощности. При этом время пуска сократилось еще на один час. Результаты расчетов для этого пускового режима показаны на рис. 5, б. Отметим,

что максимальное число пусков из холодного состояния по нормативному графику составляет 660, по предложенному – 845 и определяется уровнем напряжений в канавках внутреннего уплотнения.



а



б

Рис. 3. Распределение температур и напряжений при расхолаживании турбоагрегата: а – заданные параметры; б – скорректированные

Несмотря на сокращение времени пуска турбины на три часа, максимальные эквивалентные напряжения уменьшились на 100 МПа за счет снижения температуры острого пара при толчке ротора. Если бы начальная температура ротора была близка 60 °С, уровень напряжений был бы еще меньше.

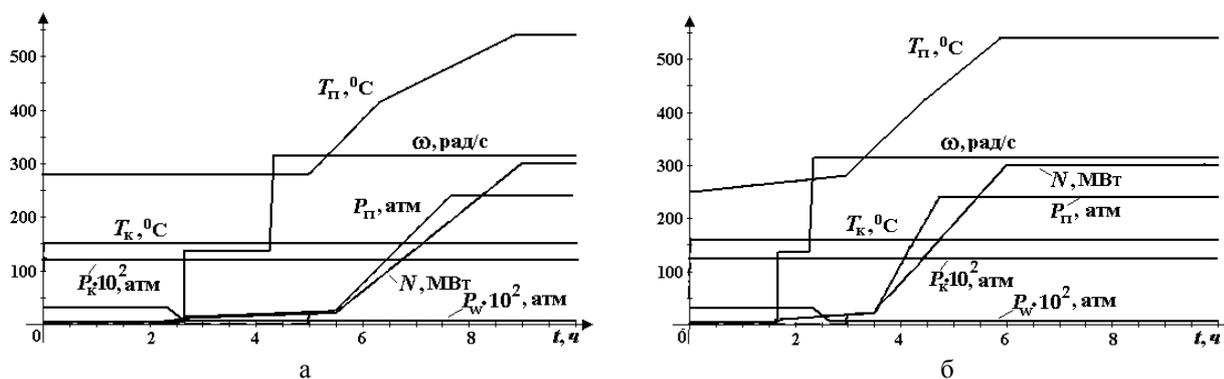


Рис. 4. Распределение технологических параметров при пуске турбины из холодного состояния:  
а – нормативное; б – скорректированное

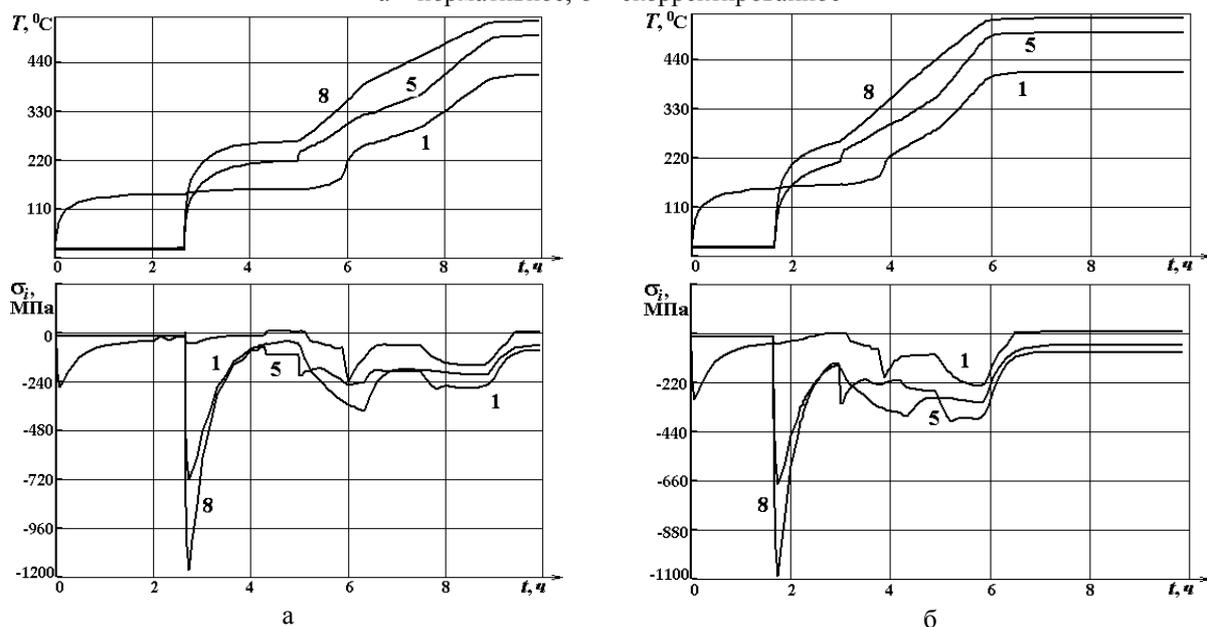


Рис. 5. Распределение температур и напряжений при пуске турбины из холодного состояния:  
а – заданные параметры; б – скорректированные

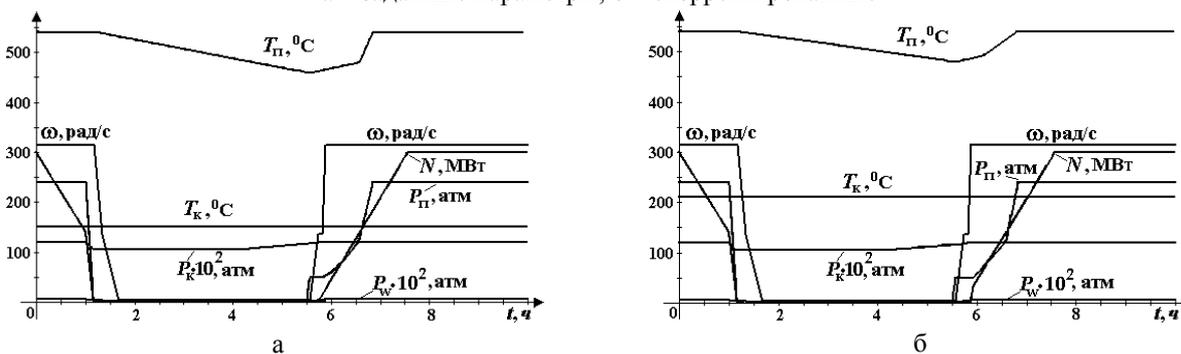


Рис. 6. Распределение технологических параметров при пуске турбины из горячего состояния:  
а – нормативное; б – скорректированное

На рис. 6 показаны инструкционные графики изменения технологических параметров при останове турбоагрегата без срыва вакуума и при пуске из горячего состояния. Распределение температур и эквивалентных напряжений в точках диагностирования 1, 4, 5, 8 представлено на рис. 7. За счет снижения температуры пара при его дросселировании во время останова (рис. 6, а), а затем при захолажи-

вании участка уплотнения в зоне 1 паром из коллектора, на дне этой канавки возникают растягивающие эквивалентные напряжения 510 МПа (рис. 7, а).

В канавках зоны 5 возникают максимальные растягивающие напряжения (за счет пониженной температуры острого пара и ее дальнейшего снижения за счет дросселирования). Затем при наборе мощности напряжения становятся сжимающими и

достигают – 450 МПа. В случае повышения температуры пара в коллекторе до 210 °С и увеличения температуры острого пара во время пуска на 15 °С при скорректированном изменении технологических

параметров (рис. 6, б) максимальные значения напряжений снижаются в зонах 1 и 5 более чем на 100 МПа (рис. 7, б). Это уменьшает повреждаемость материала от малоциклового усталости в 2 раза.

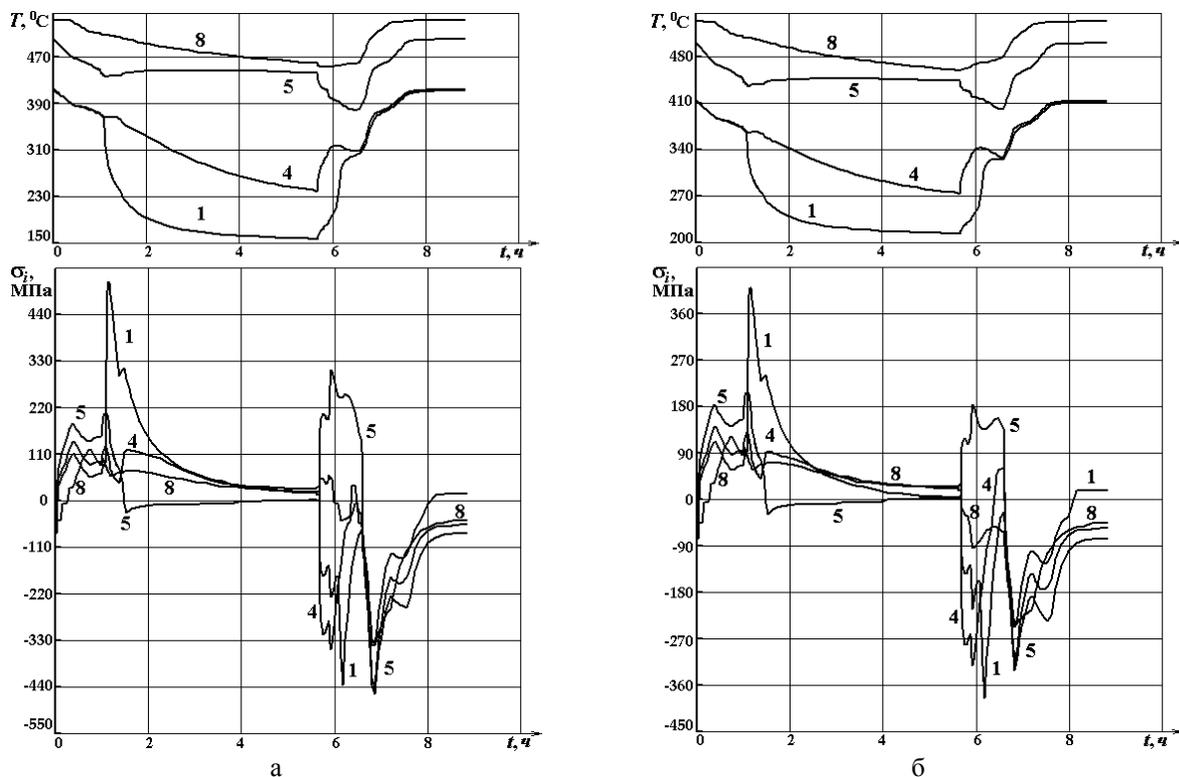


Рис. 7. Распределение температур и напряжений при пуске турбины из горячего состояния:  
а – заданные параметры; б – скорректированные

Максимальное число остановов без срыва вакуума и пусков из горячего состояния лимитируется повреждениями в канавках первой зоны переднего концевое уплотнения и для нормативного режима составляет 6370, а для рекомендованного – 15000 пусков.

Анализ изменения параметров АСУ ТП на работающей турбине Т-250/300-240 Харьковской ТЭЦ-5 показал, что зачастую при снижении мощности температура пара в коллекторе повышается до 210–240 °С (или остается неизменной). Даже при глубокой разгрузке рабочий пар в уплотнении вытесняет пар, поступающий из коллектора, поэтому его температура не влияет на напряжения при сбросе-набросе мощности. При останове турбоагрегата без срыва вакуума желательно, чтобы температура пара в коллекторе была более высокой.

Повреждаемость материала при регулировании мощности зависит от скорости ее изменения и от глубины разгрузки. При рекомендованных заводом скоростях изменения мощности (для первых 50 МВт – 7,5 МВт/мин, а далее – 1,75 МВт/мин) повреждаемость материала практически отсутствует. При глубокой разгрузке с 300 до 140 МВт макси-

мальная повреждаемость материала наблюдается в пятой зоне диагностирования (при скоростях изменения мощности 7,5 МВт/мин может быть 4600 циклов, при глубине разгрузки 100 МВт – до 10000 циклов). Повреждаемостью материала в канавках переднего концевое уплотнения при регулировании мощности даже с глубокими разгрузками можно пренебречь.

Отметим, что при оценке повреждаемости материала от малоциклового усталости за указанные периоды не учитывалась вся предыдущая история деформирования материала.

Основной вклад в повреждаемость вносят максимальные размахи эквивалентных напряжений в цикле. В публикациях ВТИ [3] отмечалось, что рекомендованные инструкционные пуско-остановочные режимы являются перестраховочными. В настоящее время не пересмотрены нормативные документы с целью совершенствования требований к проведению пуско-остановочных режимов. Накопление данных по срабатыванию ресурса в реальных условиях эксплуатации турбоагрегата и осуществление подобных расчетных исследований позволит предложить рекомендации по улучшению

пуско-остановочных режимов паровых турбин и сокращению их длительности, что может привести к значительной экономии топлива.

### Литература

1. Гонтаровський, В.П. Автоматизація визначення режимів роботи турбіни Т-250/300-240 за даними АСУ ТП [Текст] / В.П. Гонтаровський, Ю.Г. Єфремов, Н.Г. Гармаш // Десятий міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові: пра-

ці. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2011. – С. 32 – 34.

2. Шульженко, Н.Г. Задачі термочинності, вибродіагностики і ресурса енергоагрегатів (моделі, методи, результати досліджень) [Текст]: моногр. / Н.Г. Шульженко, П.П. Гонтаровський, Б.Ф. Зайцев. – Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG, 2011. – 370 с. – Напечатано в Росії.

3. Плоткин, Е.Р. / Пусковые режимы паровых турбин энергоблоков [Текст] / Е.Р. Плоткин, А.Ш. Лейзерович. – М.: Энергия, 1980. – 192 с.

Поступила в редакцию 1.06.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук Б.Ф. Зайцев, Институт проблем машиностроения НАН Украины, Харьков Украина.

### ОЦІНКА ЩАДНИХ РЕЖИМІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТУРБИНИ ПО ТЕРМОНАПРУЖЕНОМУ СТАНУ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО РОТОРА

*М.Г. Шульженко, Н.Г. Гармаш, В.П. Гонтаровський*

Проведено оцінку термонапруженого стану високотемпературного ротора високого тиску турбіни Т-250/300-240 на різних пускових та перехідних режимах його експлуатації за допомогою розробленої комп'ютерної системи діагностики. На основі оцінки виробітку ресурсу ротора від малоциклової втоми визначені щадні режими експлуатації ротора турбіни. При цьому значно знижується рівень інтенсивності напружень та пошкоджуваності матеріалу, що виникають у найбільше напружених зонах ротора. Результати досліджень дозволяють розробити рекомендації по проведенню пуско-зупинних режимів турбін.

**Ключові слова:** ресурс, ротор, турбоагрегат, пошкодженість, малоциклова втома, термопружність, повзучість.

### THE ESTIMATION OF PARTIAL LOAD MODES EXPLOITATION OF TURBINES ON THE THERMOSTRESSED STATE OF THE HIGH-TEMPERATURE ROTOR

*N.G. Shulzhenko, N.G. Garmash, V.P. Gontarowsky*

The estimation of a thermostressed state of a high-temperature rotor of a high pressure of turbine Т-250/300-240 is spent at different starting and transient regimes of its operation with help of the developed computer system of diagnostic. By means an estimation of operation of a resource of a rotor from low-cycle fatigue conditions of partial load modes exploitation of the turbine are defined. Level of intensity of stresses and damageability of the material in the most strained zones is considerably downgraded. Results of researches can be used at development of recommendations about conducting of pusk-stopping regimes of turbomachineries.

**Key words:** resource, rotor, the turbomachinery, damageability, low-cycle fatigue, thermoelasticity, creep.

**Шульженко Николай Григорьевич** – доктор технических наук, зав. отделом вибрационных и термочинностных исследований института проблем машиностроения НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: shulzh@ipmach.kharkov.ua.

**Гармаш Наталия Григорьевна** – кандидат технических наук, научный сотрудник отдела вибрационных и термочинностных исследований института проблем машиностроения НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: garm\_n@ipmach.kharkov.ua.

**Гонтаровский Владимир Павлович** – зам. нач. рем. цеха ПАО "Харьковская ТЭЦ-5", Харьков, Украина.