

УДК 621.039.50

DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.3.03>

Оригинальная статья / Original paper

Предложения к освоению проектного уровня мощности ВВЭР-1200 и ВВЭР-ТОИ

А.А. Дубов

НИЦ «Курчатовский институт»,
123182 Россия, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1

Реферат. В настоящее время как в России, так и за рубежом вводятся в эксплуатацию реакторные установки проектов водо-водяного энергетического реактора мощностью 1200 МВт (ВВЭР-1200) и водо-водяного энергетического реактора типового оптимизированного информатизированного (ВВЭР-ТОИ). В процессе пуска энергоблока выполняется комплекс пусконаладочных работ на различных этапах – физический пуск, энергетический пуск, опытно-промышленная эксплуатация. Целью проведения этих работ является проверка и настройка систем и оборудования, наладка регуляторов энергоблока, подтверждение проектных нейтронно-физических характеристик, подтверждение динамической устойчивости. В статье представлена предлагаемая концепция освоения энергетических уровней мощности с учетом особенностей, выявленных при вводе в эксплуатацию энергоблоков повышенной мощности по сравнению с водо-водяным энергетическим реактором мощностью 1000 МВт (ВВЭР-1000). Приводится описание действующего в настоящее время способа освоения номинальной мощности ВВЭР-1200 и ВВЭР-ТОИ в процессе ввода в эксплуатацию. Показаны недостатки данного способа с точки зрения как проверки динамической устойчивости энергоблока, так и обеспечения безопасности. Представлены описание и обоснование предложений к усовершенствованию способа освоения проектной мощности реактора для ВВЭР-1200 и ВВЭР-ТОИ, в основе которых лежит опыт ввода в эксплуатацию энергоблоков ВВЭР-1200, а также требования к реализации режимов маневрирования.

Ключевые слова: ВВЭР-1200, ВВЭР-ТОИ, ВВЭР-1000, парогенератор, пусконаладочные работы, регулятор ограничения мощности, ускоренная предупредительная защита, главные циркуляционные насосные агрегаты.

Для цитирования: Дубов А.А. Предложения к освоению проектного уровня мощности ВВЭР-1200 и ВВЭР-ТОИ. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2026;3:43–51. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.3.03>

Введение

Вводимые в эксплуатацию энергоблоки ВВЭР-1200 и ВВЭР-ТОИ по сравнению с ВВЭР-1000 характеризуются повышенным значением мощности реактора при сохра-

нении характеристик основного оборудования энергоблока, таких как компенсатор давления, парогенератор (ПГ) и др. [1].

Требования к объему и последовательности пусконаладочных работ (ПНР) на энергоблоках атомных станций в процессе ввода их в эксплуатацию устанавливаются нормативным документом АО «Концерн Росэнергоатом» «Ввод в эксплуатацию блоков атомных станций с водо-водяными энергетическими реакторами. Объем и последовательность пусконаладочных работ» СТО 1.1.1.03.003.0880-2022 (СТО) [2].

Согласно СТО на этапе опытно-промышленной эксплуатации должны быть

- определены фактические характеристики активной зоны, подтверждено их соответствие проектным данным;
- подтверждено соответствие фактических параметров и характеристик работы систем и оборудования требованиям проектно-конструкторской и заводской документации;
- подтверждена безопасная и надежная работа оборудования и систем энергоблока в стационарных и переходных режимах в соответствии с требованиями проекта;
- осуществлена наладка водно-химического режима первого и второго контуров, выполнен контроль плотности оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) методом радиационно-химического анализа;
- выполнены испытания биологической защиты, проверена радиационная обстановка в технологических помещениях энергоблока атомной станции (АС);
- сведен тепловой баланс по первому и второму контурам, выполнена тарировка каналов аппаратуры контроля нейтронного потока (АКНП), их показатели приведены в соответствие с тепловой мощностью;
- осуществлено поэтапное освоение уровней 35 – 40, 50, 75, 90 и 100%-ной проектной мощности, выполнены на каждом уровне мощности предусмотренные этапной программой наладочные работы и испытания;
- закончена приемка во временную эксплуатацию всех систем и оборудования, а также приемка всех объектов пускового комплекса энергоблока АС.

В процессе ввода в эксплуатацию энергоблоков ВВЭР-1200 и ВВЭР-ТОИ выполняется ряд динамических испытаний с целью проверки работы основного и вспомогательного оборудования энергоблока при переходе на пониженный (повышенный) уровень мощности, проверки и наладки основных регуляторов, получения экспериментальных данных для сопоставления с расчетным моделированием. Под динамическими испытаниями понимается переходный процесс на энергоблоке, вызванный как отключением, так и подключением основного оборудования, сбросами нагрузки турбогенератора по сигналам сетевого оператора, приводящими к переводу энергоблока на новый пониженный (повышенный) энергетический уровень мощности с восстановлением эксплуатационных пределов и условий для нормальной эксплуатации на соответствующем уровне мощности. Освоение номинального уровня мощности реактора в соответствии с СТО осуществляется путем последовательного увеличения мощности с проведением как динамических, так и стационарных испытаний на промежуточных уровнях мощности в соответствии. Опыт пуска энергоблоков с ВВЭР-1200 показал, что в части проведения динамических испытаний требования СТО в процессе ввода в эксплуатацию в настоящее время выполняются не в полной мере и требуют внесения корректировок.

Описание существующего способа освоения номинальной мощности

Процедура освоения номинальной мощности, в соответствии с которой в настоящее время выполняется ввод в эксплуатацию ВВЭР-1200 и ВВЭР-ТОИ согласно СТО, заключается в следующем:

- на этапах освоения мощности (35 – 40, 50, 75, 90 и 100%) предполагается длительная эксплуатация энергоблока в промежутках времени между проведениями испытаний, включая подготовку исходных условий проведения испытаний, для чего в проекте устанавливаются эксплуатационные пределы и условия, регламентирующие эксплуатацию энергоблока в процессе освоения мощности;
- на промежуточных уровнях освоения мощности (50, 75%) перед началом проведения динамических испытаний осуществляется изменение алгоритма работы регулятора ограничения мощности (РОМ), а именно, происходит изменение уровней разгрузки реактора, заключающееся в том, что значение осваиваемого уровня мощности реактора (50 или 75%) принимается в качестве номинального, в результате чего происходит перенастройка РОМ пропорционально уровням разгрузки реактора, установленным в соответствующем алгоритме функции безопасности. В результате этого после перенастройки РОМ проверяются непроектные более глубокие разгрузки энергоблока основными регуляторами энергоблока.

Например, для ВВЭР-1200 для двух питательных электронасосов ограничение по разгрузке составляет 50%, следовательно, перед началом проведения испытания по отключению двух из четырех питательных электронасосов без включения резервного на этапе освоения уровня мощности 75% в алгоритме РОМ устанавливается уровень разгрузки 37,5% с глубиной разгрузки 37,5%, в то время как максимальная проектная глубина разгрузки с помощью РОМ равна 25%, т.е. снижение мощности должно быть от 75 до 50%, а не от 75 до 37,5%. Данный подход, использованный в ходе ПНР на ВВЭР-1000 и применяемый в настоящее время в соответствии с требованиями СТО, приводит к тому, что в процессе ввода энергоблоков в эксплуатацию проверяются непроектные режимы разгрузки реактора с помощью основных регуляторов. Стоит отметить, что после проведения «непроектных» динамических испытаний с работой РОМ могут корректироваться настройки основных регуляторов, которые на этапе освоения мощности 100% должны обеспечивать динамическую устойчивость энергоблока уже с работой ускоренной предупредительной защиты (УПЗ).

На уровне мощности более 75% в соответствии с проектом вводится в работу УПЗ. По сигналу УПЗ в активную зону погружается заранее выбранная входящая в нее группа органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ) с последующей доразгрузкой реактора до допустимого уровня мощности за счет работы РОМ. УПЗ как средство повышения динамической устойчивости была впервые реализована на энергоблоке № 1 Южно-Украинской АС с реактором ВВЭР-1000. Сигнал УПЗ шунтировался при снижении мощности реактора ниже 75%. Практически без изменений данный алгоритм УПЗ был применен для ВВЭР-1200. Как показала практика пуска ВВЭР-1200 на этапе освоения уровня мощности 75%, являющегося пограничным с точки зрения введения в действие УПЗ, динамические испытания на ВВЭР-1200 проводились с выведенной из работы УПЗ, т.е. при исходном уровне мощности около 73 – 74%, что

в свою очередь не дает основания утверждать о приемлемости настроек основных регуляторов энергоблока по результатам этих испытаний как для исходных событий на номинальном уровне мощности, так и на промежуточных уровнях, для которых вероятности отказов практически сравнимы с работой на номинальной мощности.

В данной статье представлены предложения к освоению проектного уровня мощности реактора в процессе ввода в эксплуатацию АС, наиболее полно соответствующие безопасному освоению мощности реактора для ВВЭР-1200 и ВВЭР-ТОИ с учетом как проектных требований по разгрузкам энергоблока, так и требований к необходимости работы АС в маневренном режиме.

Описание предложений к освоению номинальной мощности

Рассматриваются следующие предложения к освоению номинального уровня мощности в ходе проведения ПНР для ВВЭР-1200 и ВВЭР-ТОИ:

- значения промежуточных уровней освоения мощности, на которых требуется выполнение ПНР, должны соответствовать мощности, достигаемой в процессе разгрузки энергоблока в суточном графике изменения нагрузки, при этом должна обеспечиваться преемственность полученных результатов с существующими данными по теплогидравлическим характеристикам энергоблока, полученными в ходе ПНР на уже введенных в эксплуатацию энергоблоках с ВВЭР-1200;

- значения величины разгрузки, установленные в алгоритме РОМ, в ходе проведения ПНР должны соответствовать проектным значениям, определенным для номинального уровня мощности (100%) без его перенастройки на промежуточных уровнях мощности;

- в качестве основного средства разгрузки реактора для случаев с отключением оборудования энергоблока необходимо использовать УПЗ;

- значение величины разгрузки при отключении различного числа главных циркуляционных насосных агрегатов (ГЦНА) должно быть определено не на основе формального пересчета уровня разгрузки реактора, установленного в РОМ, а исходя из требования не превышения мощности максимально нагруженной петли главного циркуляционного трубопровода исходного (допустимого) уровня мощности петли до отключения ГЦНА с учетом подтверждения приемлемых условий работы основного оборудования, в частности, сепарационных характеристик ПГ в условиях повышенного расхода теплоносителя, изменения температурного напора по длине трубки при постоянной конструкции дырчатого листа по функции выравнивания «зеркала» испарения и подачи питательной воды максимально в область трубки у горячего коллектора ПГ.

Под мощностью петли понимается тепловая мощность, которая отводится через отдельную петлю главного циркуляционного трубопровода (ГЦК). Мощность петли рассчитывается в системе внутриреакторного контроля (СВРК) в виде произведения расхода теплоносителя в петле на разность энтальпий теплоносителя в горячей и холодной нитках.

Для ВВЭР-1200 и ВВЭР-ТОИ в настоящее время определены следующие допустимые значения мощности реактора для режимов с неполным количеством работающих ГЦНА:

для трех работающих ГЦНА, $\%N_{\text{НОМ}}$ 67,

для двух работающих ГЦНА, $\%N_{\text{НОМ}}$ 40.

Анализ результатов ПНР, полученных в ходе ввода в эксплуатацию энергоблоков ВВЭР-1200, показал, что при работе на неполном количестве работающих ГЦНА с принятыми в проекте ВВЭР-1200 значениями допустимой мощности реактора мощность максимально нагруженной петли ниже номинального значения мощности петли на осваиваемом уровне мощности, в связи с чем специалистами Курчатовского института была дана рекомендация по увеличению допустимых значений мощности реактора при работе с неполным количеством ГЦНА с учетом подтверждения сепарационных характеристик ПГ максимально нагруженной петли.

Обоснование предложений к освоению номинальной мощности

Для ВВЭР-1200 и ВВЭР-ТОИ с учетом реализации режима маневрирования на этапе ввода в эксплуатацию должен выполняться полный комплекс работ на данных промежуточных уровнях мощности реактора, включающий в себя соответствующие испытания СВРК, проверку теплогидравлических характеристик, проверку теплового баланса, наладку регуляторов, ксеноновые испытания, динамические испытания, проверку систем и оборудования энергоблока.

Для ВВЭР-1200 и ВВЭР-ТОИ обязательным условием является реализация режима работы энергоблоков в маневренном режиме суточного графика изменения нагрузки [3]. Требование сетевого оператора заключается в том, что энергоблок должен обеспечивать выдачу электрической мощности в диапазонах 100 – 75 – 100% и 100 – 50 – 100% с работой на пониженном уровне мощности (75 или 50%) в течение шести часов [4]. Мощность реактора, обеспечивающая возможность работы энергоблока со значениями электрической мощности 75 и 50%, примерно составляет 78 и 58% соответственно (рис. 1).

Реализация режимов маневрирования в суточном графике нагрузки должна сопровождаться выполнением полного комплекса ПНР на пониженных уровнях мощности реактора, значения которых составляют $78 \pm 2\%$ (что соответствует 75% электрической мощности), $58 \pm 2\%$ (что соответствует 50% электрической мощности), достигаемые в процессе суточного графика нагрузки 100 – 75 – 100% и 100 – 50 – 100%, включающем в себя испытания СВРК, АКНП, определение теплогидравлических характеристик первого контура, определение теплового баланса и другие. При этом на уровнях мощности 75 и 50% в ходе ПНР должны проводиться испытания по определению теплогидравлических характеристик с целью обеспечения преемственности полученных результатов на уровнях мощности 78 и 58%.

Применение двух групп УПЗ для ВВЭР-1200 в качестве основного способа разгрузки реактора при отключении основного оборудования энергоблока для различных исходных условий направлено на повышение динамической устойчивости энергоблока. Описание возможности применения двух групп УПЗ представлено в статье [5], в которой, в частности, были показаны конфигурации групп УПЗ для определяющих режимов нарушений нормальной эксплуатации при работе на номинальной мощности.

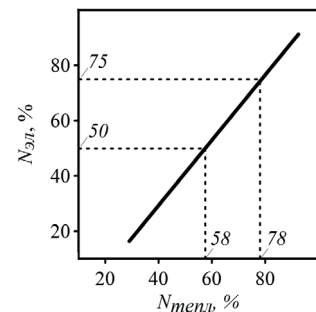


Рис. 1. Зависимость электрической мощности от тепловой

Исторически, начиная с пуска первого энергоблока с ВВЭР-1000 (пятый блок Нововоронежской АС), группой руководства пуском были определены уровни разгрузки реактора для режимов с отключением ГЦНА, в основе которых лежало недопущение превышения мощности максимально нагруженной петли из оставшихся в работе после отключения ГЦНА начальной максимальной мощности петли при работе на четырех ГЦНА. Энергоблоки ВВЭР-1200 характеризуются повышенными по сравнению с ВВЭР-1000 параметрами РУ, в частности, увеличенным значением расхода теплоносителя как через неработающую петлю, так и в работающей петле примерно на $2500 \text{ м}^3/\text{ч}$, а также повышенным значением температуры в горячей нитке максимально нагруженной петли на $7-9^\circ\text{C}$. Вследствие этих факторов для энергоблоков ВВЭР-1200 значение максимальной мощности петли в условиях частичного количества работающих ГЦНА оказалось ниже номинальной мощности перед отключением ГЦНА. Далее представлено описание определения мощности реактора, соответствующей мощности максимально нагруженной петли до и после отключения ГЦНА.

С целью определения значения мощности реактора в условиях частичного количества работающих петель с учетом максимальной мощности петли при четырех работающих ГЦНА были проанализированные данные ПНР на ВВЭР-1200. В частности, для уровня мощности реактора 50% при четырех работающих ГЦНА максимальной мощности петли соответствует 25% общей, т.е. $1600 \times 0,25 = 400 \text{ МВт}$. После отключения одного из четырех ГЦНА и разгрузки реактора до величины 33,5% экспериментально было подтверждено, что мощность максимально нагруженной петли для ВВЭР-1200 ниже 400 МВт, в связи с чем необходимо определить, при какой мощности реактора достигается исходная мощность максимально нагруженной петли 400 МВт.

Путем линейной экстраполяции измеренных данных, полученных в ходе освоения уровня мощности 50% в начале первой кампании ВВЭР-1200, был определен уровень мощности реактора, при котором мощность максимально нагруженной из трех работающих петель достигает исходной мощности петли перед отключением ГЦНА (рис. 2). В данном случае исходная мощность петли составляет 400 МВт ($3200 \times 0,5/4 = 400 \text{ МВт}$). Мощности максимально нагруженной петли 400 МВт примерно соответствует мощность реактора 34,7%, следовательно, понижающий коэффициент при работе на трех ГЦНА составляет $34,7/50 = 0,7$.

Путем линейной экстраполяции измеренных данных, полученных в ходе освоения уровня мощности 75% в начале первой кампании ВВЭР-1200, был определен уровень мощности реактора, при котором мощность максимально нагруженной из двух про-

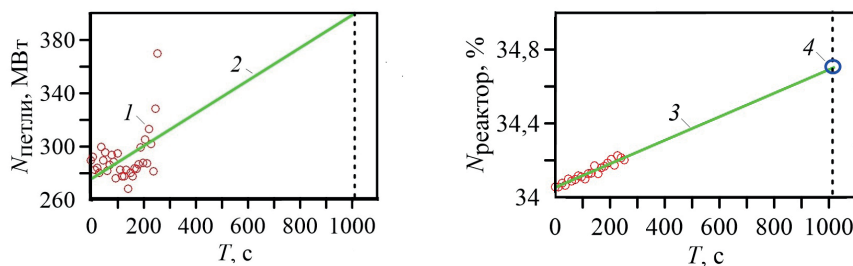


Рис. 2. Мощность реактора и петли при работе на трех ГЦНА на этапе освоения уровня мощности 50%: 1 – экспериментальные данные; 2 – линейная экстраполяция по мощности петли; 3 – по мощности реактора; 4 – значение мощности реактора, соответствующее мощности петли 400 МВт

типоволожно расположенных работающих петель достигает исходной мощности петли перед отключением ГЦНА (рис. 3). В данном случае исходная мощность петли составляет 600 МВт ($3200 \times 0,75/4 = 600$ МВт). Мощности максимально нагруженной петли 600 МВт примерно соответствует мощность реактора 39,5%, следовательно, понижающий коэффициент при работе на двух ГЦНА будет составлять $39,5/75 = 0,53$.

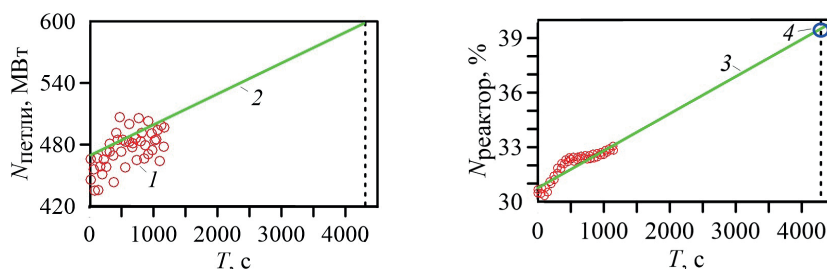


Рис. 3. Мощность реактора и петли при работе на двух ГЦНА на этапе освоения уровня мощности 75%: 1 – экспериментальные данные; 2 – линейная экстраполяция данных по мощности петли; 3 – по мощности реактора; 4 – значение мощности реактора, соответствующее мощности петли 600 МВт

Таким образом, предлагаемые для энергоблоков ВВЭР-1200 и ВВЭР-ТОИ допустимые значения мощности реактора для режимов с неполным количеством работающих ГЦНА:

для трех работающих ГЦНА, $\%N_{\text{ном}}$ 70,

для двух работающих ГЦНА, $\%N_{\text{ном}}$ 53.

Данное изменение, в основе которого лежит последовательное увеличение максимальной мощности петли, наиболее полно соответствует концепции поэтапного освоения уровня мощности в ходе ПНР. Использование более высоких уровней мощности реактора при разгрузке энергоблока в режимах с отключением работающей петли снижает степень воздействия на основные регуляторы первого и второго контуров (так как уменьшается величина разгрузки при отключении ГЦНА), что в свою очередь повышает динамическую устойчивость энергоблока в режимах с отключением ГЦНА.

Заключение

В статье приведены предложения по усовершенствованию способа освоения номинального уровня мощности для ВВЭР-1200 и ВВЭР-ТОИ, формулировка которых заключается в следующем:

- промежуточные уровни освоения мощности реактора должны соответствовать мощности, достигаемой в процессе разгрузки энергоблока в суточном графике нагрузки, при этом должна обеспечиваться преемственность полученных результатов путем проверки теплогидравлических характеристик энергоблока на принятых в настоящее время промежуточных уровнях мощности;
- в процессе ввода в эксплуатацию для обеспечения безопасного освоения мощности необходимо выполнять проверку проектных алгоритмов разгрузки энергоблока без перенастройки алгоритма РОМ с постепенным увеличением возмущения по основным параметрам по мере увеличения мощности реактора;
- в качестве основного средства разгрузки энергоблока для режимов с отключением основного оборудования необходимо использовать УПЗ;

• при работе энергоблока на частичном количестве работающих петель допустимая мощность реактора должна соответствовать мощности максимально нагруженной работающей петли.

Литература

1. Асмолов В.Г., Гусев И.Н., Казанский В.Р., Поваров В.П., Стацур Д.Б. Головной блок нового поколения – особенности проекта ВВЭР-1200. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2017;3:5–21. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2017.3.01>
2. СТО 1.1.1.03.003.0880-2022 «Ввод в эксплуатацию блоков атомных станций с водо-водяными энергетическими реакторами. Объем и последовательность пусконаладочных работ. Общие положения».
3. Аверьянова С.П., Дубов А.А., Косоуров К.Б. и др. Работа ВВЭР-1200/1300 в суточном графике нагрузки. *Атомная энергия*. 2012;113(5):247–252. URL: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1401> (дата обращения 14.08.2026).
4. Аверьянова С.П., Дубов А.А., Косоуров К.Б., Семченков Ю.М., Филимонов П.Е. Развитие способов управления ВВЭР-1200/1300 в суточном графике нагрузки. *Атомная энергия*. 2013;114(5):249–253. URL: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1124> (дата обращения 14.08.2026).
5. Дубов А.А., Микаилов Э.Ф., Гусев С.С. Исследование возможности использования двух групп ускоренной предупредительной защиты для ВВЭР-1200. *Атомная энергия*. 2023;135(3–4):100–105. URL: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/5331> (дата обращения 14.08.2026).

Поступила в редакцию 09.02.2026

После доработки 31.08.2026

Принята к опубликованию 10.09.2026

Автор

Дубов Алексей Андреевич, начальник лаборатории,
E-mail: Dubov_AA@nrcki.ru

UDC 621.039.50

Proposals for the Development of the VVER-1200 and VVER-TOI Design Power Levels

Dubov A.A.

*NRC "Kurchatov Institute",
1, Acad. Kurchatov Sq., 123182 Moscow, Russia*

Abstract

Currently, both in Russia and abroad, reactor units of the VVER-1200 and VVER-TOI designs are being commissioned. During the start-up of a power unit, a set of commissioning and debugging works is carried out at various stages – physical start-up, power start-up, and pilot operation. The purpose of these works is to check and adjust the systems and equipment, fine-tune the power unit's regulators, confirm the design neutron-physical characteristics, and confirm dynamic stability. The article presents the concept proposed by the National Research Center "Kurchatov Institute" for operating power levels, taking into account the specific features identified during the commissioning of power units

with increased capacity compared to VVER-1000. The article provides a description of the currently used method for achieving nominal power for VVER-1200 and VVER-TOI during commissioning. The shortcomings of this method are shown both from the perspective of verifying the dynamic stability of the power unit and from the perspective of ensuring safety. The article presents a description and justification of proposals for improving the method of achieving the design reactor power for VVER-1200 and VVER-TOI, based on the experience of commissioning VVER-1200 power units, as well as the requirements for implementing maneuvering modes. The article provides a calculated justification for the change (increase) in the permissible power level of the reactor when operating with an incomplete number of operating main circulation pump units. Lower unloading of the power unit in modes with loop shutdown reduces the impact on the main regulators of the first and second circuits and increases dynamic stability.

Keywords: VVER-1200, VVER-TOI, VVER-1000, steam generator, commissioning work, unloading and power limitation, accelerated preventive protection, main circulation pump unit.

For citation: Dubov A.A. Proposals for the Development of the VVER-1200 and VVER-TOI Design Power Levels. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2026;3:43–51. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.3.03> (in Russian).

References

1. Asmolov V.G., Gusev I.N., Kazansky V.R., Povarov V.P., Statsura D.B. The New Generation Head Unit: Features of the VVER-1200 Project. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2017;3:5–21. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2017.3.01> (in Russian).
2. STO 1.1.1.03.003.0880-2022 “Commissioning of units of nuclear power plants with pressurized water reactors. Scope and sequence of commissioning works. General provisions” (in Russian).
3. Averyanova S.P., Dubov A.A., Kosourov K.B., Semchenkov Yu.M., Filimonov P.E. Operation of the VVER-1200/1300 in the Daily Load Schedule. *Atomic Energy*. 2012;113(5):305–313. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-013-9637-7>
4. Averyanova S.P., Dubov A.A., Kosourov K.B., Semchenkov Yu.M., Filimonov P.E. Development of Methods for Controlling VVER-1200/1300 in the Daily Load Schedule. *Atomic Energy*. 2013;114(5):308–314. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-013-9716-9>
5. Dubov A.A., Mikailov E.F., Gusev S.S. Study of the Possibility of Using Two Groups of Accelerated Warning Protection for VVER-1200. *Atomic Energy*. 2023;135(3–4):128–134. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-024-01092-w>

Author

Aleksey A. Dubov, Head of the laboratory,
E-mail: Dubov_AA@nrcki.ru