

И. Н. Бабаев, к. т. н., нач. отдела регулирования (ПАО «Турбоатом», г. Харьков, Украина),  
Л. В. Колодяжная, д. т. н., в. н. с, В. Н. Голощапов, к. т. н., с. н. с, А. И. Бабаев, аспирант (Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, г. Харьков, Украина)

## Малозатратная реконструкция регулирующего клапана турбины К-200-130 в межремонтный период эксплуатации

Представлен вариант малозатратной реконструкции регулирующего клапана № 2 с глубокой торцевой подрезкой основной запорной чаши цилиндра высокого давления турбины К-200-130. Приведен сравнительный анализ конструкции клапанов. Показаны результаты численного исследования течения в проточной части клапана штатной и новой конструкции. Приведены соответствующие поля газодинамических параметров вдоль клапанного канала. На основании комплексного анализа сделан вывод о том, что регулирующий клапан новой конструкции является более надежным и экономичным, а также требует замены минимального количества деталей.

**Ключевые слова:** регулирующий клапан, парораспределение, паровая турбина.

Представлено варіант маловитратної реконструкції регулюючого клапану № 2 циліндра високого тиску турбіни К-200-130. Наведено порівняльний аналіз конструкцій клапанів. На підставі комплексного аналізу зроблено висновок про те, що регулюючий клапан нової конструкції є більш надійним та економічним, а також потребує заміни мінімальної кількості деталей.

**Ключові слова:** регулюючий клапан, паророзподіл, парова турбіна.

The low-cost modernization of the control valve No. 2 of high pressure cylinder of turbine K-200-130 is considered in the article. The comparative analysis of valve designs is considered. The results of a numerical investigation of the flow motion through the flow part of the regular valve design and new valve design are shown. The corresponding fields of gas-dynamic parameters along the valve channel are shown. Based on the complex analysis, it is concluded that the new control valve design is more reliable and aerodynamically perfect, and also requires the replacement of a minimum amount of details.

**Keywords:** control valve, steam distribution, steam turbine.

### Постановка проблемы в общем виде

В настоящее время на электростанциях Украины установлено 43 энергоблока мощностью 200 МВт [1]. Для регулирования подачи пара к турбине в части высокого давления установлены регулирующие клапаны (РК) «второй модификации» с глубокой торцевой подрезкой основной запорной чаши [2]. Аналогичная конструкция чаши РК использована также на турбинах К-800-240 АМЗ [3,4].

Отличительными особенностями конструкции РК данного типа (см. рис. 1) являются:

- сферический профиль основной запорной чаши клапана 2 с глубокой торцевой подрезкой, призванной фиксировать точку отрыва потока и обеспечивать стабильную структуру течения во всем диапазоне его эксплуатации;
- наличие перепускных окон в буксе 4 и гильзе 3 для увеличения подгрузки чаши 2 клапана при малых перепадах давлений;
- отсутствие изнашиваемых уплотнительных поршневых колец между гильзой 3 и буксой 4;
- наличие конического перехода от цилиндрической части штока 5 к его головке, для снижения концентрации напряжений в точке их сопряжения;
- для исключения передачи поперечных вибраций чаши 2 на шток 5 радиальный зазор между гильзой 3 и буксой 4 выполнен меньше зазора между штоком 5 и гильзой 3.

При этом, упомянутые конструктивные особенности клапана не гарантируют отсутствие отказов. За период 2015-2016 года эксплуатации турбоустановок Кура-

ховской ТЭС имелись многократные случаи внеплановых остановов энергоблоков, вследствие обрыва штоков РК.

Установлено, что основными причинами поломок являются механическое заедание и вибрационная неустойчивость чаши клапана. Увеличению вероятности обрыва штоков также способствует кинематическая схема системы парораспределения, у которой один главный сервомотор (ГСМ) является приводом для всех РК высокого и среднего давления. В случае заедания деталей одного из РК, усилия ГСМ оказывается достаточ-

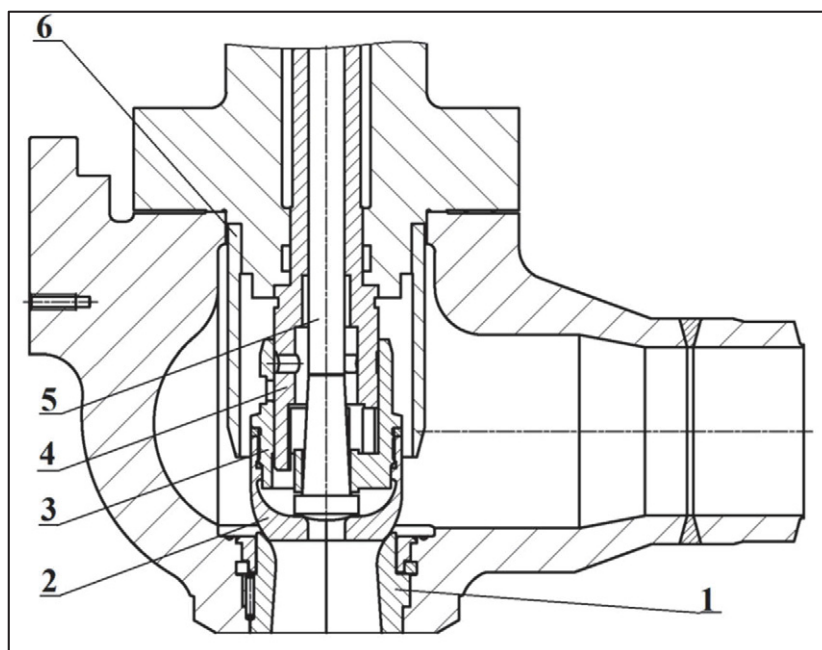


Рис. 1. Регулирующий клапан №2 цилиндра высокого давления турбины К-200-130

ным для разрушения штока клапана.

**Анализ последних исследований и публикаций**

В настоящее время исследователями разработан ряд конструктивных мероприятий, направленных на повышение надежности как самого РК, так и последующих элементов паротурбинной установки:

- оптимальное профилирование клапанного канала [4, 5];
- использование перфорированных поверхностей [4];
- использование диффузионных седел с клиновидным оребрением [5];
- использование конструкции направляющего стакана РК с непроницаемым экраном [6] и т.д.

Процесс реализации указанных конструктивных изменений требует значительных временных затрат на перепроектирование, изготовление и проведение монтажных работ.

**Формулировка целей статьи**

При наличии неисправностей в межремонтный период эксплуатации энергоблока возникает необходимость в проведении малозатратной реконструкции.

Данное мероприятие должно обеспечить устранение возникшей неисправности, повысить надежность и экономичность при минимальном изменении конструкции в кратчайшие сроки реализации ремонта.

Целью данного исследования является определение подхода к проведению малозатратной реконструкции РК для случая наличия неисправностей в межремонтный период эксплуатации.

**Изложение основного материала**

В процессе поиска требуемого варианта реконструкции РК, необходимо учитывать следующие ограничения:

- 1) Ограничение по количеству варьируемых конструктивных параметров.

Как правило, замена корпуса паровой коробки и седла является дорогостоящим мероприятием и требует больших временных затрат на изготовление и проведение монтажных работ. Аэродинамическое совершенство клапанного канала, образованного седлом и чашей в большой степени определяет показатели экономичности и надежности всей конструкции.

- 2) Обеспечение пропускной способности клапана. Новая конструкция РК должна обеспечивать про-

пуск требуемого количества пара при проектном перепаде давления на нем.

- 3) Соответствие силовой характеристики клапана.

Распределение давлений вдоль тракта разгрузки, а также на профильной поверхности чаши определяет величину результирующего усилия, необходимого для перестановки запорного органа. Запаса усилий на ГСМ должно быть достаточно для его преодоления.

Исходя из вышеперечисленных ограничений, наиболее эффективным решением является замена профиля основной чаши клапана с дополнительной корректировкой тракта разгрузки.

В качестве исходных данных для комплексного расчета РК использованы результаты регистрации рабочих параметров турбины К-200-130 бл. 6 Кураховской ТЭС, полученные при её нагружении в 2015 году (см. рис. 2).

Поскольку данные регистрации рабочих параметров турбины не позволяют на прямую определить расход пара и перепад давления на РК, данные параметры определялись косвенно, по результатам расчета регулирующей ступени.

Методика определения основных параметров РК штатной конструкции и определение эффективности новой конструкции состояла из следующих этапов:

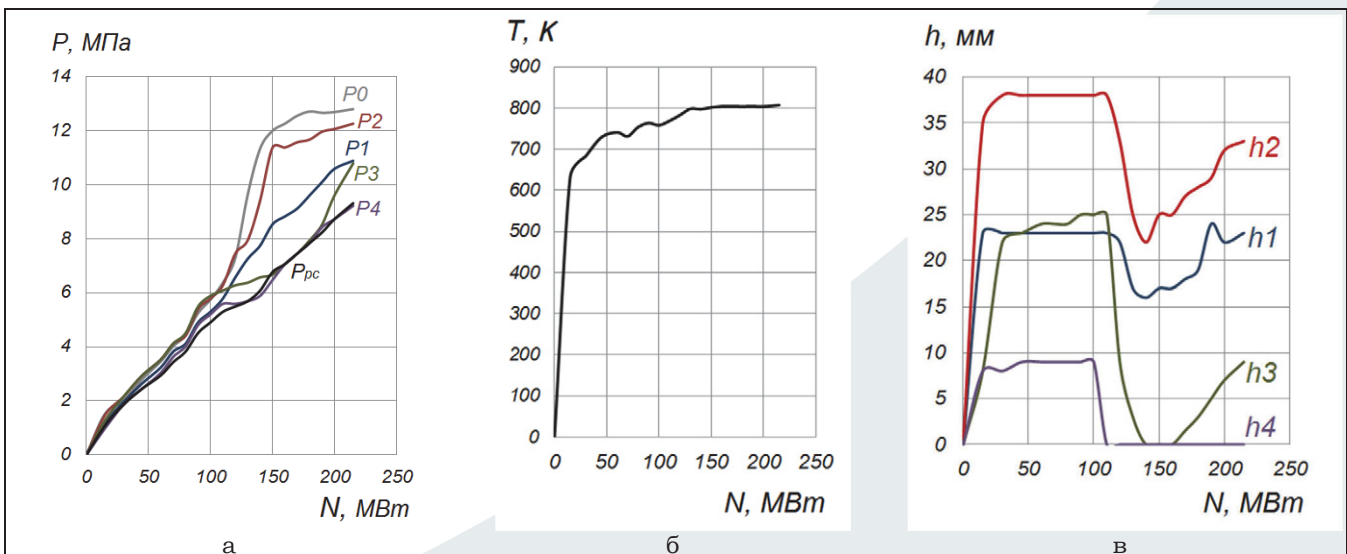
- 1) Определение расхода пара через соответствующий клапану сегмент сопел по известному перепаду давлений с учетом известной геометрии ступени.

Для определения расхода через соответствующий сегмент сопел в качестве граничных условий на входе принято давление за регулирующим клапаном и статическая энтальпия пара, определенная по давлению и температуре пара перед стопорным клапаном. В качестве граничных условий на выходе принято статическое давление в камере регулирующей ступени.

Расход пара через сегмент определен одномерным расчетом по известной формуле [7]

$$G_c = \frac{\chi}{\sqrt{P_0 V_0}} \cdot \varphi_c \cdot F_c \cdot \mu \cdot P_{pc}$$

где  $\chi = \sqrt{k \cdot \left(\frac{2}{k-1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$  – коэффициент среды;



**Рис. 2. Результаты регистрации рабочих параметров турбины К-200-130 бл.6 Кураховской ТЭС при нагружении (2015 г.):** а – изменение давления в тракте паровпуска турбины; б – изменение температуры пара турбиной; в – изменение подъемов штоков РК ЦВД; P0 – давление перед СК; P1 – давление за РК-1; P2 – давление за РК-2; P3 – давление за РК-3; P4 – давление за РК-4; Ppc – давление в камере регулирующей ступени; h1 – подъем штока РК-1; h2 – подъем штока РК-1; h3 – подъем штока РК-3; h4 – подъем штока РК-4.

$k$  – коэффициент изоэнтропы (для перегретого пара  $k=1,3$ );

$\varphi_c = 0,97$  – коэффициент расхода для сопел;

$F_c$  – проходная площадь соответствующего сегмента сопел;

$\mu = \frac{\beta_c}{\left(\frac{P_{pc}}{P_2}\right)}$  – поправочный коэффициент, определяющий изменение реактивности ступени и определяемый в процессе решения прямой задачи по известной геометрии ступени с полным подводом пара.

## 2) Определение перепада давления на клапан

Пренебрегая влиянием утечек пара вдоль штока клапана принимаем, что определенный на предыдущем этапе расход пара через соответствующий сегмент сопел равен расходу пара через соответствующий ему РК. На основании данного допущения выполняем математическое моделирование трехмерного вязкого течения в проточной части клапана штатной конструкции. В качестве граничных условий на входе принимаем расход пара и энтальпию, определенную по параметрам пара перед СК. Граничные условия на выходе – статическое давление за клапаном. По результатам данного расчета определяем давление пара перед клапаном и определяем результирующее усилие на основной запорной чаше.

## 3) Комплексный расчет новой конструкции РК.

Определение эффективности новой конструкции РК определяем по результатам математического моделирования течения в проточной части новой конструкции для определенного на предыдущем этапе перепада давления на РК. Выполняем сопоставление по расходу пара и по результирующему усилию на основной запорной чаше.

В процессе выполнения математического моделирования стационарного течения в проточном тракте исследуемых РК давление в тракте разгрузки клапана определялось результатами расчета, выполненного на относительно грубой сетке тетраэдрического типа с призматическим подслоем при количестве ячеек по высоте пограничного слоя – 15 и относительном росте ячеек 1,2. Используемая модель турбулентности – SST. Параметр  $y^+$  для поверхности клапанного канала оставлял не более 10, для тракта разгрузки  $y^+ \leq 80$ . Для уточнения расходных характеристик, исследуемых РК, дополнительно выполнялся расчет на более мелкой сетке –  $y^+ \leq 4$  для всей модели, и упрощенным моделированием тракта разгрузки в качестве дополнительного входа потока с граничными условиями, определенными расчетом на грубой сетке.

### Результаты исследований.

В результате исследований был определен новый вариант конструкции РК, изображенный на рисунке 3.

Предложенная конструкция клапана имеет минимальное количество реконструируемых деталей. В их числе следует назвать:

- выполнение профиля типа Вентури [4] для основной запорной чаши 2 клапана;
- выполнение соединения чаши 2 клапана и гильзы 4 с помощью штифтов 3 с внутренней резьбой, увеличивающих ремонтпригодность и технологичность производства деталей РК;
- исключение выступов на торце буксы 5, разрушение которых было выявлено в ходе ревизии одного из случаев обрыва штока РК, призвано повысить надежность конструкции;
- наличие фрезерованных выступов на гильзе 4 и ответных пазов на стакане 5, противодействующих повороту чаши;
- выполнение конической резьбы на штоке 7;

- выполнение отверстий в стакане 5 с целью изменения схемы подачи пара в тракт разгрузки, в результате которого удастся увеличить прижимающее усилие для основной запорной чаши клапана.

Результаты математического моделирования стационарного трехмерного течения в проточной части РК штатной и РК новой конструкции представлены на рисунке 4. Определено, что для пропуска заданного расхода пара перепад статического давления для РК штатной конструкции составил 5,7 %, тогда как для РК новой конструкции – 5,5%. Величина парового усилия (без учета собственного веса клапана и усилия пружины) для РК штатной конструкции составила – 7,8 кН и направлено против потока, а на клапане новой конструкции данное усилие незначительно уменьшилось до 7,3 кН.

### Обсуждение результатов исследования

Из рисунка 2 видно, что при скользящих параметрах пара, характерным для РК №2 является работа при относительно больших подъемах основной чаши.

Течение внутри клапанного канала РК штатной (см. рис. 4 а, 4 в) характеризуется наличием дискретных вихревых структур в зоне торцевой поверхности чаши клапана. Взаимодействие данных дискретных вихревых структур с торцевой поверхностью чаши в совокупности со значительной неравномерностью давлений может являться источником вибрации [3, 4] и способствовать перекоосу чаши, приводящей к заеданию подвижных деталей клапана.

Использование профиля типа Вентури обеспечивает более равномерное и безотрывное обтекание чаши клапана.

Из рисунка 4 г видно наличие отрыва потока от внутренней поверхности седла РК новой конструкции со стороны входного патрубка. Данный отрыв находится в глубине клапанного канала и в большей мере влияет на восстановительную способность диффузора. Величина возмущений передаваемых вихрем в основной поток не существенным образом сказывается на вибрационной надежности чаши клапана. Данный отрыв потока возможно устранить путем замены седла, либо установкой направляющего стакана с непроницаемым экраном и силовыми стойками [6].

Для подтверждения целесообразности замены штатного регулирующего клапана №2 на клапан предлагаемой конструкции отдельно выполнены расчёты потребных приводных усилий главного сервомотора. Ре-

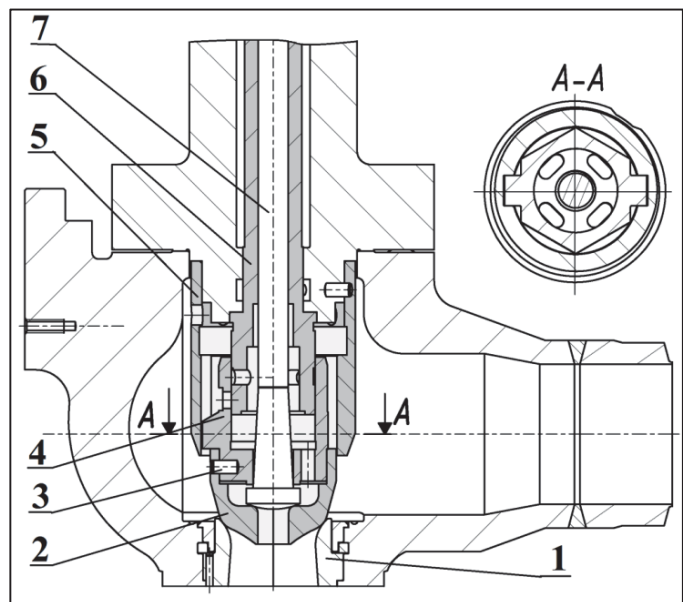
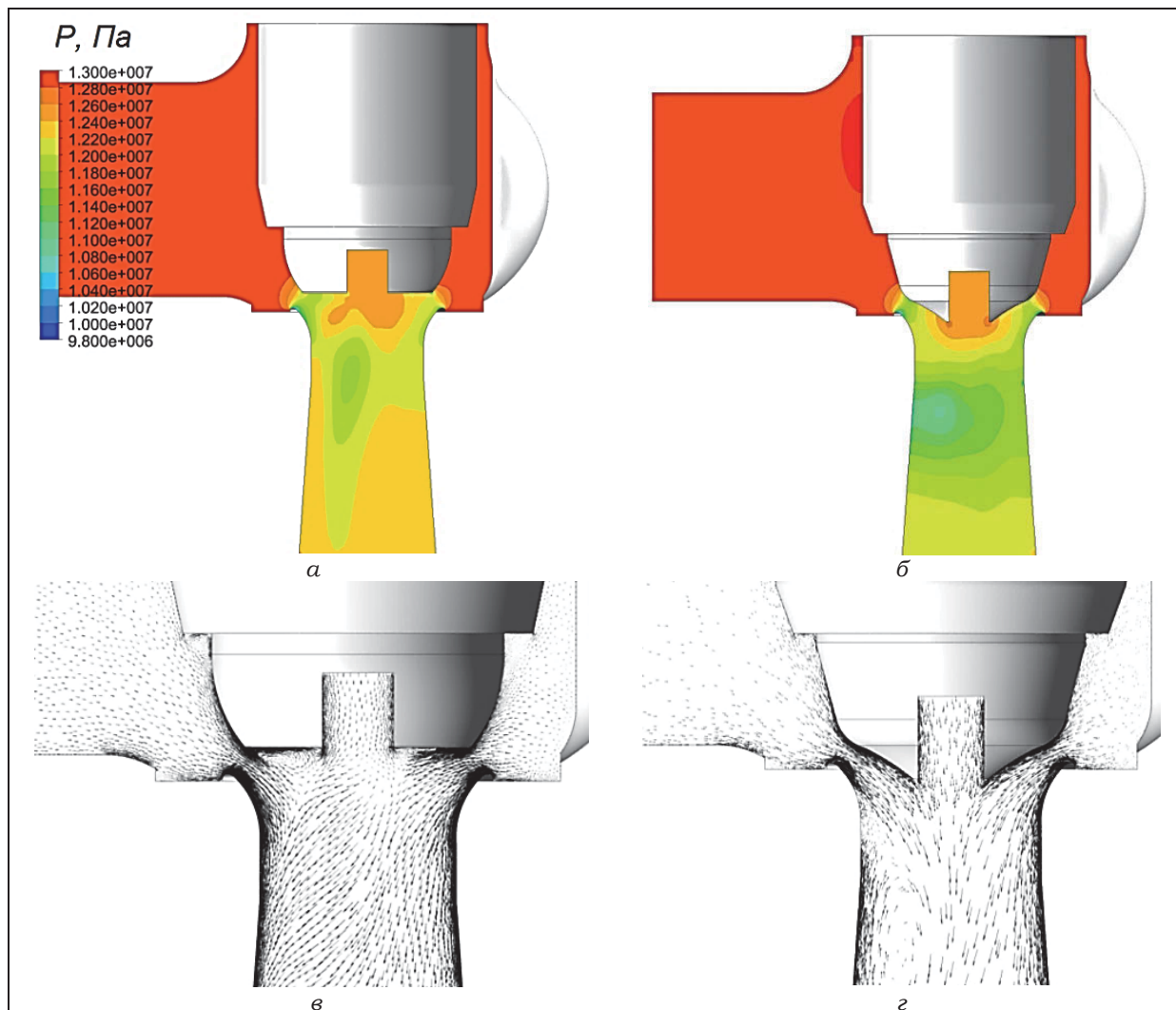


Рис. 3. Регулирующий клапан №2 цилиндра высокого давления турбины К-200-130 новой конструкции



**Рис. 4. Результаты трехмерного расчета вязкого течения в проточной части РК штатной и новой конструкции для режима нагрузки 215 МВт:**

*а – распределение давлений в проточной части РК штатной конструкции; б – распределение давлений в проточной части РК новой конструкции; в – распределение вектора скорости в проточной части РК штатной конструкции; г – распределение вектора скорости в проточной части РК новой конструкции*

зультаты подтвердили наличие достаточных запасов усилий, позволяющих гарантировать надежное открытие регулирующих клапанов сервомотором на всех режимах эксплуатации турбины. Предлагаемый перечень реконструируемых деталей является достаточно малозатратным для станции, т.к. требует замены минимального количества деталей.

#### **Выводы**

1. На основании результатов расчетного исследования предложена новая конструкция РК № 2 для турбины К-200-130, являющаяся более надежной и экономичной.
2. Применение профиля типа Вентури обеспечивает более равномерное и безотрывное обтекание чаши клапана при больших открытиях по сравнению с чашей штатной конструкции с глубокой торцевой подрезкой.
3. Предлагаемая реконструкция является малозатратной, т.к. требует замены небольшого количества деталей.

#### **Список литературы:**

1. Повышение энергоэффективности работы турбоустановок ТЭС и ТЭЦ путем модернизации, реконструкции и совершенствования режимов их эксплуатации / Ю. М. Мацевитый, Н.Г. Шульженко, В.Н. Голощапов и др.: Под. общ. ред. ак. Ю.М. Мацевитого; НАН Укра-

ины, Институт проблем машиностроения. – Киев: Наук. Думка, 2008. – 366 с. – ISBN 978-966-00-0850-3.

2. Агафонов Б. Н. Влияние конструктивных факторов на ресурс деталей систем парораспределения паровых турбин / Б.Н. Агафонов, Н.Б. Агафонов, В.Г. Колыванов, Н.А. Татаринов // Арматуростроение. – 2013. – №3. – С. 46-51. – ISSN 2411-1155.

3. Фрагин М. С. Регулирование и маслоснабжение паровых турбин: настоящее и ближайшая перспектива / М. С. Фрагин. – СПб.: Энерготех, 2005. – 248 с. – ISBN 5-93364-007-7.

4. Зарянкин А. Е. Регулирующие и стопорно-регулирующие клапаны паровых турбин / А.Е. Зарянкин, Б.П. Симонов. – М.: Издательство МЭИ, 2005 – 360 с. – ISBN 5-7046-1143-5.

5. Разгруженные дроссельно-регулирующие клапаны нового поколения для паровых турбин / [А. Е. Зарянкин, В. А. Зарянкин, Е. Ю. Серегин та ін.]. // Вестник ИГЭУ. – 2014. – №6. – С. 1–8.

6. Бабаев А. И. Применение непроницаемых экранов для стабилизации течения в угловом регулирующем клапане / А. И. Бабаев, В. Н. Голощапов. // Проблемы машиностроения. – 2016. – №4. – С. 19–24. – ISSN 0131-2928.

7. Щегляев А. В. Регулирование паровых турбин / А. В. Щегляев, С. Г. Смельницкий. – Москва-Ленинград: Госэнергоиздат, 1962. – 256 с.



лидер турбокомпрессорного машиностроения

# ПОЛТАВСКИЙ ТУРБОМЕХАНИЧЕСКИЙ ЗАВОД

предприятие основано в 1889 году

УКРАИНА, 36029

г. Полтава, ул. Зеньковская, 6

тел.: +38 /0532/ 51 14 35

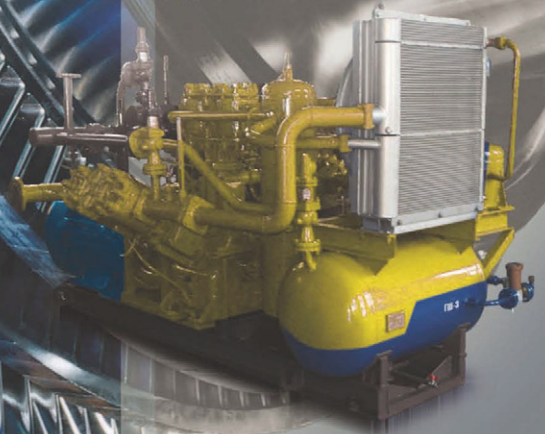
тел./факс: +38 /0532/ 51 16 91

e-mail: market@ptmz.com.ua

www.ptmz.com.ua

## Традиции, проверенные временем

- компрессоры широкого спектра применения
- узлы и детали турбин
- передвижные дизельные сварочные агрегаты
- насосные агрегаты
- маслоочистители



- проектирование
- энергоаудит
- изготовление
- сервисное обслуживание

BUREAU VERITAS  
Certification



ISO 9001  
ISO 14001