

УДК 621.165:536.717

ВАССЕРМАН А.А., ШУТЕНКО М.А.

Одесский национальный морской университет

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧНОСТИ ПАРОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК ПРИ ПОМОЩИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ РАБОЧЕГО ТЕЛА

Викладено спосіб підвищення термічного ККД циклу паротурбінних установок шляхом підтримки початкової температури робочого тіла на значній частині процесу розширення в турбіні. Розрахунки, виконані стосовно до установки К-1200-240 (ЛМЗ), показують можливість збільшення термічного ККД на 20,3 % (від 53,3 % до 64,1 %), а ефективного ККД на 18,8 % (від 47,4 % до 56,3 %).

Изложен способ повышения термического КПД цикла паротурбинных установок путём поддержания начальной температуры рабочего тела на значительной части процесса расширения в турбине. Расчеты, выполненные применительно к установке К-1200-240 (ЛМЗ), показывают возможность увеличения термического КПД на 20,3 % (от 53,3 % до 64,1 %), а эффективного КПД на 18,8 % (от 47,4 % до 56,3 %).

The method of increasing steam turbine plants' efficiency by means of maintaining initial temperature of working substance during major part of expansion in the turbine is described. Calculations, which were carried out for plant K-1200-240(LMZ), shows possibility of increase of thermal efficiency by 20.3 % (from 53.3 % to 64.1 %), and effective efficiency by 18.8 % (from 47.4 % to 56.3 %).

Введение

Паротурбинные установки (ПТУ) – основа современной теплоэнергетики, и повышение их экономичности является важной практической задачей. К сожалению, максимальная температура пара в этих установках не превышает 550...580 °С из-за низкой коррозионной стойкости и недостаточной жаропрочности трубок котельных агрегатов, работающих при высокой разности давлений внутри и снаружи трубки (до 25...30 МПа). Поэтому, несмотря на низкую температуру отвода теплоты, близкую к температуре окружающей среды, термический КПД цикла даже лучших ПТУ с предельными значениями начальных параметров пара (31 МПа и 580 °С), промежуточным перегревом пара и многоступенчатым регенеративным подогревом питательной воды не превышает 55 % [1]. В настоящее время рассматривается возможность повышения максимальной температуры пара за счет применения новейших конструкционных материалов для трубок котла, однако этому препятствует высокая стоимость материалов и большие размеры котла [2].

Один из путей совершенствования ПТУ – переход к комбинированной установке, состоящей

из ПТУ и ГТУ. В данной работе рассмотрено другое направление.

Ранее нами было предложено повысить среднюю температуру подвода теплоты в ПТУ за счет смешения перегретого пара с продуктами сгорания природного газа в кислороде на высокотемпературных участках изобарных процессов основного и вторичного перегрева пара [3, 4]. В настоящей работе предлагается обеспечить дальнейшее повышение этой температуры, а, следовательно, и термического КПД цикла ПТУ.

Изобарно – изотермический подвод теплоты в ПТУ

В цикле ПТУ пар имеет наиболее высокую температуру на входе в турбину, после чего в процессе расширения его температура непрерывно снижается. Для повышения термического КПД цикла целесообразно на значительной части процесса расширения поддерживать температуру пара близкой к начальной путём дополнительного подвода теплоты. Это можно обеспечить за счет многоступенчатого сжигания топлива в потоке рабочего тела, расширяющегося в проточной части турбины [5].

Проверка эффективности предлагаемого способа проводилась на примере паротурбинной установки К-1200-240 (ЛМЗ). В данной установке пар, имеющий после пароперегревателя температуру 540 °С, расширяется в турбине высокого давления от 24 до 3,6 МПа, а затем перегревается в промежуточном пароперегревателе при $p = 3,6$ МПа до той же температуры. После этого пар расширяется в турбинах среднего и низкого давления от 3,6 МПа до давления 0,04 бар, которое поддерживается в конденсаторе. В установке применяется регенеративный подогрев питательной воды паром, отбираемым из турбины при давлениях 6,4; 3,6; 1,85; 0,9; 0,5; 0,26; 0,13; 0,06 и 0,02 МПа [6]. За 30 лет, прошедших с момента выпуска ПТУ К-1200-240 (ЛМЗ), ни в СССР/СНГ, ни за рубежом не было создано установки, существенно превосходящей указанную по параметрам рабочего тела или по КПД.

Учитывая, что для этой ПТУ имеются данные не только о начальных параметрах пара, но и о параметрах пара после промежуточного перегрева и давлениях регенеративных отборов, целесообразно выбрать установку К-1200-240 (ЛМЗ) в качестве прототипа при проведении сравнительных расчетов. Даже в рассматриваемой весьма совершенной ПТУ температура пара перед турбиной не превышает 540 °С, а средняя температура подвода теплоты, естественно, ещё ниже. Как отмечено выше, это обусловлено низкой коррозионной стойкостью и ограниченной жаропрочностью материала трубок котлоагрегата. В то же время лопатки газовых турбин даже при отсутствии охлаждения выдерживают температуру до 800 °С. При использовании охлаждения и новых конструкционных материалов возможно дальнейшее повышение температуры рабочего тела перед турбиной до 1100 °С [7], а в новейших газотурбинных установках – до 1450 °С [8].

В работе [4] показано, что при повышении температуры пара перед турбинами высокого и среднего давления до 800 °С благодаря смешению водяного пара после пароперегревателей с продуктами сгорания метана в кислороде термический КПД цикла установки К-1200-240 увеличивается на 8,1 % (от 53,3 до 57,7 %) а эффективный КПД на 6,4 % (с 47,4 % до 50,4 %). Дальнейший рост КПД возможен, если в процес-

се расширения рабочего тела продолжить подвод теплоты к нему, благодаря чему этот процесс станет близким к изотермическому (в отличие от адиабатного в обычном цикле). Эффект от этого мероприятия тем выше, чем выше температура пара перед ТВД. Для поддержания низкой средней температуры отвода теплоты следует прекратить подвод теплоты в последних ступенях турбины низкого давления и превратить этот участок процесса расширения рабочего тела в адиабатный.

Поставленная задача может быть решена путём смешения водяного пара, имеющего после пароперегревателя температуру 540 °С, с продуктами сгорания водорода в кислороде, содержащими избыток водорода. Количество этих продуктов должно быть рассчитано так, чтобы температура рабочего тела после смешения составляла 800 °С. Избыток водорода определяется из условия подвода необходимого количества теплоты в процессе расширения. Для сжигания избытка водорода в процессе расширения в турбинах к рабочему телу добавляется кислород. Благодаря этому можно повысить среднюю температуру подвода теплоты, что приводит к росту термического КПД цикла.

На диаграмме T,S (рис. 1) представлены обычный регенеративный цикл ПТУ с промежуточным перегревом пара (а) и модифицированный цикл (б). Из диаграммы T,S видно, что в модифицированном цикле средняя температура подвода теплоты выше, чем в обычном, благодаря чему повышается термический КПД. Правда, несколько возрастает и средняя температура отвода теплоты, но её относительный рост меньше, чем рост температуры подвода. В целом модифицированный цикл приближается к обобщенному циклу Карно.

На рис 2 представлена принципиальная схема усовершенствованной ПТУ. В этой установке питательная вода, сжатая от давления 0,004 МПа до 24 МПа (процесс 6-7), поступает в регенеративный теплообменник, где нагревается от 29 до 335 °С (процесс 7-8) за счет охлаждения пара, отработавшего в турбинах, от 540 до 54 °С (процесс 3-4). Заметим, что на малоформатной диаграмме T,S изобара 24 МПа при температурах ниже критической практически совпадает с пограничной кривой жидкости.

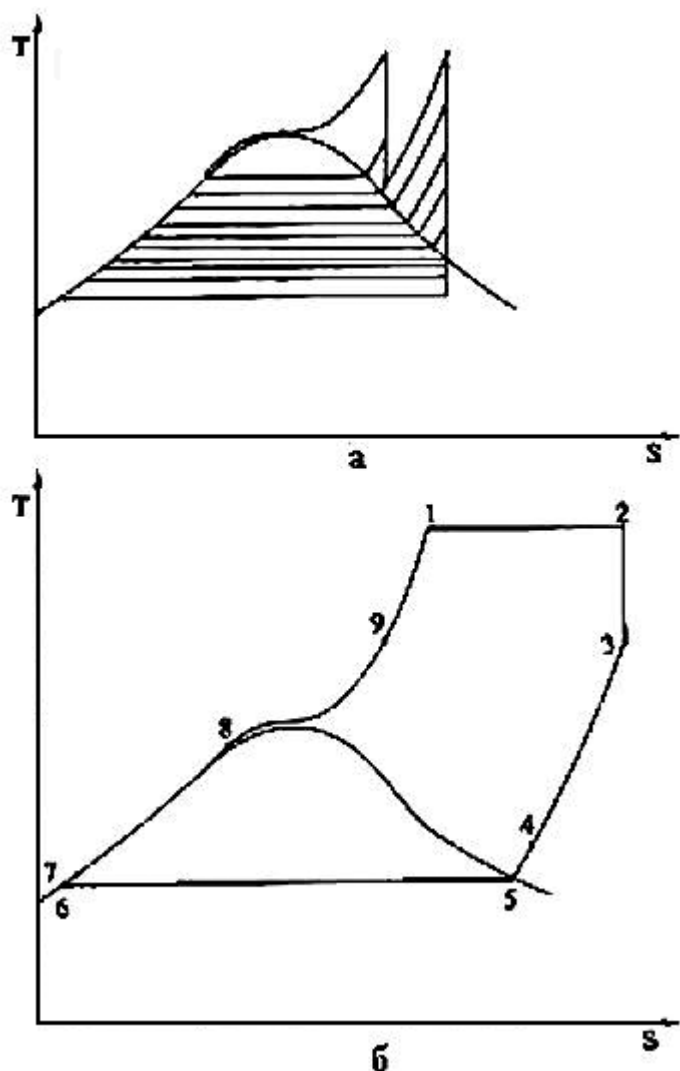


Рис. 1. Обычный регенеративный цикл ПТУ с промежуточным перегревом пара (а) и модифицированный цикл (б) в координатах T, S .

После регенеративного теплообменника пар поступает в конденсатор (процесс 4-5-6), а питательная вода — в котёл. Там вода подогревается до $540\text{ }^{\circ}\text{C}$ (процесс 8-9) и превращается в пар (при сверхкритическом давлении фазовый переход жидкость-пар отсутствует, но вещество при температуре выше критической считают паром). Пар после пароперегревателя поступает в камеру сгорания, где смешивается с продуктами сгорания водорода в кислороде, то есть с водяным паром, имеющим более высокую температуру, и с избытком водорода (процесс 9-1). Полученная смесь (96,2 % водяного пара и 3,8 % водорода), имеющая температуру $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ и дав-

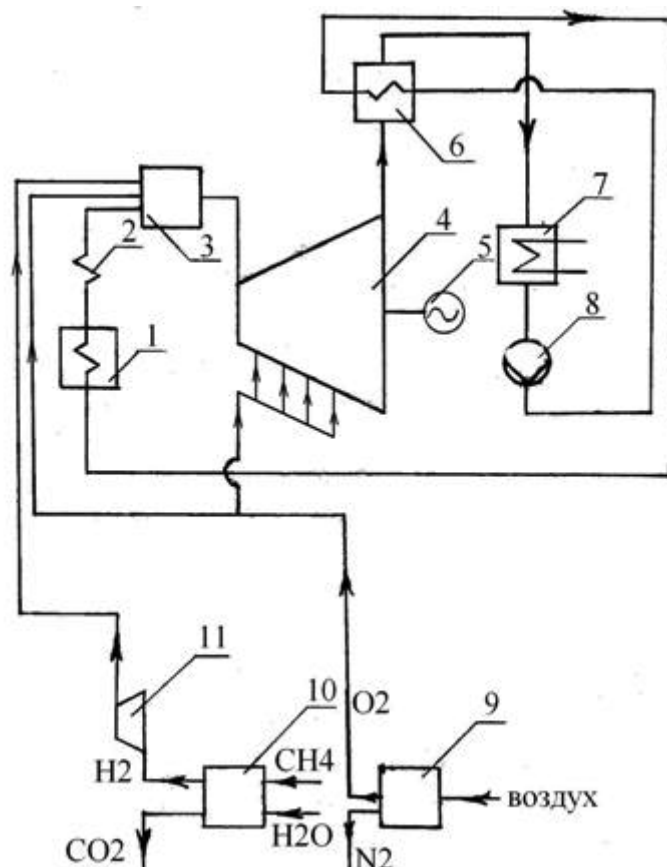


Рис. 2. Принципиальная схема усовершенствованной ПТУ: 1 — котел; 2 — пароперегреватель; 3 — камера сгорания; 4 — турбина; 5 — электрогенератор; 6 — регенеративный теплообменник; 7 — конденсатор; 8 — насос питательной воды; 9 — воздуходелительная установка; 10 — установка химической конверсии метана в водород; 11 — компрессор водорода.

ление 24 МПа , направляется на расширение в турбину.

Камера сгорания является компактным устройством и может быть изготовлена из жаростойкой стали. Эту камеру можно охлаждать питательной водой, которая затем направляется в котел. Таким образом, отведенная от камеры теплота будет использована в цикле. Поскольку температура продуктов сгорания водорода в кислороде превышает температуру плавления стали, для предотвращения их контакта со стенками камеры пар из пароперегревателя котла должен направляться на её периферию таким же образом,

как направляется избыточный воздух в камерах сгорания газотурбинных установок (ГТУ). После смешения продуктов сгорания водорода с паром, поступившим из пароперегревателя, температура рабочего тела снижается до 800 °С. Если же кислород до его подачи в камеру сгорания смешать с водяным паром в соотношении 1 моль кислорода на 4 моля водяного пара, то температурный режим камеры будет идентичен температурному режиму камеры сгорания ГТУ. Камера сгорания может быть смонтирована непосредственно перед турбиной (как это делается в ГТУ), что позволит исключить трубопровод, соединяющий камеру с турбиной.

В процессе расширения 1-2 к рабочему телу подмешивается кислород. Общее количество добавляемого кислорода должно быть рассчитано таким образом, чтобы обеспечить полное сгорание избытка водорода и отсутствие после этого неконденсирующихся газов в рабочем теле. В результате химической реакции между кислородом и избытком водорода выделяется теплота, поэтому процесс расширения приближается к изотермическому, представляя собой последовательность большого числа процессов адиабатного расширения на лопатках турбины и изобарного нагревания при смешении рабочего тела с продуктами сгорания водорода в кислороде. На диаграмме T, S этот процесс условно изображен как изотермический в связи со сравнительно небольшим уменьшением температуры в процессе расширения в каждой ступени турбины. Поскольку температура рабочего тела в турбине выше температуры самовоспламенения водородно-кислородной смеси, равной 580–590 °С [9], химическая реакция между водородом и кислородом будет протекать в самом широком диапазоне концентраций реагирующих веществ. После того как концентрация водорода станет равной нулю, дальнейшее расширение будет проходить по адиабате (процесс 2-3). Поэтому в конце расширения рабочее тело имеет температуру, приемлемую для поверхностных теплообменников (540 °С), и может использоваться для регенеративного подогрева питательной воды.

Кислород получают с помощью установки для разделения воздуха, а водород — из природного газа (метана) путём химической конверсии [10].

Затем водород сжимают от давления 7 МПа (что несколько ниже давления в магистральном трубопроводе природного газа) до 24 МПа для подачи в камеру сгорания. Если не учитывать тепловые потери в окружающую среду, то вся теплота, затраченная в процессе химической конверсии, идет на повышение теплоты сгорания топлива и будет полезно использована в цикле.

В таблице приведены значения удельных количеств теплоты и работы в отдельных процессах. Все количества теплоты и работы отнесены к 1 кг питательной воды. Сумма работы цикла и количества отведенной теплоты больше, чем количество подведенной теплоты. Это обусловлено тем, что водород сжимается не от атмосферного давления, а от давления 7 МПа, то есть термодинамический цикл не является замкнутым.

Расчеты показывают, что для установки-прототипа при максимальной температуре цикла 800 °С рост термического КПД составит 20,3 % (с 53,3 до 64,1 %), а эффективного КПД — 18,8 % (с 47,4 % до 56,3 %). Если учесть приведенные выше данные для газотурбинных установок, то видно, что есть возможность дальнейшего увеличения КПД цикла ПТУ за счет повышения максимальной температуры цикла.

Описанная схема ПТУ с изобарно-изотермическим подводом теплоты обладает следующими достоинствами:

1. ПТУ с изобарно-изотермическим подводом теплоты можно применять в комбинированных парогазовых установках (ПГТУ), то есть в паровом котле может утилизироваться теплота газов, отработавших в газовой турбине. Термический КПД ПГТУ с изобарно-изотермическим подводом теплоты в паровом цикле будет выше, чем КПД ПГТУ с классическим перегревом пара и регенеративным подогревом питательной воды в паровом цикле. Таким образом, существует возможность дальнейшего повышения эффективности не только паротурбинных, но и комбинированных установок.

2. У ПТУ с изобарно-изотермическим подводом теплоты отсутствует один серьёзный недостаток, присущий ПГТУ. В ПГТУ значительная доля теплоты (порядка 50 %), подведенной к рабочему телу в газотурбинном тракте, передается от газов к пару в утилизационном котле. В связи с принципиальным отличием конфигурации изо-

Таблица. Значения удельных количеств теплоты и работы.

Энергетические показатели	Значение, кДж/(кг воды)
Количество теплоты, подведенной в котле (процесс 8-9)	1785,9
Количество теплоты, подведенной в камере сгорания (процесс 9-1)	812,7
Количество теплоты, подведенной в турбине (процесс 1-2)	5915,8
Количество теплоты, переданной в РТО (процессы 7-8 и 3-4)	1385,6
Количество теплоты, отведенной в конденсаторе (процесс 4-5-6)	3529,5
Удельная работа сжатия воды в насосе (процесс 6-7)	24,0
Удельная работа расширения в турбине (процесс 1-2-3)	5986,9
Удельная работа сжатия водорода (с учетом КПД компрессора)	102,6
Удельная работа, затрачиваемая на получение кислорода (из расчета 0,3 кВт·ч/(кг O ₂))	406,4

бар газа и пара в утилизационном котле велики потери, связанные с необратимостью процессов.

3. В ПТУ с изобарно-изотермическим подводом теплоты в котле подводится 21 % от общего количества теплоты, остальная часть подводится в камере сгорания (10 %) и в проточной части турбины (69 %). Котел является наиболее громоздким и дорогостоящим узлом установки – его стоимость составляет примерно 40 % от общей стоимости оборудования ПТУ [2]. В то же время камера сгорания является компактным и недорогим узлом (по сравнению с котлом), а подвод теплоты в проточной части турбины не усложнит существенно конструкцию турбины. Поскольку КПД ПТУ с изобарно-изотермическим подводом теплоты выше, чем у классической ПТУ, при одинаковых значениях мощности установок в первой необходимо подводить меньшее количество теплоты, что также ведет к уменьшению массы и габаритов котла. Подвод в котле 21 % теплоты и уменьшение общего количества подведенной в цикле теплоты на 18,8 % приведет к уменьшению тепловой мощности котла на 83 % при одинаковых значениях мощности обеих ПТУ. Это, в свою очередь, позволит уменьшить постройочную стоимость самой ПТУ на 33 %, что в значительной мере компенсирует затраты на введение в состав ПТУ воздуходелительной установки и установки химической конверсии метана в водород.

4. С повышением максимального давления пара при прочих равных условиях КПД цикла ПТУ с

изобарно-изотермическим подводом теплоты растёт, так как при этом удлиняется изотерма, по которой проходит первая часть расширения пара в турбине (процесс 1-2 на рис. 1). Другими словами, увеличивается средняя температура подвода теплоты, что по теореме Карно ведет к росту термического КПД. Действительно, повышение максимального давления от 24 до 100 МПа ведет к росту термического КПД на 3,0 % – от 64,1 % до 66,0 % (при 53,3 % в базовом цикле). Повышение давления вызовет проблему, связанную с прочностью труб котла. Одним из способов решения данной проблемы может быть снижение температуры пара на выходе из котла (максимальная температура цикла при этом останется неизменной, но увеличится количество теплоты, подведенной в камере сгорания).

Для классической тепловой схемы ПТУ повышение давления пара при неизменной толщине и материале трубки пароперегревателя ведет к необходимости снижения максимальной температуры пара. Так, трубка, рассчитанная на температуру 568 °С при значении давления 35 МПа, может выдержать температуру 595 °С при значении давления 25 МПа [11]. Существует комбинация начальных значений температуры и давления пара, приемлемых для заданных толщины и материала трубки пароперегревателя, при которых КПД установки максимален. Это является главной причиной, по которой в реальных ПТУ не встречаются значения максимального давления рабочего тела 100 МПа. Следует отметить, что

в последних моделях ПТУ есть тенденция к увеличению максимального давления до 31 МПа [1].

Экономический эффект

Для ПТУ, работающей по циклу с изобарно-изотермическим подводом теплоты, при мощности 1200 МВт необходима воздухоразделительная установка производительностью 339 тонн кислорода в час и установка химической конверсии метана производительностью 42 тонны водорода в час. Ориентировочная стоимость ПТУ мощностью 1200 МВт, работающей по классической тепловой схеме, составляет 750 миллионов USD. Ориентировочная стоимость воздухоразделительной установки – 200 млн. USD, установки химической конверсии метана – 50 млн. USD.

Как отмечено выше, подвод в котле только части теплоты и уменьшение общего количества подведенной в цикле теплоты позволит уменьшить построчную стоимость самой ПТУ на 33 %, или на 250 млн. USD, т.е. компенсировать затраты на установки для разделения воздуха и для химической конверсии метана. Зарезервировав 10 % от стоимости ПТУ на камеру сгорания и регенеративный теплообменник, приходим к выводу, что построчная стоимость ПТУ, работающей по циклу с изобарно-изотермическим подводом теплоты, на 10 % или на 75 млн. USD больше стоимости ПТУ, работающей по классическому циклу.

Повышение эффективного КПД ПТУ мощностью 1200 МВт на 18,8 % эквивалентно экономии 105 тыс. тонн или 147 млн. нм^3 топлива (природного газа) в год. При цене природного газа 100 USD / тыс. нм^3 экономия 147 млн. нм^3 топлива в год эквивалентна 14,7 млн. USD. Таким образом, срок окупаемости модифицированной установки составит около 5 лет.

Выводы

Предложенный способ повышения термического КПД ПТУ за счет подвода теплоты к рабочему телу на большей части процесса расширения в турбине позволяет существенно повысить экономичность таких установок. Несмотря на необходимость включения в состав ПТУ установок для разделения воздуха и химической конверсии природного газа в

водород, срок окупаемости модифицированной ПТУ составит около 5 лет. Есть перспектива дальнейшего повышения термического и эффективного КПД за счет повышения максимальных значений температуры и давления рабочего тела.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Benson boilers for maximum cost-effectiveness in power plants.* www.powergeneration.siemens.com
2. *Smith D.* Coal fired plants: horizontal boilers make 700 °C steam economic / *Modern Power Systems.* – May 2000. – pages 37–41.
3. *Патент* Украины на изобретение № 57773 “Способ повышения температуры пара перед турбиной” / *Вассерман А.А., Шутенко М.А.* // Бюллетень “Промислова власність”. – 2003. – № 7.
4. *Вассерман А.А., Шутенко М.А.* Использование кислорода и природного газа для повышения эффективности паротурбинных установок / *Технические газы.* – 2004. – № 2. – С. 39–42.
5. *Спосіб реалізації циклу паротурбінної установки.* Заявка ОНМУ № 20040403178 на выдачу патенту на винахід, авторы *Вассерман О.А., Шутенко М.А.*
6. *Гольстрем В.А., Кузнецов Ю.Л.* Энергетический справочник инженера. – Киев: Техніка, 1983. – 416 с.
7. *Артемов Г.А., Горбов В.М., Романовский Г.Ф.* Судовые установки с газотурбинными двигателями: Учебное пособие – *Николаев: УГМТУ,* 1997. – 233 с.
8. *Chase D.L.* Combined-Cycle Development Evolution and Future. <http://www.gepower.com>
9. *Гамбург Д.Ю., Семенов В.П., Дубовкин Н.Ф., Смирнова Л.Н.* Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение. – М.: Химия, 1989. – 672 с.
10. *Верхивкер Г.П., Абу Эльжадаиль Кахер, Кравченко В.П., Чулкин О.А.* Использование химической регенерации теплоты в газотурбинных и парогазовых установках/ // *Холодильная техника и технология.* – 2000. – Вып. 69. – С. 85–90.
11. *Dr. J. Franke, R. Kral, E. Wittchow* Steam generators for the next generation of power plants. Aspects of design and operating performance / *VGB Power Tech.* – 12/1999.

Получено 27.08.2003 г.