

**Метод оценки весовых коэффициентов при определении  
средневзвешенной тепловой мощности реакторов ВВЭР**

Ю.В. Саунин, А.Н. Добротворский А.В. Семенихин, инженеры

**Нововоронежский филиал «Нововоронежатомтехэнерго» ОАО «Атомтехэнерго»**

С.И. Рясный, доктор техн. наук

**ОАО «Атомтехэнерго»**

В соответствии с требованиями регламентов безопасной эксплуатации энергоблоков АЭС с ВВЭР тепловая мощность реактора является одним из основных контролируемых параметров, по которым определяются пределы и условия безопасной эксплуатации энергоблоков. Вместе с этим тепловая мощность реактора является и основным параметром для определения технико-экономических показателей работы энергоблока в целом (например, возможности эксплуатации на повышенном уровне номинальной мощности).

Оперативный контроль тепловой мощности реактора осуществляется с помощью штатной системы внутриреакторного контроля (СВРК). Алгоритмами функционирования СВРК [1] предусматривается, как правило, расчет тепловой мощности пятью способами и определение средневзвешенной мощности с учетом весовых коэффициентов по каждому используемому методу. В конечном итоге именно средневзвешенная тепловая мощность служит основанием для тех или иных управляющих воздействий и оценок технико-экономических показателей работы энергоблока. Таким образом, наряду с повышением точности средств прямых измерений параметров, используемых для расчетов тепловой мощности, корректность оперативной оценки весовых коэффициентов для средневзвешенной тепловой мощности с учетом эксплуатационных особенностей представляется важной и актуальной проблемой.

Традиционно оценки погрешности определения тепловой мощности разными способами, а значит и весовых коэффициентов проводятся периодически на основании балансных испытаний [2]. В период между испытаниями весовые коэффициенты остаются неизменными. Данная методология является консервативной и сложилась с учетом возможностей систем контроля и управления энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР первых поколений. Реально же составляющие погрешностей не являются константами и зависят как от состояния измерительных средств, так и

режима работы реакторной установки (например, от уровня мощности [3]). Развитие информационных технологий и их широкое применение в современных проектах, безусловно, требует и изменения сложившейся методологии оценок весовых коэффициентов.

В настоящей работе делается попытка начального приближения классификации составляющих погрешности для используемых в СВРК способов расчета тепловой мощности реактора и их оценок на основании накопленных опытных данных при проведении пусконаладочных работ. С учетом обозначенных основных факторов, влияющих на погрешности, предложен метод оперативного определения весовых коэффициентов. Приведены результаты оценок весовых коэффициентов "традиционным" способом и по предлагаемому методу на основании обобщения данных, полученных при вводе в эксплуатацию энергоблоков с реакторными установками различных проектов (В-320 – энергоблок №3 Калининской АЭС, В-428 – энергоблоки №№1, 2 Тяньваньской АЭС).

### **Используемые способы расчета тепловой мощности реактора и составляющие их суммарной погрешности**

В настоящее время на АЭС с реакторами ВВЭР для оперативного контроля в СВРК [1] используются следующие способы расчета тепловой мощности реактора:

- по параметрам теплоносителя 1 контура – НИК;
- по параметрам питательной воды перед парогенераторами (ПГ) - НПГ;
- по параметрам питательной воды после подогревателей высокого давления (ПВД) - НПВД;
- по показаниям внутриреакторных датчиков прямой зарядки (ДПЗ) – НДПЗ;
- по показаниям вне реакторных ионизационных камер (ИК) – НИК,

Во всех приведенных способах тепловая мощность определяется как результат косвенного измерения. Расчетные формулы для всех способов можно выразить функциональной зависимостью вида:

$$N = F(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

где  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – либо измеряемые параметры, либо параметры, которые, в свою очередь, также могут определяться по другим функциональным зависимостям;

$n$  – количество параметров.

Таким образом, определение тепловой мощности по каждому способу представляет собой сочетание сложных зависимостей с большим количеством разных по своей природе измеряемых параметров. В нормативной документации [4] есть только общее требование к погрешности тепловой мощности, но нет разделения этого

требования к разным способам и, тем более, к различным составляющим суммарной погрешности.

Исходя из (1) и особенностей контролируемого технологического процесса на реакторных установках [2, 5] по принятому общему метрологическому подходу [6] следует, что суммарная погрешность любого способа расчета тепловой мощности будет определяться случайной погрешностью, неучтенной систематической погрешностью и динамической погрешностью. Случайная погрешность связана со случайными эксплуатационными колебаниями измеряемых параметров около их стационарного значения, а также случайными изменениями характеристик линий связи измерительных каналов. Неучтенная систематическая погрешность (инструментальная и методическая) включает в себя погрешность используемых технических средств в измерительных каналах, погрешность принятых методов измерения, расчетных зависимостей. Кроме этого, и что особенно важно, в неучтенную систематическую погрешность включим и некоторые дополнительные факторы, связанные с особенностями того или иного способа расчета. По определению динамической погрешности, очевидно, что она становится значимой в быстрых нестационарных процессах (например, при отключении или подключении основного технологического оборудования) и обусловлена инерционными свойствами применяемых средств измерений.

Без дополнительных факторов оценки максимальных погрешностей расчетов тепловой мощности с учетом их приведения к номинальным параметрам по данным работы [7] имеют следующие значения (в процентах от номинального значения тепловой мощности 3000 МВт для реактора ВВЭР-1000):

- НК – 5,1% (наибольшую погрешность вносит погрешность расчета расхода теплоносителя в петлях 1-го контура);
- НПГ – 1,1% (наибольшую погрешность вносит погрешность измерения расхода питательной воды перед ПГ);
- НПВД – 1,5% (наибольшую погрешность вносит погрешность измерения расхода питательной воды перед ПВД);
- НДПЗ – 4,5% (наибольшую погрешность вносит погрешность расчета коэффициентов чувствительностей);
- НИК – 2,9% (наибольшую погрешность вносит погрешность нормировочных коэффициентов для связи сигналов ионизационных камер, расположенных в каналах вне реактора, с тепловой мощностью реактора).

Следует отметить, что в работе [7], по нашему мнению, наиболее полно из имеющихся доступных материалов оценены все составляющие инструментальной погрешности для конкретного энергоблока. Поэтому эти оценки можно принять в качестве ориентира и использовать для сравнения при выполнении оценок на других энергоблоках с другими техническими средствами и, соответственно, другими метрологическими характеристиками. По нашим оценкам, полученным при проведении исследований теплового баланса на нескольких энергоблоках, введенных в эксплуатацию в последнее время, неучтенные систематические погрешности, в среднем, были следующими: для НПГ и НПВД - менее 1%; для Н1К - менее 2%; для НИК – менее 3%; для НДПЗ – менее 4%.

Однако, как уже было отмечено, данные оценки неучтенных систематических погрешностей без дополнительных факторов будут некорректными. На основании накопленных опытных данных [3, 8-11] с учетом требований [4-6] отметим эти дополнительные факторы, влияющие на неучтенную систематическую погрешность в принятых способах оценок тепловой мощности. Как правило, в практике эксплуатации данные факторы в оценках погрешностей либо совсем не учитываются, либо учитываются консервативно или же некорректно интерпретируются.

В расчете Н1К такими факторами являются:

- неопределенность в применяемом уточнении измеряемого перепада давления на главном циркуляционном насосе (ГЦН) на отличие условий измерений на экспериментальном стенде (где определяется напорно-расходная характеристика ГЦН) от реальных условий на реакторной установке;
- неопределенность определения средней температуры в горячих нитках главного циркуляционного трубопровода из-за особенностей перемешивания теплоносителя на выходе из активной зоны и характера его течения в разных горячих нитках;
- отсутствие апробированных зависимостей для расчетов при выбеге ГЦН;
- невозможность расчета при обесточивании всех ГЦН (в режиме естественной циркуляции теплоносителя);
- зависимость погрешности от уровня мощности и от режимов работы с полным или неполным числом работающих ГЦН.

Для расчетов НПГ и НПВД можно выделить следующие дополнительные факторы:

- оба способа являются частично коррелированными между собой, т.к. различаются фактически только точками контроля одного и того же параметра (расхода питательной воды);
- точки измерения давления пара находятся в паропроводах на достаточно большом удалении от зеркала испарения ПГ;
- измеряемая температура питательной воды может иметь некоторую неопределенность из-за влияния врезок системы возврата конденсата сепаратора-пароперегревателя;
- инерционность при быстрых переходных процессах, связанная с особенностями алгоритмов управления и работы основного оборудования 2-го контура в этих процессах;
- сильная зависимость от работы системы регулирования турбины в стационарных режимах (поддержание нагрузки сети), выражающейся в практически постоянном воздействии на питательные насосы и, соответственно, на расход питательной воды.

Для расчета НДСЗ дополнительными факторами являются:

- разные погрешности определения линейной мощности в тепловыделяющих сборках (ТВС) с введенными органами регулирования системы управления и защиты (СУЗ) и без органов регулирования СУЗ;
- ограниченное число ТВС с ДПЗ и возможное увеличение погрешности в случае неработоспособности отдельных ДПЗ или отдельных сборок ДПЗ в целом.

Для расчета НИК дополнительными факторами являются:

- преимущественное влияние на сигналы ИК только ТВС из периферийных рядов активной зоны;
- отсутствие коррекции показаний по отдельным органам регулирования СУЗ;
- необходимость периодических тарировок (привязок к тепловой мощности реактора) показаний каналов ИК.

По отмеченным выше факторам можно заключить, что учет только случайной погрешности и неучтенной систематической погрешности, что выполняется на основании методик исследований тепловых балансов, может приводить в конечном результате к некорректному определению средневзвешенной тепловой мощности при её оперативном (мгновенном) расчете. Однако такая методика оправдывает себя при оценках на стационарном уровне мощности за время не менее нескольких периодов

колебаний основных параметров (порядка 1-2 часов), связанных с работой регуляторов блока по поддержанию стационарного состояния.

### Описание предлагаемого метода оценки весовых коэффициентов

Как указывалось, СВРК в части контроля тепловой мощности должна предоставлять оперативному персоналу и в смежные системы контроля и управления "наиболее достоверное" значение тепловой мощности, определяемое как средневзвешенное значение по значениям, полученным каждым из способов, и весовым коэффициентам отдельных способов. Это значение должно быть максимально приближено к оценке действительного значения (по результатам балансных испытаний), минимально изменяться во времени при стационарных режимах и быть малоинерционным при достаточно быстрых переходных режимах.

Исходя из обозначенных принципов и на основе общих подходов к суммированию составляющих погрешностей и определения весовых коэффициентов [6, 12-13] предлагается следующая формула для оценки весовых коэффициентов способов расчета тепловой мощности реактора:

$$W_i = \frac{1}{\sum \frac{1}{k_{1i}\delta_i^2 + \sigma_i^2 + k_{2i}\tau_i^2}}, \quad (2)$$

где:  $\delta_i$  - неучтенная систематическая (инструментальная и методическая) погрешность  $i$ -го способа;  $\sigma_i$  - случайная погрешность  $i$ -го способа, определяемая как среднеквадратическое отклонение мощности данного способа за некий интервал для стационарных режимов при балансных испытаниях;  $\tau_i$  - динамическая погрешность  $i$ -го способа, определяемая в быстрых переходных процессах;  $k_{1i}$  - настроечный коэффициент для учета дополнительных факторов в неучтенной систематической погрешности  $i$ -го способа (определяется по результатам пусконаладочных работ и может характеризовать возможные зависимости от уровня мощности, формы энерговыделения в активной зоне, количества работающих ГЦН и т.д.);  $k_{2i}$  - настроечный коэффициент для динамической погрешности (определяется по результатам пусконаладочных работ для разных режимов работы реакторной установки).

По составляющим в формуле (2) можно сказать, что такие коэффициенты могут отражать особенности оперативного расчета, поскольку:

- случайная погрешность будет определяться текущим уровнем мощности и состоянием измерительных каналов;
- неучтенная систематическая погрешность с дополнительными факторами будет характеризовать особенности способа и устойчивость во времени;
- динамическая погрешность с дополнительными факторами будет характеризовать инерционность способа и при нестационарном состоянии усиливает влияние малоинерционных способов расчета.

В свою очередь  $\delta$  должна различаться по методу определения для каждого способа. Для НК, НПГ, НДПЗ и НИК значение неучтенной систематической погрешности определяется по формулам оценок погрешности косвенных результатов измерения, которые, как правило, представляются в методиках обработки балансных испытаний. Для НПВД необходимо рассчитывать составляющую погрешности с учетом коэффициента корреляции между НПГ и НПВД:

$$\delta_{\text{ПВД}} = \sqrt{(\delta_{\text{ПВД}})^2 + 2 \cdot \rho \cdot \delta_{\text{ПВД}} \cdot \delta_{\text{ПГ}} + (\delta_{\text{ПГ}})^2}, \quad (3)$$

где:  $\rho$  - коэффициент корреляции между НПГ и НПВД, определяемый по результатам пусконаладочных работ.

Динамическая погрешность должна быть постоянной величиной, и для ее определения необходимо проанализировать результаты комплекса динамических испытаний, выполняемых на этапах ввода в эксплуатацию. Для определения динамической погрешности предлагается следующая формула:

$$\tau_i = \frac{\frac{1}{n} \sum_n \Delta N_i^k}{\Delta N_i^{\text{разг}}} \cdot \delta_{N_i}^{100} \cdot \frac{t_{k_i} - t_{\text{разг}}}{60}, \quad (4)$$

где:  $\Delta N_i^{\text{разг}}$  - изменение мощности по  $i$ -му способу на момент прекращения разгрузки;  $\Delta N_i^k$  - изменение мощности по  $i$ -му способу в конечный момент (точка минимума для  $i$ -го способа);  $n$  - количество способов;  $\delta_{N_i}^{100}$  - неучтенная систематическая погрешность  $i$ -го способа, взятая для номинальной мощности;  $t_{k_i}$  - время в секундах от момента начала разгрузки до конечного момента для  $i$ -го способа;  $t_{\text{разг}}$  - время в секундах на момент прекращения разгрузки; 60 - размерный множитель для перевода времени в секундах в минуты.

При практическом применении метода следует учитывать, что  $\sigma$  определяется только в стационарных режимах на длительном интервале времени (не менее 30

минут), и прекращать расчет (оставляя последнее полученное значение) при наличии сигналов срабатывания регуляторов, воздействующих на органы регулирования СУЗ или при увеличении скорости изменения мощности более 2 %/час. Эта уставка должна подтверждаться по результатам пусконаладочных работ (ПНР).

Очевидно, что для предложенного метода важно определить ряд коэффициентов на основании анализа результатов специальных испытаний, которые, соответственно, должны быть предусмотрены этапными программами при вводе энергоблоков в эксплуатацию. К таким специальным испытаниям следует отнести:

- проверку СВРК в части контроля мощности реактора в составе комплексных испытаний СВРК на разных уровнях мощности, по возможности с разными состояниями по количеству работающих ГЦН и с разной формой распределения энерговыделения в активной зоне;
- исследования тепловых балансов на разных уровнях мощности;
- динамические испытания с отключением ГЦН.

Основным испытанием должно стать первое из обозначенных испытаний. В качестве критериев успешности этого испытания с учетом подобранных коэффициентов  $k_1$ ,  $k_2$  на основании общих методов оценок погрешностей [12, 13], требований балансных испытаний и требований к СВРК [4] возможны следующие требования:

- погрешность средневзвешенной тепловой мощности не должна превышать проектного значения (для проектов действующих на сегодняшний день энергоблоков – это 2 % от номинальной мощности) с доверительной вероятностью не менее 95 %;
- отклонение средневзвешенной тепловой мощности, рассчитываемой по весовым коэффициентам и по погрешностям способов, не должно превышать 10 МВт от наиболее вероятного значения (по результатам балансных испытаний) в режимах соответствующих условиям проведения балансных испытаний;
- индекс стабильности показаний тепловой мощности  $\sigma_{cm}$ , определяемый как среднеквадратическое отклонение, не должен превышать значения по формуле:

$$\sigma_{кр} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \sigma_i^2}{N-1}}, \quad (5)$$

где:  $i$ ,  $N$  – номер способа и количество используемых способов расчета тепловой мощности.



## Результаты оценок весовых коэффициентов

Применим результаты испытаний, выполненных на номинальном уровне мощности на трех энергоблоках, для оценок средневзвешенной мощности по "традиционному" и предлагаемому методу. При "традиционном" методе в формуле для определения весовых коэффициентов (1) учитывается только составляющая неучтенной систематической погрешности  $\delta$  без коэффициента  $k_1$ . Погрешность определения средневзвешенной тепловой мощности определяем по формуле:

$$\delta N = \sqrt{\frac{\sum (W_i \delta N_i)^2}{\sum W_i^2}}, \quad (6)$$

где:

$$\delta N_i = \sqrt{\delta_i^2 + \sigma_i^2} \quad (7)$$

Полученные оценки на основании испытаний при вводе в эксплуатацию трех энергоблоков представлены в таблицах 1-3, где оценки по "традиционному" методу обозначены как "вариант 0". Оценки по предлагаемому методу с тремя наборами значений коэффициентов  $k_1$  и  $k_2$  обозначены как "варианты 1, 2 и 3". На рисунках 1-3 приведены графики изменения средневзвешенной тепловой мощности с весовыми коэффициентами по "традиционному" методу и по предлагаемому методу с наиболее оптимальными (см. далее) значениями коэффициентов  $k_1$  и  $k_2$  (по "варианту 3") при стационарном и нестационарном режимах работы реакторной установки.

В представленных таблицах отсутствуют оценки по НПВД. Для энергоблоков Тяньваньской АЭС (В-428) такой способ не был включен в проект СВРК, т.к. не мог быть реализован по причине отсутствия в проекте точек контроля расхода питательной воды на нитках ПВД из-за особенностей трассировки трубопроводов. На энергоблоке №3 Калининской АЭС данный способ входит в проектные, но из-за особенностей тепловой схемы 2-го контура обладает большой систематической погрешностью (выше предельно допустимой). Более подробно о причинах такой погрешности и возможных способах устранения проблемы указывается в работе [3].

Как видно из представленных результатов, для всех трех энергоблоков с коэффициентами "варианта 3" удалось добиться оптимальных значений весовых коэффициентов. В данном случае оптимальными считались такие значения, при которых было достигнуто наименьшее суммарное отклонение от обозначенных в описании метода критериев. Таким образом, можно сделать вывод, что предложенный метод позволяет более корректно учитывать особенности используемых способов

расчетов тепловой мощности реактора и, вместе с тем, добиться приемлемой точности в оперативных оценках средневзвешенной тепловой мощности.

Поскольку, как показано выше, те или иные особенности проектов энергоблоков АЭС могут снижать количество используемых способов, то в существующих и новых проектах необходимо расширять количество используемых независимых способов расчетов тепловой мощности. Например, в настоящее время начинается постепенное внедрение способа расчета тепловой мощности по параметрам пара на ПГ [14]. Кроме этого, в случае решения проблем с повышением точности измерений температуры теплоносителя на входе и на выходе из ТВС [3, 8] возможно использование метода расчета тепловой мощности реактора по мощности отдельных ТВС, определяемой по теплотехническим параметрам, как это применяется на энергоблоках с реакторами ВВЭР-440.

### **Заключение**

Предложен метод оценки весовых коэффициентов при определении средневзвешенной тепловой мощности, заключающийся в более корректном оперативном определении суммарной погрешности используемых способов расчетов тепловой мощности. Оценки весовых коэффициентов при применении предложенного метода к данным, полученным при выполнении ПНР на трех энергоблоках, введенных в эксплуатацию, показали удовлетворительные результаты. Исходя из этого, следует провести опытное применение и верификацию метода при проведении ПНР на одном из новых энергоблоков. В случае успешного завершения опытного применения необходимо внедрение метода в алгоритмы штатного прикладного обеспечения СВРК.

Для повышения точности определения средневзвешенной и наиболее достоверной тепловой мощности реактора необходимо также расширение количества способов расчета тепловой мощности как по традиционным методам с устранением причин существенных погрешностей, так и по другим методам, которые не нашли ещё широкого применения на промышленных реакторных установках, но могут быть включены в новые проекты.

### **Литература**

1. В.А. Брагин, И.В. Батенин и др. Системы внутриреакторного контроля АЭС с ВВЭР. М., Энергоатомиздат, 1987, 127 с.
2. Ф.Я. Овчинников, Л.И. Голубев и др. Эксплуатационные режимы водо-водяных энергетических ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1979, 288 с.

3. Ю.В Саунин, А.Н. Добротворский, А.В. Семенихин. Комплексные испытания модернизированной системы внутриреакторного контроля при вводе в эксплуатацию блока №3 Калининской АЭС. Материалы 5-й международной научно-технической конференции "Обеспечение безопасности на АЭС с ВВЭР". Подольск, ФГУП ОКБ "Гидропресс", 2007 г.
4. ГОСТ 26635-85. Реакторы ядерные энергетические с водой под давлением. Общие требования к СВРК. Госстандарт Союза ССР. 1985.
5. А.И. Клемин, Л.Н. Полянин, М.М. Стригулин. Теплогидравлический расчет и теплотехническая надежность ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1980, 261 с.
6. М.Н. Селиванов, А.Э. Фридман, Ж.Ф. Кудряшова. Качество измерений. Метрологическая справочная книга, Л., Лениздат, 1987, 295 с.
7. М.М. Жук, Казакова Н.В. Расчетные погрешности измерительных каналов УВС и СВРК, определение точности поддержания параметров реакторной установки в стационарном режиме работы по ВМПО "Хортица". Отчет инв. №1056. Балаковоатомтехэнерго, г. Балаково, 1993.
8. Ю.В Саунин, А.Н. Добротворский, А.В.Семенихин. Опыт контроля температуры теплоносителя первого контура на входе в ТВС при вводе в эксплуатацию блока №1 Тяньваньской АЭС. 6-е собрание международного симпозиума "Измерения, важные для безопасности реакторов". Сборник трудов. Москва, ОАО "Инкор", 2007..
9. Анализ представительности контроля температуры теплоносителя на выходе из кассет в серийных реакторах ВВЭР-1000. Отчет 302-СМ-001. ОКБ "Гидропресс", 1983.
10. В.Ф.Бай и др. Опыт эксплуатации термоконтроля ВВЭР-1000 и повышения надежности контроля условий работы ТВС (энергоблоки 1-й очереди Калининской АЭС). 2-е собрание международного симпозиума "Измерения, важные для безопасности реакторов". Сборник трудов. Москва, РНЦ "Курчатовский институт", 2002.
11. Бай В.Ф., Богачек Л.Н., Лачугин А.В., Макаров С.В. Некоторые проблемы, возникающие при эксплуатации АКНП-7 на блоке № 3 Калининской АЭС. Материалы 6-й международной научно-технической конференции "Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики". Москва, концерн "Росэнергоатом", 2008 г.
12. В А.Грановский, Т.Н. Сирая. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. Л., Энергоатомиздат, 1990, 288 с.
13. П.В.Новицкий, И.А. Зограф. Оценка погрешностей результатов измерений. Л., Энергоатомиздат, 1985, 248 с.

14. Ю.С.Горбунов, А.Г.Авдеев, Б.М. Корольков. Совершенствование систем контроля и управления безопасной работы реактора установки ВВЭР-1000 за счет использования дополнительного способа определения тепловой мощности реактора по параметрам пара от парогенераторов. Материалы 6-й международной научно-технической конференции "Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики". Москва, концерн "Росэнергоатом", 2008 г.

#### РЕФЕРАТ СТАТЬИ

На основании анализа составляющих погрешности определения тепловой мощности реактора различными способами, для повышения точности и оперативности определения средневзвешенной тепловой мощности реактора предлагается метод оперативной оценки весовых коэффициентов. Приведены результаты расчетов средневзвешенной тепловой мощности по традиционному и предлагаемому методам, выполненных по данным комплексных испытаний системы внутрореакторного контроля в части контроля тепловой мощности реактора и исследований тепловых балансов при вводе в эксплуатацию энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР-1000.

Таблица 1

Результаты расчетов по данным ПНР на энергоблоке №1 Тяньваньской АЭС

Метод	Мощность, МВт	$\sigma$ , МВт	$\tau$ , МВт	$\delta$ , МВт	Wi (вариант 0)	Вариант 1		Вариант 2		Вариант 3	
						k <sub>1</sub> , k <sub>2</sub>	Wi	k <sub>1</sub> , k <sub>2</sub>	Wi	k <sub>1</sub> , k <sub>2</sub>	Wi
НИК	2982	6,2	23	25	0.226	k <sub>1</sub> =1 k <sub>2</sub> =0	0.278	k <sub>1</sub> =1 k <sub>2</sub> =1	0.307	k <sub>1</sub> =1 k <sub>2</sub> =1	0.260
НПГ	3011	10,3	33	15	0.627	k <sub>1</sub> =1 k <sub>2</sub> =0	0.532	k <sub>1</sub> =1 k <sub>2</sub> =1	0.277	k <sub>1</sub> =1 k <sub>2</sub> =0,5	0.387
НДПЗ	3049	5,7	4	47	0.064	k <sub>1</sub> =1 k <sub>2</sub> =0	0.082	k <sub>1</sub> =1 k <sub>2</sub> =1	0.180	k <sub>1</sub> =1 k <sub>2</sub> =1	0.153
НИК	2988	5,2	5	41	0.084	k <sub>1</sub> =1 k <sub>2</sub> =0	0.108	k <sub>1</sub> =1 k <sub>2</sub> =1	0.236	k <sub>1</sub> =1 k <sub>2</sub> =1	0.200
$\delta N / N$ , МВт				18 / 3005		22 / 3004		32 / 3004		28 / 3005	
$\sigma_{см}$ , МВт				8,1		7,6		6,4		6,1	
$\sigma_{кр}$ , МВт				8,2							

Таблица 2

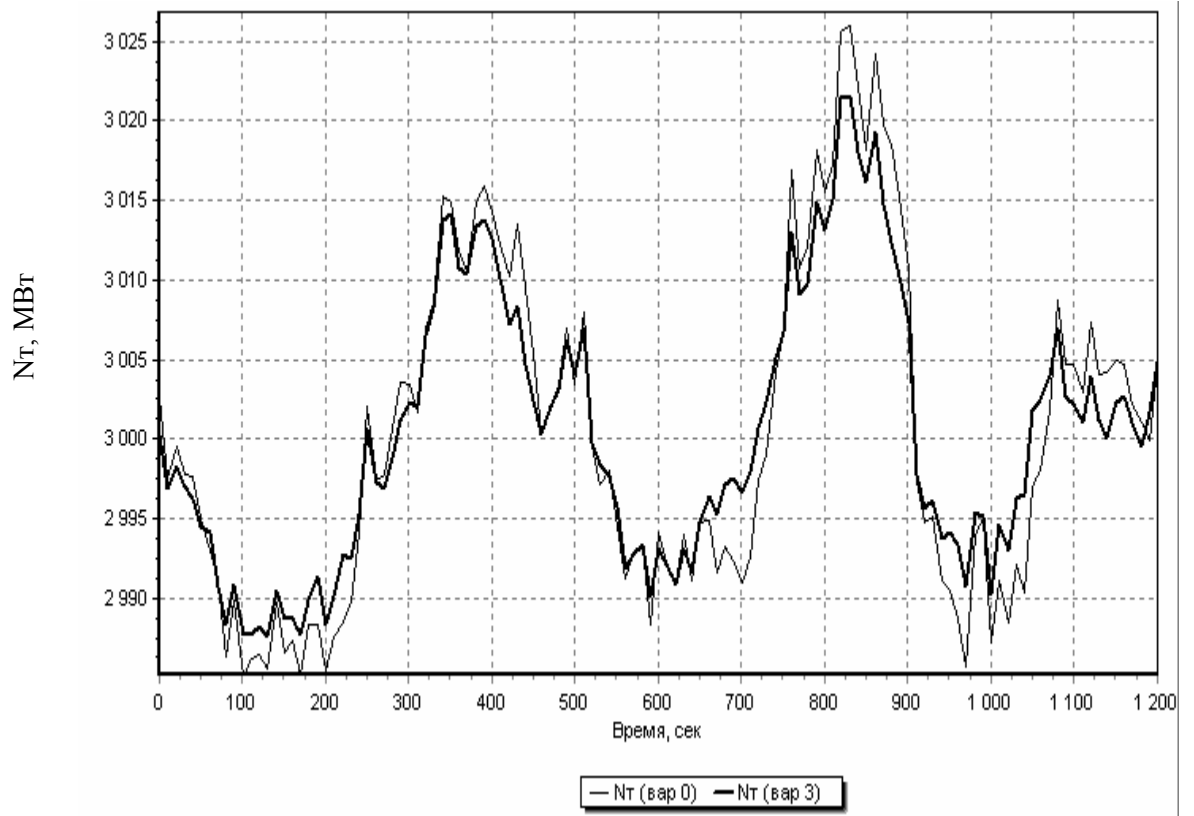
Результаты расчетов по данным ПНР на энергоблоке №2 Тяньваньской АЭС

Метод	Мощность, МВт	$\sigma$ , МВт	$\tau$ , МВт	$\delta$ , МВт	Wi (вариант 0)	Вариант 1		Вариант 2		Вариант 3	
						k <sub>1</sub> , k <sub>2</sub>	Wi	k <sub>1</sub> , k <sub>2</sub>	Wi	k <sub>1</sub> , k <sub>2</sub>	Wi
НИК	2946	6,4	25	27	0.206	k <sub>1</sub> =1 k <sub>2</sub> =0	0.260	k <sub>1</sub> =1 k <sub>2</sub> =1	0.235	k <sub>1</sub> =1 k <sub>2</sub> =1	0.200
НПГ	2993	13,2	23	15	0.669	k <sub>1</sub> =1 k <sub>2</sub> =0	0.576	k <sub>1</sub> =1 k <sub>2</sub> =1	0.435	k <sub>1</sub> =1 k <sub>2</sub> =0,5	0.519
НДПЗ	2934	5,8	4	65	0.036	k <sub>1</sub> =1 k <sub>2</sub> =0	0.047	k <sub>1</sub> =1 k <sub>2</sub> =1	0.095	k <sub>1</sub> =1 k <sub>2</sub> =1	0.081
НИК	2958	5,6	5	41	0.089	k <sub>1</sub> =1 k <sub>2</sub> =0	0.117	k <sub>1</sub> =1 k <sub>2</sub> =1	0.235	k <sub>1</sub> =1 k <sub>2</sub> =1	0.200
$\delta N / N$ , МВт				17 / 2978		22 / 2974		29 / 2968		26 / 2972	
$\sigma_{см}$ , МВт				10,4		9,6		8,5		8,9	
$\sigma_{кр}$ , МВт				9,7							

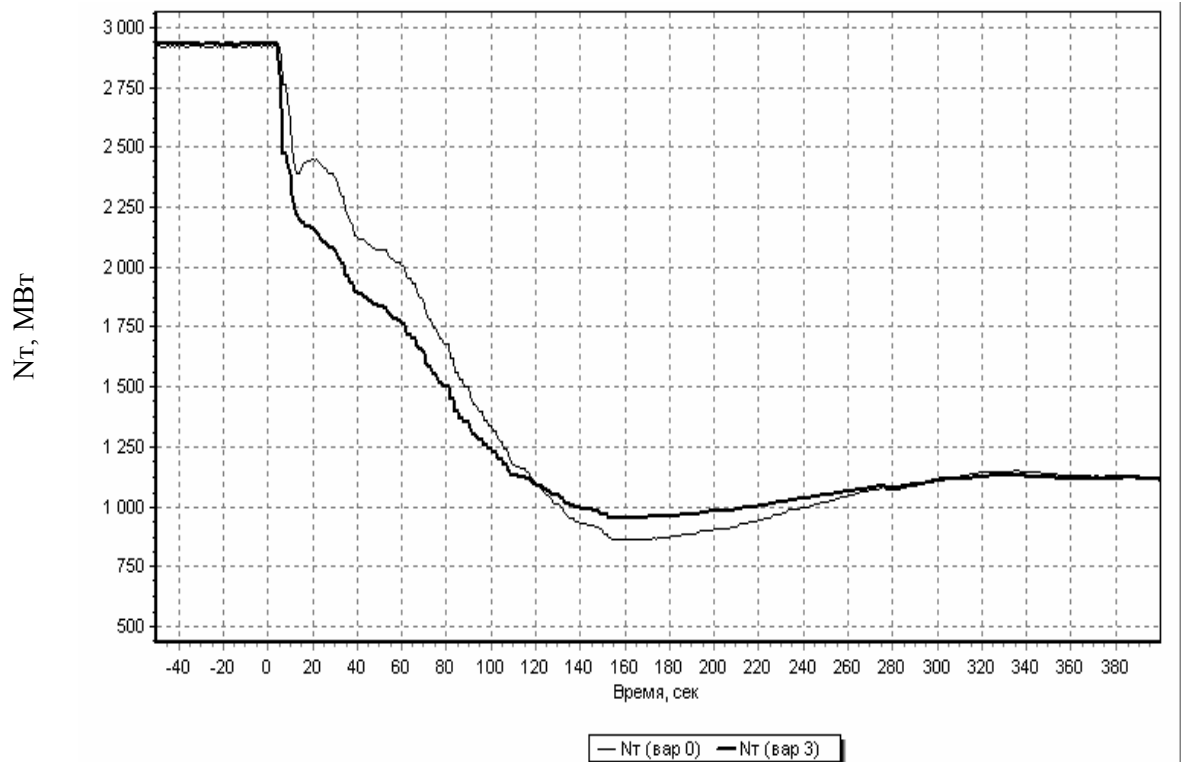
Таблица 3

Результаты расчетов по данным ПНР на энергоблоке №3 Калининской АЭС

Метод	Мощность, МВт	$\sigma$ , МВт	$\tau$ , МВт	$\delta$ , МВт	Wi (вариант 0)	Вариант 1		Вариант 2		Вариант 3	
						k <sub>1</sub> , k <sub>2</sub>	Wi	k <sub>1</sub> , k <sub>2</sub>	Wi	k <sub>1</sub> , k <sub>2</sub>	Wi
НИК	3054	5,8	18	33	0.229	k <sub>1</sub> =1 k <sub>2</sub> =0	0.435	k <sub>1</sub> =1 k <sub>2</sub> =1	0.396	k <sub>1</sub> =3 k <sub>2</sub> =2	0.229
НПГ	2889	49,4	28	21	0.566	k <sub>1</sub> =1 k <sub>2</sub> =0	0.168	k <sub>1</sub> =1 k <sub>2</sub> =1	0.154	k <sub>1</sub> =1 k <sub>2</sub> =0	0.312
НДПЗ	2847	3,8	10	79	0.040	k <sub>1</sub> =1 k <sub>2</sub> =0	0.078	k <sub>1</sub> =1 k <sub>2</sub> =1	0.089	k <sub>1</sub> =0,8 k <sub>2</sub> =1	0.175
НИК	2993	3,4	7	39	0.164	k <sub>1</sub> =1 k <sub>2</sub> =0	0.319	k <sub>1</sub> =1 k <sub>2</sub> =1	0.361	k <sub>1</sub> =2 k <sub>2</sub> =3	0.284
$\delta N / N$ , МВт				25 / 2942		39 / 2991		39 / 2988		50 / 2949	
$\sigma_{см}$ , МВт				28,2		9,2		8,6		15,8	
$\sigma_{кр}$ , МВт				29,0							



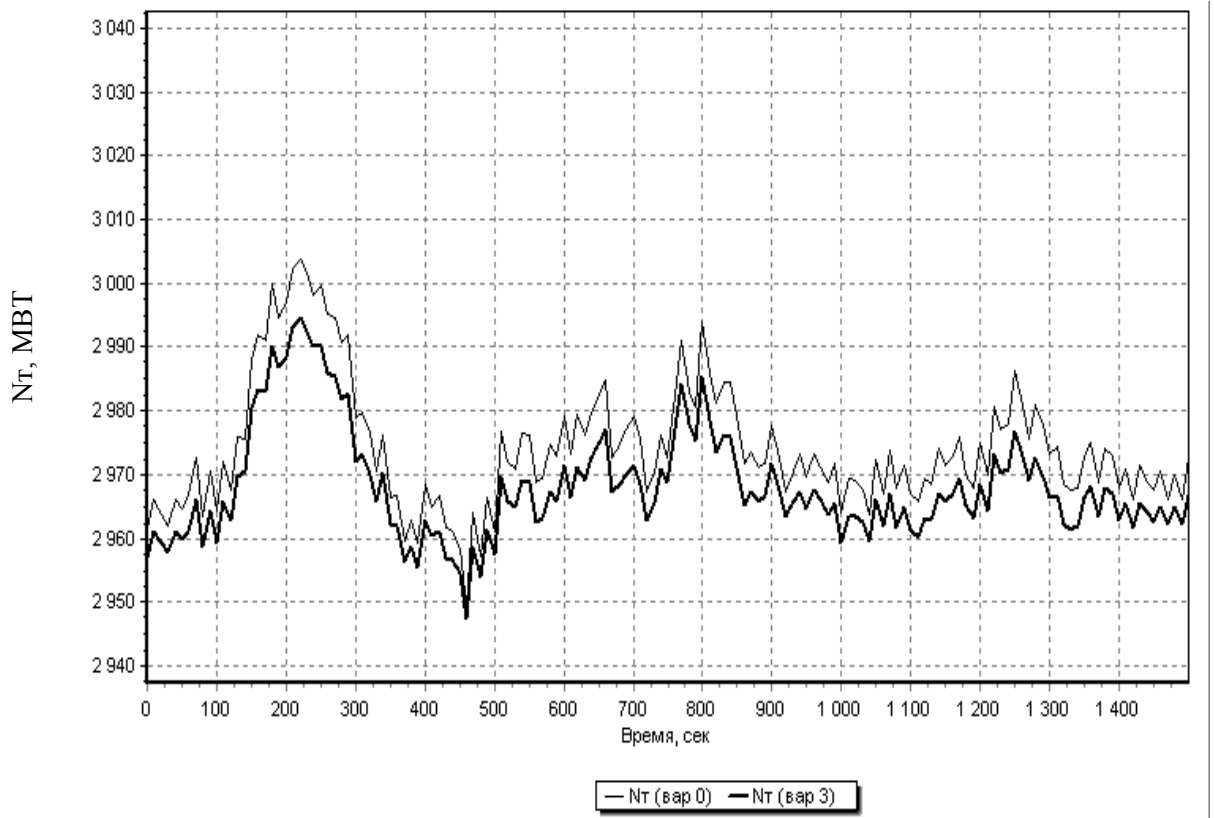
a)



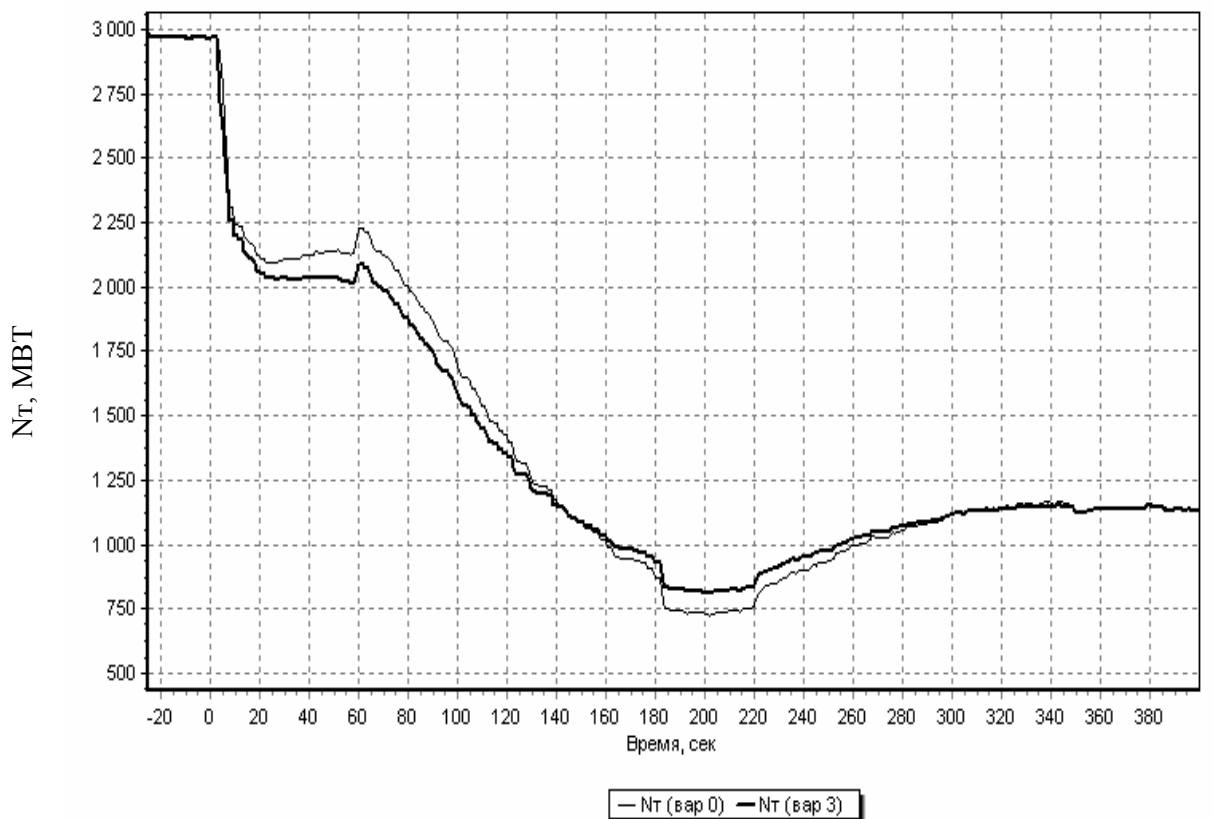
б)

Рис.1. Изменение средневзвешенной тепловой мощности с весовыми коэффициентами по "традиционному" методу –  $N_t$  (вар 0) и предлагаемому методу –  $N_t$  (вар 3) по данным ПНР на энергоблоке №1 Тяньваньской АЭС:

а) стационарный режим; б) переходный режим



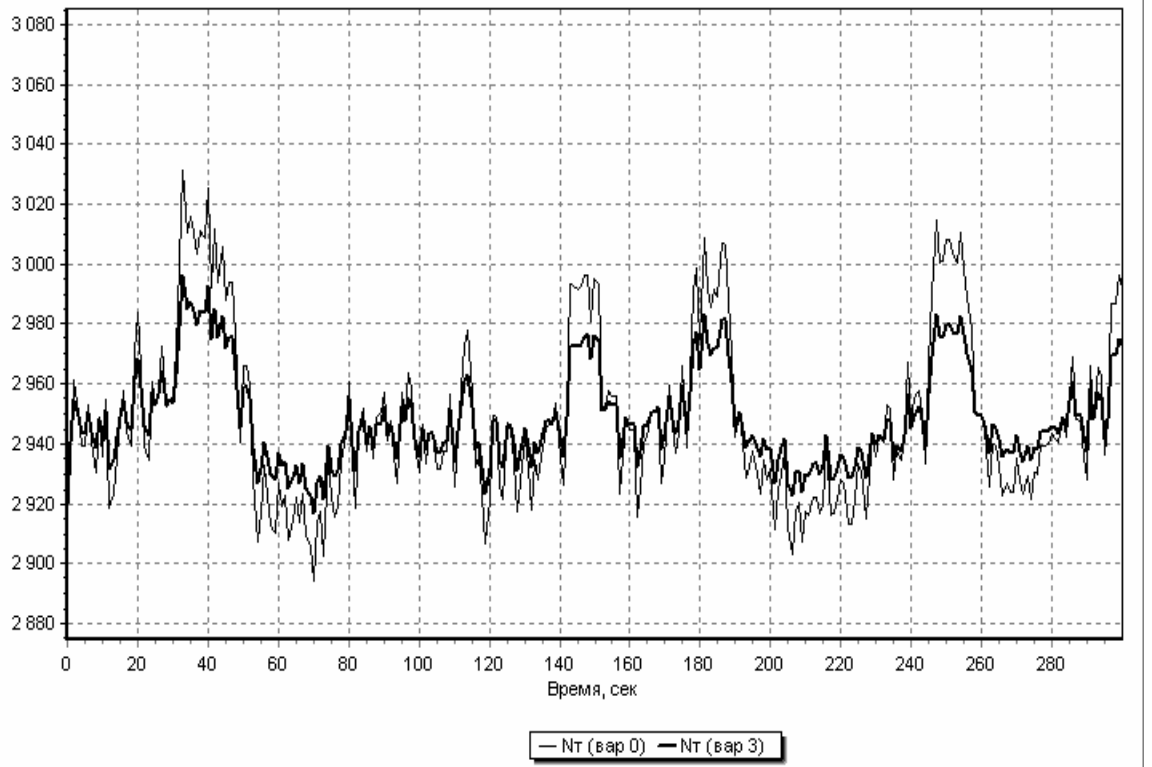
а)



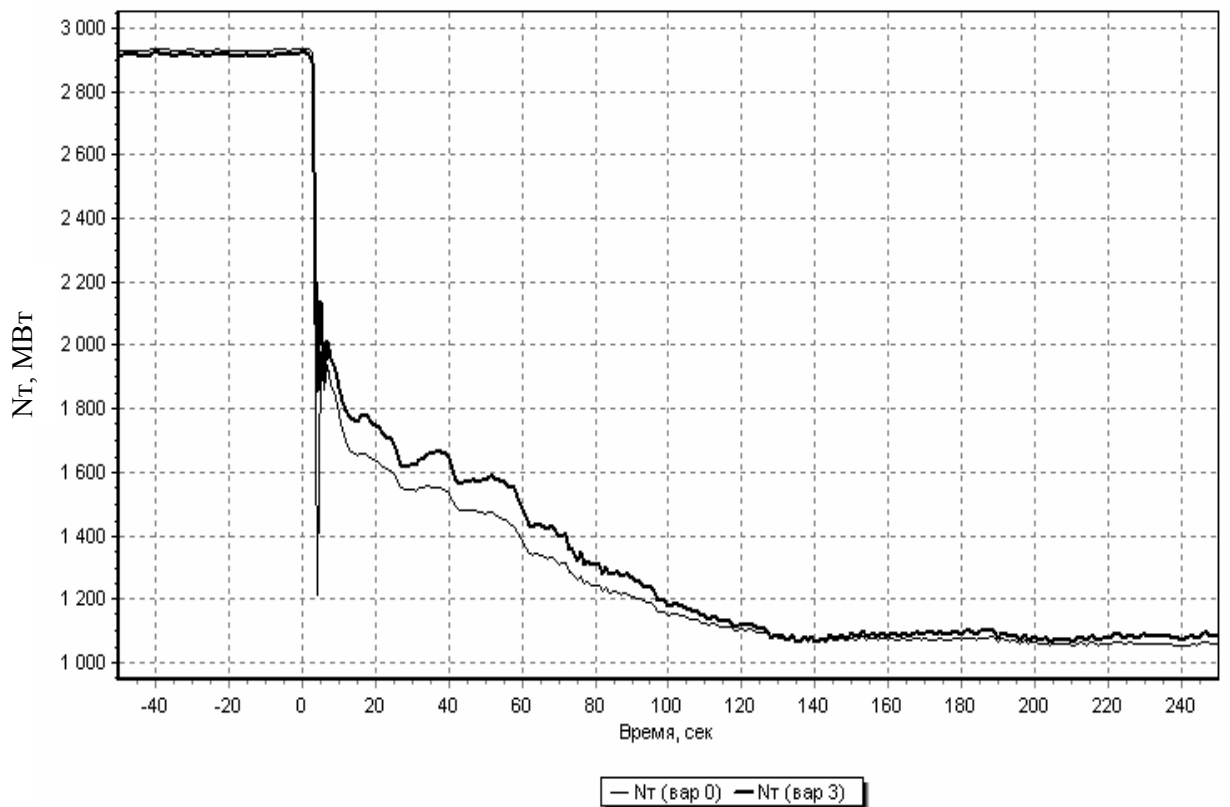
б)

Рис.2. Изменение средневзвешенной тепловой мощности с весовыми коэффициентами по "традиционному" методу –  $N_t$  (вар 0) и предлагаемому методу –  $N_t$  (вар 3) по данным ПНР на энергоблоке №2 Тяньваньской АЭС:

а) стационарный режим; б) переходный режим



а)



б)

Рис.3. Изменение средневзвешенной тепловой мощности с весовыми коэффициентами по традиционному –  $N_t$  (вар 0) и предлагаемому методу –  $N_t$  (вар 3) по данным ПНР на энергоблоке №3 Калининской АЭС:.

а) стационарный режим; б) переходный режим