

01.04.00 - ФИЗИКА

01.04.00 - ФИЗИКА

01.04.00 - PHYSICS

01.04.07 Физикаи ҳолатҳои конденсӣ

01.04.07 Физика конденсированного состояния

01.04.07 Physics of condensed state

УДК - 622.831.32:534.6:539.219.2

ББК – 22.32

**ПРОЧНОСТЬ АППАРАТОВ
ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА
И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОДЛЕНИЕ
РЕСУРСА**

Махмудов Хайрулло Файзуллаевич - кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Физико-технического института им. А.Ф.Иоффе РАН Россия, Санкт-Петербург, e-mail: h.machmoudov@mail.ioffe.ru

Султонов Усуфходжа

- доктор технических наук, профессор кафедры общей физики и физики твердого тела ХГУ имени академика Б.Гафурова (Республика Таджикистан, г. Худжанд), e-mail: sulton50@mail.ru

Савельев Владимир Николаевич - доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Физико-технического института им. А.Ф.Иоффе РАН Россия, Санкт-Петербург.

Нигинаев К.Е. - кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Физико-технического института им. А.Ф.Иоффе РАН Россия, Санкт-Петербург.

**МУСТАҲКАМИИ АППАРАТҲОИ БО
ҲАВО ҲУНУККУНИИ ГАЗ ВА
МУАЙЯН КАРДАНИ ДАРОЗКУНИИ
ҚОБИЛИЯТИ КОРИИ ОНҲО**

Махмудов Хайрулло Файзуллаевич - номзоди илмҳои физика-математика, корманди калони илми донишкадаи Физико-техникии ба номи А.Ф.Иоффе АФ Россия, ш. Санкт-Петербург, e-mail: h.machmoudov@mail.ioffe.ru

Султонов Усуфходжа

- доктори илмҳои техникӣ, профессори кафедраи физикаи умумӣ ва ҷисмҳои сахт ДДХ ба номи академик Б.Гафуров (Ҷумҳурии Тоҷикистон, ш. Хуҷанд), e-mail: sulton50@mail.ru

Савельев Владимир Николаевич - доктори илмҳои физика-математика, корманди калони илми донишкадаи Физико-техникии ба номи А.Ф.Иоффе АФ Россия, ш. Санкт-Петербург.

Нигинаев К.Е. - номзоди илмҳои физика-математика, корманди калони илми донишкадаи Физико-техникии ба номи А.Ф.Иоффе АФ Россия, ш. Санкт-Петербург.

**TRENGTH AIR COOLER GAS
AND DEFINITIONS RESOURCE
EXTENSION**

Makhmudov Khairullo Faizullaevich - Candidate of Physical Sciences, Senior Researcher, Ioffe Institute, 26 Politekhnikeskaya, St. Petersburg, Russia, e-mail: h.machmoudov@mail.ioffe.ru

Sultonov Usufkhodzha

- Doctor of Technical Sciences, Professor KSU named after acad. B. Gafurov, e-mail: sulton50@mail.ru

Saveliev Vladimir Nikolaevich - Doctor of Physical Sciences, Senior Researcher, Ioffe Institute, 26 Politekhnikeskaya, St. Petersburg, Russia, e-mail: h.machmoudov@mail.ioffe.ru

Niginaev K.E. - Candidate of Physical Sciences, Senior Researcher, Ioffe institute, 26 Politekhnikeskaya, St. Petersburg, Russia, e-mail: h.machmoudov@mail.ioffe.ru

Ключевые слова: аппараты воздушного охлаждения (АВО), акустическая эмиссия (АЭ), уровень безопасности, прочность.

Исследованы аппараты воздушного охлаждения (АВО) газа. Используемая методика акустической эмиссии (АЭ) показала наиболее полную и прямую информацию о развитии (степени опасности) дефектов в материале эксплуатируемых объектов. АЭ контроль может применяться в качестве определяющего для выработки критериев состояния различных сооружений и допуска к дальнейшей эксплуатации промышленных объектов (обеспечивая при этом необходимый уровень безопасности на время их работы), поскольку при АЭ контроле дефект может быть обнаружен на ранней стадии развития. При применении метода АЭ с целью разработки технологии контроля конкретных объектов решены сложные вопросы, связанные с явлением формирования упругих волн от развивающихся трещин и трансформации упругих волн при распространении от трещин до датчиков. Минимально допустимые значения толщин элементов выбраны согласно методике определения остаточного ресурса АВО газа, эксплуатируемых на компрессорных станциях РАО «Газпром» и расчета по СНиП 2.05.06-85. В нижнем кольцевом сварном шве АВО газа в одном (ст.№201) обнаружен дефект, других дефектов в металле сварных соединений обследованных аппаратов АВО, препятствующих их дальнейшей эксплуатации, не выявлено. Заключение о возможности дальнейшей эксплуатации аппарата, сделано по результатам обследования АВО газа методом АЭ.

Вожаҳои калидӣ: дастгоҳҳои хунуккунии ҳаво (ДХХ), эмиссии акустикӣ (ЭА), дараҷаи хатар, мустаҳкамӣ.

Дастгоҳҳои хунуккунии ҳаво (ДХХ) таҳқиқ карда шуданд. Усули истифодашудаи эмиссияи акустикӣ (ЭА) маълумоти мукамалтарин ва мустақимро дар бораи инкишоф (дараҷаи хатар) нуқсонҳои маводи объектҳои истифодашаванда нишон дод. Назорати ЭА метавонад ҳамчун муайянкунанда барои таҳияи меъёрҳои ҳолати сохторҳои гуногун ва вуруд ба истифодаи минбаъдаи иншооти саноатӣ истифода шавад (ҳангоми таъмини сатҳи зарурии беҳатарӣ дар вақти корашон), зеро ҳангоми назорати ЭА нуқсонро дар марҳилаи аввали рушд ба қайд гирифтани мумкин аст. Ҳангоми истифодаи усули ЭА бо мақсади таҳияи технологияи мониторинги объектҳои мушаххас, масъалаҳои мураккаби марбут ба падидаи пайдоиши мавҷҳои эластикӣ аз тарқишҳои рушдбанда ва табдили мавҷҳои эластикӣ ҳангоми паҳншавӣ аз тарқишҳо ба қабулқунакҳо ҳал карда шудаанд. Қимати ҳадди ақали ҷозатдодаи ғафсии унсурҳо аз рӯи методикаи муайян кардани захираи боқимондаи гази ДХХ, ки дар истигоҳҳои компрессории РАО «Газпром» кор мекунад ва ҳисоб тибқи СНиП 2.05.06-85 интиҳоб карда шудааст. Дар кафишери гирдогирди поёнии гази ДХХ дар як нуқта (ст №201) нуқсоне ёфт шуд, нуқсонҳои дигари метали пайвандҳои кафишери дастгоҳҳои тафтишишудаи ДХХ, ки ба кори минбаъдаи онҳо монеъ мешуданд, ошкор карда нашудаанд. Хулоса дар бораи имконияти фаъолияти минбаъдаи дастгоҳ аз рӯи натиҷаи санҷиши гази ДХХ бо усули ЭА бароварда шуд.

Key words: gas air coolers (GAC), acoustic emission (AE), safety level, strength

Gas air coolers (GAC) have been investigated. The used method of acoustic emission (AE) showed the most complete and direct information on the development (degree of danger) of defects in the material of the operated objects. AE control can be used as a determinant for the development of criteria for the state of various structures and admission to further operation of industrial facilities (while ensuring the necessary level of safety during their operation), since with AE control a defect can be detected at an early stage of development. When applying the AE method in order to develop a technology for monitoring specific objects, complex issues related to the phenomenon of the formation of elastic waves from developing cracks and the transformation of elastic waves during propagation from cracks to sensors have been resolved. The minimum permissible values of the thickness of the elements were selected according to the methodology for determining the residual resource of gas GAC operated at compressor stations of RAO Gazprom and calculation according to SNiP 2.05.06-85. A defect was found in the lower circumferential weld of the GAC gas in one (st. No.201), other defects in the metal of welded joints of the inspected GAC devices, which impede their further operation, were not revealed. The conclusion about the possibility of further operation of the apparatus was made based on the results of the inspection of the GAC gas by the AE method.

ВВЕДЕНИЕ

Разрушение нагруженного тела является процессом сложным [1-3], чтобы исследовать этот процесс, его закономерности, характерные стадии, последовательность стадий, в развитии (степени опасности) дефектов и учитывая особенность материала и эксплуатации объекта АВО, применены различные методы [4-7]. Контроль производился приборами (толщиномер ультразвуковой БУЛАТ 1М, твердомер 54-359М, дефектоскоп ультразвуковой А1214 ЭКСПЕРТ, зав. №: 205125), но заключение о состоянии объекта было дано только после того как применен метод АЭ. При проведении обследования, с целью оценки состояния основного металла и металла сварных соединений АВО газа используются следующие методы неразрушающего контроля [8-11]: визуально-измерительный контроль (ВИК); акустико-эмиссионный контроль (АЭ); ультразвуковая толщинометрия (УЗТ); измерение твердости (ТД); капиллярный контроль (ПВК) с возможностью замены на магнитопорошковый контроль (МПК); ультразвуковой контроль (УЗК). С целью прогнозирования разрушения в отдельных элементах важно изучить и проанализировать зависимость активности и амплитуды сигналов АЭ от времени нагружения, величины нагрузки в системе АВО газа (см фото). Также рассмотрим возможность и важность применения метода акустической эмиссии для диагностирования и оценки срока (ресурса) безопасной эксплуатации конкретных систем АВО газа.



Фото. Общий вид теплообменника-испарителя АВО газа

МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

а) Визуально-измерительный контроль (ВИК) поверхности элементов АВО газа, сварных соединений и основного материала в околошовной зоне выполняется в соответствии с РД 03-606-03 с целью выявления недопустимых поверхностных дефектов и отклонений по взаимному расположению свариваемых деталей.

Визуальный контроль аппарата проводится для выявления следующих дефектов, возникших при эксплуатации:

- видимые деформации элементов - вмятины, гофры, нарушение целостности оребрения труб; трещины; коррозионный и эрозионный износ элементов и сварных швов. Особое внимание обращается на швы приварки штуцеров и фланцев, места пересечения швов, а также на неоребрённые части труб. При осмотре используются лупы с пяти - десятикратным увеличением.

При визуальном контроле учитываются возможные дефекты изготовления: подрезы, наплывы, прожоги, незаплавленные кратеры, свищи, пористость, наличие окалины; смещение и взаимный увод кромок стыкуемых деталей.

В случае обнаружения локально деформированных зон или общей остаточной деформации проводится измерение их протяженности и конфигурации. При осмотре аппарата должно быть также установлено: соответствие обследуемого аппарата проанализированной технической документации; наличие сведений о поверке контрольно-измерительной аппаратуры, работоспособность предохранительных клапанов и запорной арматуры в соответствии с требованиями безопасности, установленными на предприятии-владельце АВО.

б) Акустико-эмиссионный контроль (АЭК) выполняется в соответствии с ГОСТ Р 52727-2007[9], ГОСТ 27655 – 88, ПБ 03-593-03[18], РД 03-299-99 [25], РД 03-300-99, МР 1998 с целью обнаружить развивающиеся дефекты (по параметрам сигналов АЭ) и определить области их вероятного расположения с целью последующей идентификации

В случае несоответствия значений твердости таблице, а также при наличии повышенных коррозионных повреждений, трещин или после использования открытого огня проводятся металлографические исследования.

в) Капиллярный (ПВК) с возможностью замены на магнитопорошковый контроль (МПК) основного металла и сварных соединений элементов АВО газа выполняется в соответствии с РД 13-06-2006 (ПВК) и РД 13-05-2006 (МК) с целью выявления поверхностных дефектов типа трещин, прокатных плен и закатов, а также для дублирования (подтверждения) наличия несплошностей, выявленных методом ВИК.

г) Ультразвуковой контроль (УЗК) выполняется в соответствии с ГОСТ 14782 – 86, ОСТ 28 – 2044 – 83 с целью выявления внутренних дефектов сварных соединений, а также после АЭ контроля для уточнения дефектных участков и определения характера дефектов, которые могут развиваться в сварных швах и основном материале элементов АВО газа, как с наружной, так и с внутренней поверхности. Результаты проведенных обследований каждым из указанных методов неразрушающего контроля оцененно отдельно согласно методике [9,10] и оформлены согласно СТО Газпром 2–2.4–083–2006.

Также проведено объем контроля сварных соединений, в зависимости от результатов анализа техдокументации, визуального контроля, акустико-эмиссионного контроля определяют объем диагностирования сварных соединений. При этом обязательному контролю методами УЗК, ПВК (МК) подвергались сварные швы в местах проведения ремонта и обнаруженных при визуальном осмотре дефектов.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Наиболее полную и прямую информацию о развитии (степени опасности) дефектов в материале эксплуатируемых объектов рис 1 (а,б) можно получить на современном этапе методом акустической эмиссии (АЭ) [1]. АЭ контроль может применяться в качестве определяющего для выработки критериев состояния различных сооружений и допуск к дальнейшей эксплуатации промышленных объектов, расположенных в этих сооружениях (обеспечивая при этом необходимый уровень безопасности на время их работы), поскольку при АЭ контроле дефект может быть обнаружен на ранней стадии развития [5,6]. При применении метода АЭ с целью разработки технологии контроля конкретных объектов необходимо решать сложные вопросы, связанные с явлением формирования упругих волн от развивающихся трещин и трансформации этих волн при распространении от трещин до датчиков. Если разрушение нагруженного тела является процессом, то необходимо исследовать этот процесс, основные его закономерности, характерные стадии, последовательность стадий [12,13] чтобы выявить прогностические признаки макроскопического разрушения а в нашем случаи развитии (степени опасности) дефектов в материале эксплуатируемых объектов [14-18] необходимо измерить одновременно несколькими методами что было детально изучено но заключение состоянии будет описано только после того как применен метод акустической эмиссии рис 2 (а,б,в).

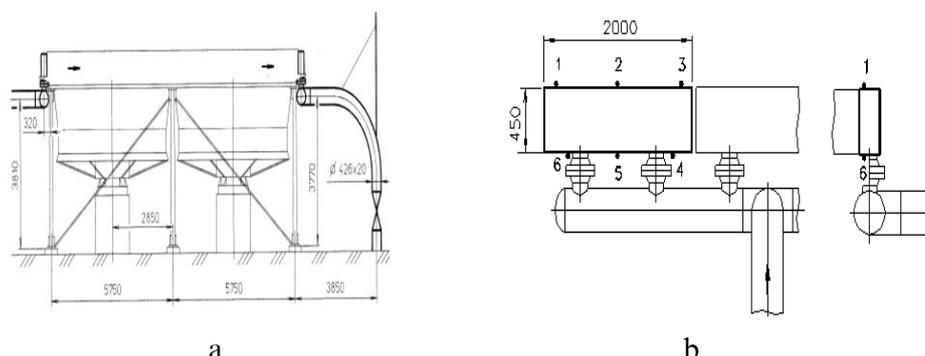


Рис 1 (а,б). Схема газа АВО с расположением датчиков АЭ:

а) - Общий вид газа АВО;

б) - расположение датчиков при нахождении сигналов АЭ на входной камере газа АВО

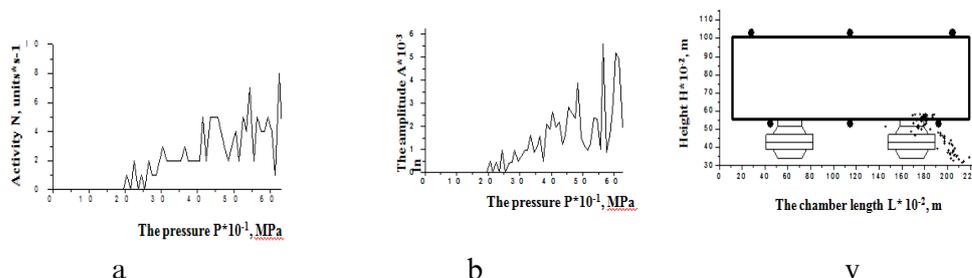
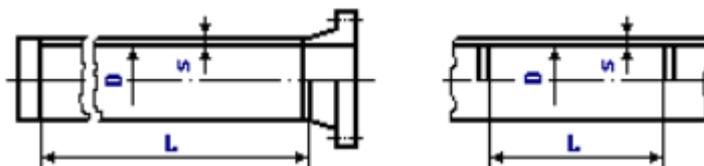


Рис 2 (a,b,v) - Результаты исследования АВО газовой КС «Надым»: а) - графики зависимости сигналов АЭ от нагрузки; б) - расположение сигналов АЭ на камере ввода газа АВО

В нижнем кольцевом сварном шве АВО газа ст.№201 обнаружен дефект, заключение о возможности дальнейшей эксплуатации аппарата, будет сделано по результатам обследования АВО газа методом АЭ. Дефектов в металле сварных соединений обследованных аппаратов ст.№№ 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, препятствующих их дальнейшей эксплуатации, не выявлено.

Цилиндрические обечайки, расчет на прочность по ГОСТ 14249-89

Расчет выполнен с помощью пакета прикладных программ расчета на прочность элементов сосудов, аппаратов и трубопроводов PVP Design. Элемент: Гладкая цилиндрическая обечайка, работающая под действием внутреннего давления. Гидравлическое испытание



Исходные данные

Материал обечайки 09Г2С, Расчетная температура $T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, Расчетное давление $P = 8.37 \text{ МПа}$, Внутренний диаметр обечайки $D = 3000 \text{ мм}$, Толщина стенки обечайки 60 мм , Прибавка на коррозию $S = 3 \text{ мм}$, Прибавка – минусовый допуск $C_1 = 0 \text{ мм}$, Прибавка технологическая $C_2 = 0 \text{ мм}$, Коэффициент прочности продольного сварного шва $\varphi_p = 1$, Допускаемое напряжение $[\sigma] = 272 \text{ МПа}$.

Результаты расчета

Расчетная толщина стенки обечайки от действия давления

$$S_p = \frac{pD}{2[\sigma] - p} = 46.88 \text{ мм}$$

Расчетная толщина стенки обечайки от действия давления с учетом прибавки

$$S \geq S_p + C = 49.88 \text{ мм}$$

Допускаемое внутреннее давление

$$[p] = \frac{2[\sigma]\varphi_p(S-C)}{D+(S-C)} = 10.14 \text{ МПа}$$

Обечайка отвечает условиям прочности в соответствии с требованиями ГОСТ 14249-89

Основные выводы работы:

Обнаружено, что сигналы и соответствующие этим сигналам дефекты, включая микротрещины, возникают уже на ранней стадии нагружения, их развитие, локализация ведет в конечном итоге к макроразрушению.

Амплитудный и спектральный анализ зависимости сигналов АЭ от времени действия нагрузки и деформации позволил выявить прогностические признаки перехода к макроразрушению.

Исходя из анализа кинетических закономерностей разрушения нагруженных образцов и модели трубопровода, проведена оценка времени жизни, и на этой основе показана возможность продления срока безопасной эксплуатации реальных объектов.

Результаты проведенных исследований и их анализ позволили разработать новую методику оценки работоспособности и продления срока службы теплообменного оборудования ОАО «Газпром», утвержденную руководством ОАО «Газпром» и согласованную надзорными органами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев В. Н., Махмудов Х. Ф. ЖТФ, 90, 143-148, 2020 DOI: [10.21883/JTF.2020.01.48676.74-19](https://doi.org/10.21883/JTF.2020.01.48676.74-19)
2. Makhmudov Kh.F., Menzhulin M.G., Zakharyan M.V., Sulonov U., Abdurakhmanov Z.M. Diagnostics of the loss of stability of loaded constructions and the development of the sites of breakdown during the action of seismic explosion and air shock waves. Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics. 2015. Т. 60. № 11. С. 1651-1657.
3. Kuksenko V.S., Makhmudov K.F., Mansurov V.A., Sulonov U., Rustamova M.Z. Changes in structure of natural heterogenous materials under deformation. Journal of Mining Science. 2009. Т. 45. № 4. С. 355-358.
4. Алимов С. В., Лифанов В. А., Миатов О.Л. Аппараты воздушного охлаждения газа: опыт эксплуатации и пути совершенствования // Газовая промышленность. 2006. №6. С.54-57.
5. Неведьев Е.Ю., Волков В.А., Кудряшов С.В., Ляшков А.И., Савельев В.Н. Связь размеров микротрещин с параметрами акустической эмиссии и структурой деформированной роторной стали. - Дефектоскопия, 1986, № 3, С.41-44.
6. Неведьев Е.Ю., Волков В.А., Ляшков А.И., Савельев В.Н. Контроль роста усталостной трещины в литой стали методом акустической эмиссии.-Проблемы прочности, 1987, № 1, С.41-44.
7. Гуменюк В.А., Иванов Ю.Г., Сульженко В.А., Яковлев А.В. Анализ сигналов АЭ от трения берегов полуэллиптической усталостной трещины. - Техническая диагностика и неразрушающий контроль. Киев. Наукова Думка. 1989, № 3, Стр.31-36.
8. Башкарев А.Я., Неведьев Е.Ю., Олексейчук В.Р., Савельев В.Н., Сивоконь В.Н., Субочев А.И., Судаков А.В. Комплексное обследование образца магистрального трубопровода с дефектами коррозионного растрескивания под напряжением при стендовых испытаниях. - Доклады 11-ой Международной деловой встречи “Диагностика-2001”, Тунис, апрель, 2001г., Стр.63-71
9. Справочник по теплообменникам. В 2 т. Т.2 / Пер. с англ. под ред. О.Г.Мартыненко и др. – М.: Энергоатомиздат, 1987. - 352 с
10. В.Б.Кунтыша, А.Н.Бесонного. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения/ Под ред. - СПб.: Недра, 1996. – 510 с.
11. Аршакян И. И., Тримбач А.А. Повышение эффективности работы установок охлаждения газа / Газовая промышленность. 2006. №12. С. 52-55.
12. Kuksenko V.S., Makhmudov K.F. Racture in heterogeneous materials: experimental and theoretical studies. Russian Geology and Geophysics. 2017. Т. 58. № 6. С. 738-743. Геология и геофизика. 2017. Т. 58. №6. С. 915-923
13. Томилин Н.Г., Махмудов Х.Ф. физические основы акустико-эмиссионного мониторинга. Актуальные научные исследования в современном мире. 2017. №10-4 (30). С. 145-152.
14. Jeong JH, Kim LS, Ha MY, Kim KS, Co JR (2008) various heat heat exchangers used in gas turbines to increase efficiency performance-ment. Int J Air Cooling 16(1): 30-36
15. McDonald CF, Wilson DG (1996) use of recovered and regenerated engine cycles for high-efficiency gas turbines efficiency in the 21st century. Appl Therm Eng 16 (8/9): 635-653
16. Burkert (2004) GE supplies the LMS100 for mid-ground power. tourbiomachinery international. January / February, pages 20-21
17. English CR (2003) gas turbine WR-21 intercooled recuperated engine-integration into future warships. Materials international gas turbine Congress, Tokyo. IGTC2003Tokyo OS-203
18. Carman BG, Kapat JS, Show LC, All (2002) impact ceramic micro-channel heat exchanger on a micro-turbine. AMERICAN SOCIETY of MECHANICAL ENGINEERS Turbo Expo, June, Amsterdam, GT-2002-30544

REFERENCES

1. Saveliev V.N., Makhmudov Kh.F. ZhTF, 90, 143-148, 2020 DOI: [10.21883/JTF.2020.01.48676.74-19](https://doi.org/10.21883/JTF.2020.01.48676.74-19)
2. Makhmudov Kh.F., Menzhulin M.G., Zakharyan M.V., Sulonov U., Abdurakhmanov Z.M. Diagnostics of the loss of stability of loaded constructions and the development of the sites of breakdown during the action of seismic explosion and air shock waves. Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics. 2015.Т. 60.No. 11., pp. 1651-1657.
3. Kuksenko V.S., Makhmudov K.F., Mansurov V.A., Sulonov U., Rustamova M.Z. Changes in structure of natural heterogenous materials under deformation. Journal of Mining Science. 2009. Т. 45. No. 4., pp. 355-358.
4. Alimov S.V., Lifanov V.A., Miatov O.L. Gas air coolers: operating experience and ways of improvement // Gas industry. 2006. No. 6., pp.54-57.
5. Nefediev E.Yu., Volkov V.A., Kudryashov S.V., Lyashkov A.I., Savelyev V.N. Relationship between the size of microcracks and the parameters of acoustic emission and the structure of deformed rotor steel. - Defectoscopy, 1986, No. 3, pp. 41-44.

6. Nefediev E.Yu., Volkov V.A., Lyashkov A.I., Savelyev V.N. Control of fatigue crack growth in cast steel by acoustic emission method. Problems of Strength, 1987, No. 1, pp.41-44.
7. Gumenyuk V.A., Ivanov Yu.G., Sulzhenko V.A., Yakovlev A.V. Analysis of AE signals from friction of the edges of a semi-elliptical fatigue crack. - Technical diagnostics and non-destructive testing. Kiev. Naukova Dumka. 1989, No. 3, pp. 31-36.
8. Bashkarev A.Ya., Nefediev E.Yu., Olekseychuk VR, Savelyev VN, Sivokon VN, Subochev AI, Sudakov AV. Comprehensive examination of a sample of a main pipeline with defects in stress corrosion cracking during bench tests. - Reports of the 11th International Business Meeting "Diagnostics-2001", Tunisia, April, 2001, pp. 63-71
9. Handbook on heat exchangers. In 2 volumes.Vol. 2 / Per. from English ed. OG Martynenko and others - M.: Energoatomizdat, 1987.-- 352 p.
10. 10.V.B. Kuntysch, A.N.Besonny. Fundamentals of calculation and design of heat exchangers for air cooling / Ed. - SPb.: Nedra, 1996.-- 510 p.
11. Arshakyan I. I., Trimbach A. A. Improving the efficiency of gas cooling units / Gas industry. 2006. No. 12. pp. 52-55.
12. Kuksenko V.S., Makhmudov K.F. Racture in heterogeneous materials: experimental and theoretical studies. Russian Geology and Geophysics. 2017. V. 58. No. 6. P. 738-743. Geology and Geophysics. 2017. T. 58. No. 6. pp. 915-923
13. Tomilin N.G., Makhmudov H.F. physical foundations of acoustic emission monitoring. Actual scientific research in the modern world. 2017. No. 10-4 (30). pp. 145-152.
14. Jeong JH, Kim LS, Ha MY, Kim KS, Co JR (2008) various heat heat exchangers used in gas turbines to increase efficiency performance-ment. Int J Air Cooling 16 (1): 30-36
15. McDonald CF, Wilson DG (1996) use of recovered and regenerated engine cycles for high-efficiency gas turbines efficiency in the 21st century. Appl Therm Eng 16 (8/9): 635-653
16. Burkert (2004) GE supplies the LMS100 for mid-ground power. tourbiomachinery international. January / February, pp. 20-21
17. English CR (2003) gas turbine WR-21 intercooled recuperated engine-integration into future warships. Materials international gas turbine Congress, Tokyo. IGTC2003 Tokyo OS-203
18. Carman BG, Kapat JS, Show LC, All (2002) impact ceramic micro-channel heat exchanger on a micro-turbine. AMERICAN SOCIETY of MECHANICAL ENGINEERS Turbo Expo, June, Amsterdam, GT-2002-30544