

УДК 536.24

С. В. АЛЁХИНА, канд. техн. наук

О. А. СИМБИРСКАЯ

Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины

ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ВЫХОДНЫХ ПАТРУБКАХ ПАРОВЫХ ТУРБИН

В работе освещены основные особенности протекания тепловых и газодинамических процессов в выходных патрубках паровых турбин. Проведен обзор исследований в этой области отечественных и зарубежных авторов. Сформулированы основные особенности исследования тепловых и газодинамических процессов в выходных патрубках паровых турбин, намечены пути поиска рациональных конструкций патрубков в широком диапазоне режимов работы турбин.

В роботі висвітлені основні особливості перебігу теплових і газодинамічних процесів у вихідних патрубках парових турбін. Проведено огляд досліджень в цій галузі вітчизняних і закордонних авторів. Сформульовано основні особливості дослідження теплових і газодинамічних процесів у вихідних патрубках парових турбін, окреслено шляхи пошуку раціональних конструкцій патрубків в широкому діапазоні режимів роботи турбін.

Введение

В условиях возрастания дефицита электроэнергии, а также учитывая старение эксплуатируемого на тепловых и атомных электростанциях Украины основного энергогенерирующего оборудования, приобретают актуальность такие проблемы как повышение экономических показателей работающих турбоустановок и продление срока их эксплуатации. На сегодняшний день сложившиеся условия эксплуатации турбоустановок ТЭС, ТЭЦ и АЭС требуют полного представления о характере протекания основных рабочих процессов в их элементах, что невозможно без использования современных подходов к методам их исследования.

Немаловажным фактором, влияющим на эффективность и продолжительность работы базового оборудования электростанции, является неравномерность графика электрической нагрузки в энергосети, что приводит к увеличению числа остановов и пусков турбин из различных тепловых состояний, продолжительной работе турбин при глубокой разгрузке. Это сопровождается существенным снижением расхода пара по сравнению с номинальным режимом работы. Сезонное и суточное изменение температуры также влияют на режим работы паровых турбин. В зависимости от температуры охлаждающей воды объемный расход пара через последние ступени может изменяться в достаточно широких пределах [1, 2].

Работа проточной части цилиндров высокого, среднего и низкого давления (ЦВД, ЦСД, ЦНД), в которых используются ступени с различным отношением среднего диаметра $D_{ср}$ к высоте лопатки l ($D_{ср}/l=2.5$ в ЦНД, $D_{ср}/l=36-40$ в первой ступени ЦВД), сопровождается в области номинальных расходов пара отрывными явлениями от профильной части направляющих и рабочих лопаток. Течения часто имеют интенсивные вращающиеся вихри в межвенцовых зазорах и привтулочные отрывы в увеличенных межступенчатых зазорах, что характерно, прежде всего, для ступеней с малым отношением $D_{ср}/l$ и за последними ступенями ЦНД. Такой характер движения пара приводит к значительному снижению как экономичности патрубка, так и надежности работы лопаточных аппаратов [3].

Поэтому при создании новых или реконструкции уже использующихся турбин, предназначенных для работы в широком диапазоне нагрузок, необходимо учитывать особенности протекания основных рабочих процессов на малорасходных режимах работы турбоустановок.

Безопасность эксплуатации турбины в целом зависит от эффективности и надежности

работы ее основных конструктивных элементов. Анализ процессов, сопровождающихся отрывными явлениями в проточной части при работе турбин в области номинальных расходов показал, что влияние на экономичность и надежность турбины оказывает конструкция выходного патрубка.

Роль выходных патрубков достаточно велика, от их аэродинамических характеристик зависит не только экономичность турбины, но в значительной степени определяется и экономичность всей паротурбинной установки [4,5]. Поэтому особую важность приобретают исследования тепловых и газодинамических процессов именно в этом конструктивном элементе.

Особенности работы выходных патрубков турбин

В настоящее время в энергетической отрасли Украины для выработки электроэнергии активно используются паровые турбины большой мощности (200 МВт и 300 МВт на ТЭС, 100 и 250/300 МВт на ТЭЦ, 220 и 1000 МВт на АЭС). Сроки наработки большинства из этих турбин позволяют говорить о износе оборудования ТЭС и ТЭЦ. Во время текущих и капитальных ремонтов обнаруживаются существенные повреждения в конструктивных элементах цилиндров, в частности в выходных патрубках цилиндров высокого давления.

Выходные патрубки ЦВД паровых турбин большой мощности чаще всего выполняются по типовым конструкциям заводов-изготовителей (рис. 1).

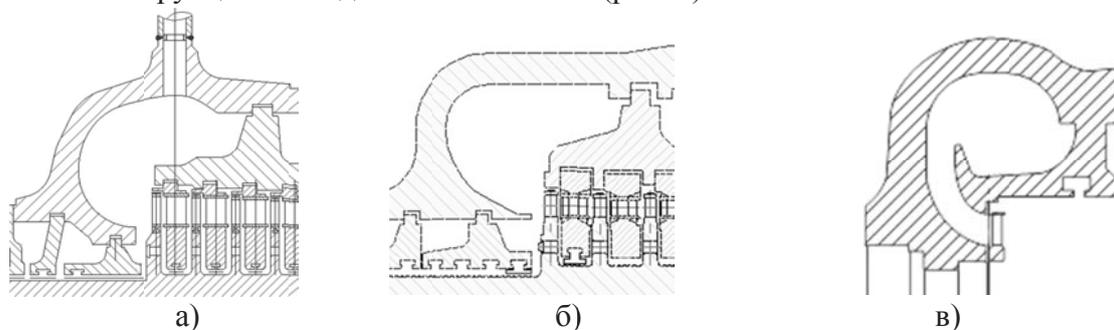


Рис. 1. Конструкции выходных патрубков паровых турбин большой мощности:
а) К-200-130-ЛМЗ; б) К-300-240-ЛМЗ; в) К-325-23,5

Как видно из рис. 1 внутренняя полость выходного патрубка имеет близкую к тороидальной форму, в некоторых случаях с дополнительными конструктивными элементами. Вход потока в патрубок происходит обычно по кольцевой плоскости, последней ступени из проточной части цилиндра, выхлоп (один или несколько) расположен в нижней части.

Из цилиндра высокого давления турбины пар (после срабатывания теплоперепада), поступает в выходной патрубок из которого по паропроводам, направляется в котел для промежуточного перегрева [5].

Основной особенностью течения пара в рассматриваемом элементе ЦВД на номинальном режиме работы является наличие сильной осевой закрутки после выхода потока из лопаточного аппарата рабочего колеса последней ступени и неравномерность распределения скорости потока в радиальном направлении. Такой характер течения рабочей среды отражается, прежде всего, на равномерности прогрева корпусных элементов патрубка. В местах, где поток имеет большую скорость, прогрев осуществляется более интенсивно, что существенно отражается на распределении температурных напряжений в стенках и фланцах патрубка и, как следствие на термочувствительных характеристиках металла. Неравномерность потока пара в полости выходного патрубка возникает также из-за расположения выхлопов в нижней его части, что также вызывает неравномерность прогрева корпуса и крышки цилиндра и может привести к его деформациям.

Работа турбины на малорасходных режимах (на сниженных объемных расходах пара через турбину) может представлять опасность для корпуса выходного патрубка, поскольку в таком случае возможна большая тангенциальная закрутка потока, перераспределение

расхода пара и углов направления потока по радиусу, а также возникновение привтулочного отрыва за последней ступенью турбины. Подобный характер течения пара на входе вызывает существенную перестройку потока в проточной части выходного патрубка и формирует возвратные течения вдоль его корневой ограничивающей поверхности. Это может привести к изменению темпа прогрева стенок и фланцев патрубка, создавая повышенные локальные термонапряжения, а также существенно снизить экономичность последней ступени турбины, вызывая, в некоторых случаях, усталостное разрушение рабочих лопаток [6].

На структуру течения пара в выходном патрубке также влияют всевозможные дополнительные конструктивные элементы, такие как кольцевые дефлекторы, направляющие листы, разделители или центральное ребро, распределяющие поток равномерно относительно вертикальной плоскости симметрии патрубка. Если на номинальном режиме работы их наличие способствует уменьшению коэффициента потерь, энергия при частичных нагрузках наоборот, приводит к резкому ухудшению аэродинамических характеристик патрубка [6, 7].

Обзор исследований тепловых и газодинамических процессов в выходных патрубках

Результаты первых исследований выходных патрубков паровых турбин в отечественной и зарубежной литературе были опубликованы еще в 60–70 годах прошлого столетия. В них основное внимание уделялось, как правило, выходным патрубкам ЦНД. Патрубки же ЦВД и ЦСД на сегодняшний день остаются практически мало исследованными.

Для совершенствования выходных патрубков паровых турбин большое значение имеют их натурные исследования, основное преимущество которых состоит в получении прямых результатов в реальных условиях совместной работы патрубка и последней ступени. При проведении испытаний на аэродинамических моделях такой подход дает возможность определить влияние входной неравномерности реального потока рабочей среды на характер течения в полости патрубка. В современных условиях натурные исследования позволяют провести верификацию расчетной модели при численном моделировании с учетом реальных свойств рабочей среды и фактической структуры потока.

Модельные исследования аэродинамики выходных патрубков паровых турбин, как правило, проводились на статических моделях воздушных стендов при осевом равномерном подводе воздуха, что не позволяло учитывать характер течения за последней ступенью реальной турбины и получать действительную картину распределения газодинамических параметров потока [8].

Приближенно смоделировать поток, выходящий из последней ступени, на статических моделях можно путем установки на входе в патрубок густой сетки. Однако сетка должна иметь переменную густоту (как в радиальном, так и в тангенциальном направлениях), что практически выполнить не удавалось.

Другим возможным методом испытания выходных патрубков в статических условиях является индивидуальный регулируемый подвод газа в каждую ячейку входного сечения патрубка, на которые его необходимо предварительно разбить при помощи перегородок. Этот метод оказался весьма трудоемким и не позволил получить реальную картину течения пара на входе в патрубок [9]. На современном этапе аэродинамической отработки выходных патрубков используют модели, включающие в себя отсек ЦНД «последняя ступень – выходной патрубок».[10]

К первым натурным испытаниям можно отнести испытания проведенные во Всероссийском теплотехническом институте (ВТИ) на патрубке ЦНД конструкции 50-х годов. Эти испытания представляют в первую очередь интерес по оценке влияния изменений проточной части на характеристики выходного патрубка, так как проведены на турбине до и после модернизации проточной части. Исследования показали, что в патрубке содержатся значительные резервы повышения экономичности турбины [11].

Благодаря тому, что при проведении более поздних испытаний на натуральных объектах одновременно с детальными измерениями потока за последней ступенью получили поля полных и статических давлений в выходном сечении патрубка, удалось представить фрагменты картины течения в реальном выходном устройстве мощной паровой турбины и сделать выводы о причинах, определивших уровень потерь энергии в нем [12].

Одной из конструктивных причин высоких потерь энергии в патрубке ЦНД является плохая организация поворота потока в меридиальной плоскости при малых осевых размерах патрубка. В верхней части патрубка поток поворачивает вторично, и этот поворот уже в тангенциальном направлении осуществляется без каких либо направляющих элементов и сопровождается как повышенными потерями, так и формированием разности давлений в верхней и нижней части [10].

Результаты натурных испытаний также наглядно показывают взаимосвязь эффективности работы последней ступени и патрубка.

В выходном патрубке гидравлическое сопротивление, вытекающему из ступени пару в верхней и нижней части различно, из-за одностороннего расположения выходных (отводящих пар в паропроводы промперегрева) отверстий относительно выходной площади ступени. Этим создается неравномерность статического давления за ступенью, которая приводит к неравномерному расходу пара через ступень турбины, что в свою очередь приводит к потерям энергии и повышению вибрационного состояния как рабочих лопаток так и ротора турбины [9, 13].

Активное течение потока пара после поворота во входном участке патрубка заполняет проточное сечение лишь частично, остальные площади проходного сечения заняты обратными течениями, индуцированными активным потоком. На эффективность использования проходных сечений патрубка и, как следствие, на значение полных потерь с выходной скоростью существенное влияние оказывает распределение расходов пара и неравномерность потока по радиусу последней ступени. В область выходного сечения, прилегающую к задней стенке патрубка, пар поступает из нижней половины ступени, где уровень расходов ниже, чем в периферийной области. К настоящему времени энергетические характеристики выхлопных патрубков ЦНД мощных турбин различных типоразмеров получены в ВТИ в натурных условиях [13].

Общей особенностью, характерной для всех исследованных патрубков, является резкое возрастание потерь энергии с увеличением объемного расхода пара.

Другой общей закономерностью являются потери энергии в натурных патрубках существенно превышающие результаты, полученные на воздушных аэродинамических моделях в стендовых идеализированных условиях, не учитывающих как реальное распределение параметров потока по радиусу последней ступени, так и свойства рабочего тела.

Из анализа проведенных экспериментальных работ можно сделать вывод, что даже небольшое изменение формы каналов выходного патрубка (который фактически является диффузором сложной формы) приводит к сильным изменениям профилей скоростей. В основном такие изменения определяются вмешательством в формирование закрученного потока различных средств организации течения, что в большинстве случаев приводит к ухудшению экономических характеристик выходных патрубков. Повышенные гидравлические потери, вызванные нерациональной компоновкой внутренних элементов, при больших скоростях на входе в патрубок ЦНД вызывают режим «запирания», когда рост начального давления не меняет величины входной скорости. При этом режиме предельную мощность турбины ограничивает не пропускная способность последней ступени турбины, а выходной патрубков. Данная проблема является сейчас актуальной и широко освещена в литературе [8, 13–16].

В натурной турбине на малорасходных режимах поток, выходящий из последней ступени, сильно закручен. В некоторых случаях закрутка потока может иметь место и на

номинальном режиме работы. Влияние закрутки на работу патрубка мало изучено. В целом экспериментальные данные по ЦНД подтверждают, что умеренная входная закрутка в патрубок малого удлинения при отсутствии в проточной части силовых элементов и ребер оказывает положительное воздействие, снижая полные потери на 5–10 % [17].

Экспериментальные исследования при правильно поставленном эксперименте позволяют получить наиболее достоверные данные, однако, не обеспечивают получение полной картины, происходящих в проточной части выходных патрубков, процессов. Во многих случаях при проведении экспериментов на натуральных объектах для получения параметров потока пара необходима установка большого количества приборов. Так, из-за больших размеров измерительного сечения, минимальное количество измерительных приборов, необходимых для установки в одном потоке ЦНД мощной паровой турбины, составляет приблизительно 25–50 штук. Но и в этом случае многие фрагменты сложной картины течения остаются вне измерений. Для патрубков ЦВД непреодолимые трудности, кроме указанных, вызывает также высокий уровень температуры и давления рабочей среды [18].

В тоже время анализ интегральных характеристик потока рабочей среды, полученных осреднением параметров, как по шагу так и по радиусу позволяет сделать лишь приближенную оценку влияния неравномерности входного потока на энергоэффективность патрубка. Для более глубоко изучения влияния структуры потока на входе необходим анализ течения в отдельных элементах патрубка, что, в свою очередь, требует более детальных измерений [10].

Основными недостатками экспериментальных исследований являются значительные временные и материальные затраты.

Возможности теоретического исследования процессов при течении рабочей среды в проточной части турбин значительно расширились при использовании современных вычислительных средств и программного обеспечения.

В последние годы интенсивно развиваются так называемые CFD (Computational Fluid Dynamics) методы (методы вычислительной гидродинамики), основанные на современных компьютерных технологиях, новейших математических моделях процессов, а также эффективных и высокоточных численных алгоритмах. Так применение CFD-технологий позволяет использовать полную трехмерную геометрическую модель патрубка. При этом нет необходимости упрощать физические процессы течения и взаимодействия пара с поверхностями твердых тел. Поля температур, напряжений и деформаций могут рассчитываться в любом количестве необходимых локальных точек. Результаты, полученные при численном моделировании, достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными. Это значит, что вычислительный эксперимент на основе CFD-моделей приближается по своим качествам к натурному эксперименту, обеспечивая более полную информацию о движении потока в натурном объеме.

В настоящее время при численном моделировании процессов, имеющих место в выходных патрубках паровых турбин, активно используются программные комплексы ANSYS (США), STAR-CD (Англия), Numeca (Бельгия), FlowER (Украина), FlowVision (Россия) и др. Многие из этих программных комплексов успешно применяются для расчета течений в каналах выходных патрубков ЦНД паровых турбин и оптимизации их геометрии [19-27]. Однако в большинстве исследований не уделяется должного внимания исследованию тепловых и газодинамических процессов в патрубках ЦВД, т. е. решению сопряженной задачи теплообмена.

До настоящего времени не существует обобщенных рекомендаций и специализированных программных комплексов для проектирования выходных патрубков паровых турбин. Для каждой конкретной конструкции необходимо проводить индивидуальный расчет. В связи с этим перспективным является создание программных комплексов, которые позволят проводить расчеты типовых конструкций выходных патрубков с учетом всех особенностей

течения рабочей среды за последней ступенью цилиндра и даст возможность получить ощутимый экономический эффект, а так же обеспечить приемлемые показатели надежности рассматриваемого отсека проточной части паровых турбин.

Выводы

Как показывает обзор научно-технических публикаций, исследования тепловых и газодинамических процессов в выходных патрубках достаточно сложная задача. Основной причиной проведения таких работ является оптимизация конструктивных параметров патрубков на номинальном режиме работы. Однако при этом совершенно не уделяется внимание характеру и закономерностям происходящих процессов, что, на наш взгляд, является первоочередным.

Особое внимание стоит уделять также исследованиям тепловых и газодинамических процессов в выходных патрубках на малорасходных режимах работы паровых турбин. Появление новых методик в численном моделировании и мощной современной вычислительной техники позволяет решать эти задачи.

Список литературы

1. Капинос В. М. Переменный режим работы паровых турбин: учебное пособие / В. М. Капинос, А. В. Гаркуша. – Харьков: Высшая школа, 1989. – 174 с.
2. Kavney K. Steam turbine 34.5-Inch Low-Pressure Section Upgrade / K. Kavney, J. Lesiuk, J. Wright // General Electric Company, 2006. – 16 p.
3. Хаимов В. А. Малорасходные режимы и надежность ЦНД турбины Т-250/300-23,5/ А. В. Хаимов, П. В. Храбров, Ю. А. Воропаев, О. Е. Котляр // Теплоэнергетика. – 1991. – № 11. – С. 38–43.
4. Дейч М. Е. Газодинамика диффузоров и выхлопных патрубков турбомашин / М. Е. Дейч, А. Е. Зарянкин. – М.: Энергия, 1970. – 384 с.
5. Щегляев А. В. Паровые турбины./ А. В. Щегляев. – М.: Энергоатомиздат, 1993. в 2 томах.
6. Гаркуша А. В. Аэродинамика проточной части паровых турбин / А. В. Гаркуша. – М.: Машиностроение, 1983. – 198 с.
7. Tajč L. Experimental Investigation Of Low-Pressure Steam Turbine Exhaust Hood / L. Tajč, L. Bednář, J. Synáč// Turbomachinery. – 2002. – No 22. – 18 p.
8. Касилов В. Ф. Исследование выхлопного патрубка ЦНД паровой турбины / Касилов В. Ф. // Теплоэнергетика. – 1990. – № 5. – С. 35–39.
9. Камырин В. И. Совместная работа турбинной ступени и прилегающего к ней входного или выходного патрубка / В. И. Камырин // Теплоэнергетика. – 1961. – № 1. – С. 37–44.
10. Лагун В. П. Натурные исследования выхлопного патрубка мощной паровой турбины / В. П. Лагун, Л. Л. Симою, Ю. З. Фрумин // Теплоэнергетика. – 1975. – № 2. – С. 31–35.
11. Лагун В. П. Результаты исследований выхлопного патрубка натурального ЦНД турбины ВК-100-5/ В. П. Лагун, Л. Л. Симою // Теплоэнергетика. – 1968. – № 12. – С. 13–17.
12. Зарянкин А. Е. Особенности выхлопных патрубков современных паровых турбин / А. Е. Зарянкин, В. Ф. Касилов, В. Н. Денисов, А. В. Денисов // Теплоэнергетика. – 1988. – № 4. – С. 26–28.
13. Лагун В. П. Методика и некоторые обобщенные результаты исследований выхлопных патрубков натуральных паровых турбин / В. П. Лагун, Л. Л. Симою, Э. А. Бойцова, А. Б. Нафтулин, Ю. Е. Семенов // Теплоэнергетика. – 1991. – № 2. – С. 28–33.
14. Зарянкин А. Е. Особенности течения пара в выхлопном патрубке паровых турбин при больших дозвуковых скоростях / А. Е. Зарянкин, В. Ф. Касилов, В. Н. Денисов // Энергомашиностроение. – 1987. – № 4. – С. 6–8.
15. Зарянкин А. Е. О кризисных явлениях в выхлопных патрубках / А. Е. Зарянкин, В. П. Жилинский // Изв. вузов. Энергетика. – 1977. – № 4. – С. 13–135.

16. Касилов В. Ф. Перспективы и концепция совершенствования выходного тракта ЦНД паровых турбин / В. Ф. Касилов // Теплоэнергетика. – 1996. – № 1. – С. 46–52.
17. Басов В. А. Влияние входной закрутки на аэродинамические характеристики патрубков малого удлинения / В. А. Басов, Э. И. Гудков, В. А. Конев // Известия высших учебных заведений. Энергетика. – 1992. – № 2. – С. 108–114.
18. Юрченко Д. Д. Разработка, верификация и анализ трехмерной CFD-модели теплового состояния охлаждаемой лопатки ГТД в сопряженной постановке: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.05.16 – «Турбомашины и турбоустановки» / Д. Д. Юрченко. – К., 2007. – 25 с.
19. Касилов В. Ф. К расчету проточной части выходных устройств турбомашин / В. Ф. Касилов // Известия РАН. Энергетика. – 2002. – № 5. – С. 68–77.
20. Юдин А. Ю. Исследования осесимметричных диффузоров выходных патрубков турбомашин со специальным вдувом потока / А. Ю. Юдин // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 3. – С. 80–84.
21. Cofer John I. Advances in Steam Path Technology / John I. Cofer , John K. Reinker , William J. Sumner // General Electric Power Systems. – 1996. – Vol. 8. – P. 29–40.
22. Watanabe S. 495-MW Capacity Genesee Power Generating Station Phase 3: First Supercritical Pressure Coal-fired Power Plant in Canada / S. Watanabe, T. Tani, M. Takahashi, H. Fujii // Power Systems. – 2004. Vol. 53. – P. 109–114.
23. Fu J. Influences of Inflow conditions on Non-Axisymmetric Flows in Turbine Exhaust Hoods / J. Fu, J. Liu // Journal of Thermal Science. – 2008. – Vol. 17. – No. 4. – P. 305–313.
24. Liu J. J. Investigation of Flow in a Steam Turbine Exhaust Hood With/Without Turbine Exit Conditions Simulated / J. J. Liu, Y. Q. Cui, H. D. Jiang // Journal of engineering for gas turbines and power. – 2003. – Vol. 125. – No.1. – P. 292–299.
25. Miroslav Štastný. Effects of inlet swirl on the flow in a steam turbine exhaust hood / Miroslav Štastný, Ladislav Tajc, Petr Kolář, Antonín Tuček // Journal of Thermal Science. – Volume 9. – No. 4. – P. 327–333.
26. Jing-Lun Fu. Unsteady Interactions Between Axial Turbine and Nonaxisymmetric Exhaust Hood Under Different Operational Conditions / Jing-Lun Fu, Jian-Jun Liu, Si-Jing Zhou // Journal of Turbomachinery. – 2012. – Vol. 134. – Issue 4. – 11 p.
27. Štastný M. 3D flow in the axial-radial exhaust hood of a steam turbine / M. Štastný, P. Kolář, A. Tuček // Journal of Thermal Science. – Vol. 6. – No. 4. – P. 237–240.

THE FEATURES OF THERMAL AND GAS-DYNAMICS PROCESSES IN THE STEAM TURBINE EXHAUST HOODS

S. V. ALYOKHINA, Cand. Tech. Scie.
O. A. SIMBIRSKA

The paper highlights the main features of thermal and gas-dynamic processes in turbine exhaust hoods. A review of studies in this field native and foreign authors was carried out. The basic features of thermal and gas-dynamic processes investigations in the steam turbines exhaust hoods was formulated. The ways of searching for the efficient design of exhaust hoods in a wide range of turbines operating modes were selected.

Поступила в редакцию 16.07 2012