

# АЛЬТЕРНАТИВНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАСХОДА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ПЕТЛЕ ПРИ ВЫБЕГЕ ГЦН

Ю.В. Саунин, А.Н. Добротворский, А.В. Семенихин  
ОАО «Атомтехэнерго» Нововоронежский филиал «Нововоронежатомтехэнерго»  
г. Нововоронеж, Россия, 2011г.

Исходя из повышенных требований к безопасности ВВЭР, в последнее время уделяется большое внимание оперативному контролю запаса до кризиса теплоотдачи (ЗКТ). Это определяется тем, что проектными характеристиками корпусных реакторов под давлением допускается слабое поверхностное пузырьковое кипения (до 5 % паросодержания в теплоносителе «горячего» канала у ВВЭР-1000 и 14 % у ВВЭР-1200). Для недопущения перерастания кипения в объемное в новых и модернизированных проектах ВВЭР предусмотрен постоянный контроль значения ЗКТ с инициированием управляющего сигнала аварийной или предупредительной защиты при достижении заданных уставок.

Оперативный контроль ЗКТ и формирование соответствующих сигналов защиты реализуется на базе сложных расчетных алгоритмов в ПТК НУ системы внутрореакторного контроля (СВРК). Сложно недооценить важность СВРК для ВВЭР при эксплуатации реакторной установки. Помимо ЗКТ с помощью СВРК также контролируется большинство параметров, для которых установлены эксплуатационные пределы, например: тепловая мощность реактора, расход теплоносителя через реактор, температуры на выходе ТВС и в петлях, подогревы в петлях и на ТВС, локальное энерговыделение (ЭВ). Часть из этих контролируемых параметров (тепловая мощность, расход, ЭВ) неразрывно связаны с алгоритмом расчета ЗКТ. На данный момент в последних модификациях СВРК применяется комплексный консервативный подход в определении ЗКТ: для условий сильно недогретого теплоносителя (относительная энтальпия < -0,3) расчет ведется по корреляции Смолина, а для условий приближенных к кризисным (относительная энтальпия > -0,3) используется корреляция ОКБ ГП.

Наиболее неблагоприятным режимом по ЗКТ является переходный режим с отключением ГЦН, характеризующимся уменьшением расхода теплоносителя через активную зону. При проектном обосновании безопасности энергоблоков с ВВЭР для данной ситуации для блока с РУ В-428 минимальное значение ЗКТ ~1,11, а для РУ с В-320 - ~1,02.

Возможности современных СВРК позволяют проводить представительный контроль за ЗКТ практически во всех режимах эксплуатации РУ как в стационарных, так и переходных. Но если для стационарных режимов расчет не вызывает осложнений, то в переходных режимах с отключением ГЦН имеется ряд проблем. К таким проблемам можно отнести следующие:

- несовершенство используемого алгоритма расчета расхода теплоносителя при выбеге ГЦН;
- недостаточность КИП, удовлетворяющих требованиям к управляющим системам безопасности (УСБ);
- сложность протекания физического процесса в РУ при выбеге ГЦН.

В настоящей работе делается обзор вышеуказанных проблем и предлагается альтернативный способ расчета расхода теплоносителя при выбеге ГЦН, позволяющий в значительной мере решить имеющиеся проблемы. Данный способ основан на анализе большого количества экспериментального материала, полученного при натурных испытаниях, выполненных при вводе в эксплуатацию энергоблоков с ВВЭР разных проектов.

**Несовершенство алгоритма расчета выбега ГЦН.** В различных модификациях современных СВРК в расчетах на верхнем уровне (ВУ) [1, 2] применяется наиболее простой и понятный алгоритм расчета расхода теплоносителя при выбеге. Формула расчета следующая:

$$G = G_0 \cdot \frac{\Delta P}{\Delta P_0} \quad (1)$$

где  $G$  - расход теплоносителя в петле на выбеге ГЦН,  $G_0$  – расход теплоносителя в момент прихода сигнала об отключении ГЦН,  $\Delta P$  – перепад давления на ГЦН на выбеге,  $\Delta P_0$  - перепад давления на ГЦН в момент прихода сигнала об отключении ГЦН.

Расчет по (1) ведется до момента, пока  $\Delta T$  (подогрев в петле) больше  $0,1$  °С. В противном случае, расход считается по формуле обратного тока. При расчетах по такому алгоритму на примере данных блока №2 Ростовской АЭС мы имеем картину (кривая 1) по изменению расхода в отключаемой петле, приведенную на рисунке 1. По приведенному рисунку можно отметить следующие недостатки:

- а) отсутствие снижения расхода до «0», т.к. перепад давления не достигает нуля (значение перепада давления при обратном токе составляет  $\sim 0,3$  МПа);
- б) имеется скачок расхода с прямого тока на обратный  $\sim 10000$  м<sup>3</sup>/ч;
- в) снижение величины обратного тока до номинального вследствие продолжающегося выбега ГЦН,
- г) определение времени переворота теплоносителя зависит только от подогрева в петле.

Вследствие последнего недостатка происходит запаздывание определения переворота тока теплоносителя как из-за инерционности термодатчиков, так и необходимого значимого транспортного времени прохождения теплоносителя от холодных до горячих ниток с малой скоростью.

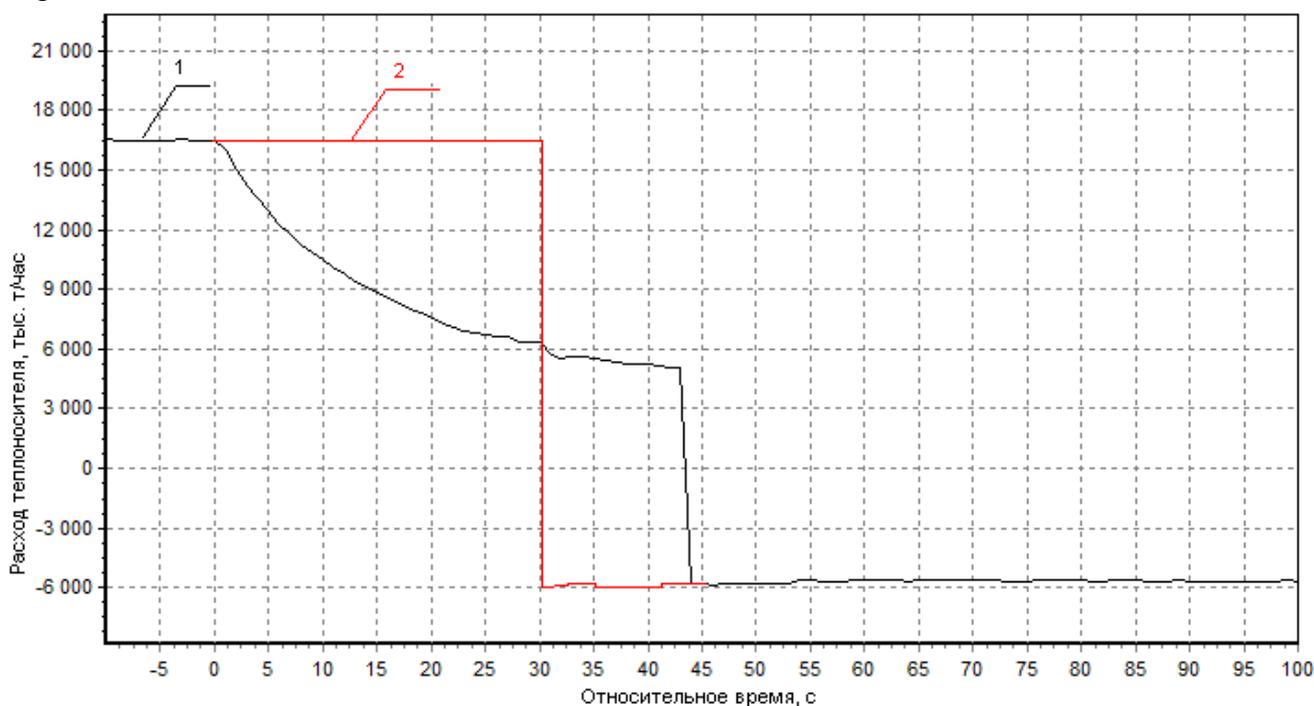


Рисунок 1. Расход теплоносителя в петле №2 при отключении ГЦН-2 из четырех работающих, определенный по разным алгоритмам ( 1 – ВУ СВРК, 2 - НУ СВРК, 3- ОКБ ГП, 4 – ВНИИАЭС). Ростовская АЭС. Энергоблок №2

В реализации НУ СВРК [1, 2] (для сигналов защит по ЗКТ) данный алгоритм не применяют, а используют неконсервативное решение по «замораживанию» расхода теплоносителя в отключаемой петле на 30 секунд. Соответственно такое решение более простое и требует меньше привязок, но в еще большей степени не отражает ход реально протекающих процессов в РУ (См. кривая 2 на рисунке 1).

Для улучшения представительности расчетов расхода при выбеге ГЦН к настоящему времени разными коллективами предложены еще 2 метода.

1. Алгоритм расчета, предложенный ОКБ ГП «Гидропресс»[3] и примененный в тестовом режиме для энергоблока №2 Ростовской АЭС. В его основе заложен принцип учета баланса гидравлического сопротивления в контуре теплоносителя отдельно в петлях с отключаемыми ГЦН и с работающими. Работа алгоритма применительно к РоАЭС-2 приведена на рисунке 2 (кривая 1). Как видно из рисунка, реализация алгоритма в ПТК-НУ была выполнена исходя из минимального внесения изменения в расчетные модули ПТК, поэтому на

30 секунде происходил останов расчета выбега ГЦН и переход на формулу обратного тока теплоносителя. Недостатками данного метода, по нашему мнению, является:

- наличие большого числа настраиваемых констант (общее количество – 18 штук) и сложность их определения;
- необходимость корректировки констант в зависимости от изменений характеристик петлевого тракта (выемных частей ГЦН);
- использование данных по всем петлям.

Авторы работы [9] приводят показания выбега ГЦН после корректировки коэффициентов (кривая 2 рисунка 2), аргументируя их представительность хорошей сходимостью с расчетным кодом программы «ТРАП-97» (кривая 3 рисунка 2), используемой в обосновании безопасности блоков ВВЭР-1000. Как увидим ниже, сходимость по методу НВАТЭ с «ТРАП-97» еще более высокая.

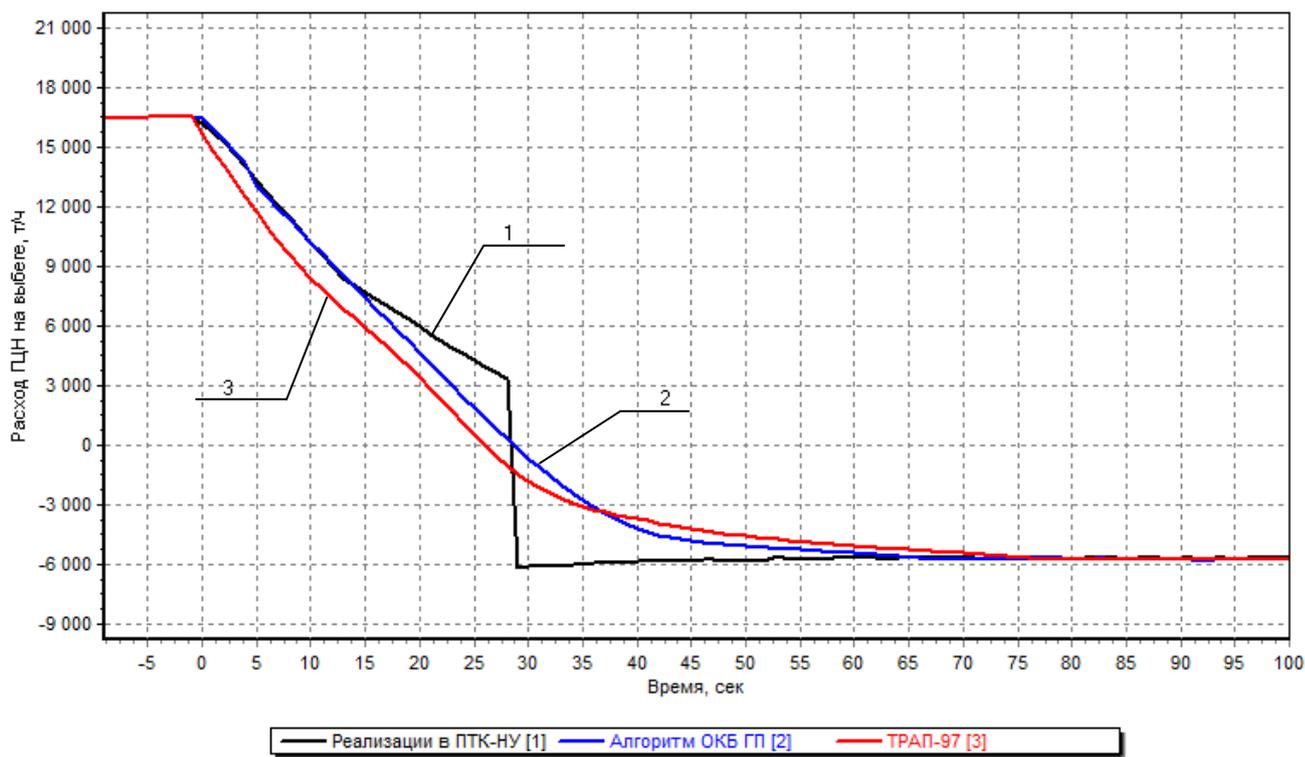


Рисунок 2. Расход теплоносителя в петле №2 при отключении ГЦН-2 из четырех работающих (РоАЭС-2. 09.09.2010 г.). Алгоритм ОКБ «Гидропресс».

2. Алгоритм расчета, предложенный ВНИИАЭС [4]. Данный алгоритм, по нашему мнению, наиболее понятно отражает процесс выбега ГЦН, но обладает другими недостатками, которые ограничивают его использование:

- необходимо использование данных по большему числу измеряемых параметров, в том числе по всем петлям;
- применение для расчета данных по измеряемому перепаду давления на реакторе (по классификации ОПБ-88/97 относится к 3Н) ограничивает использование алгоритма в защитах, выдаваемых СВРК (данный параметр в настоящее время не заводится в ПТК-3 СВРК);
- показания перепада давления на реакторе сильно зависят от конкретного отключаемого ГЦН, поэтому возможны различия в выбегах;
- неуниверсальность алгоритма (различные ветки расчета в зависимости от количества работающих ГЦН, грубое деление расхода между 2-мя отключаемыми петлями).

Работа алгоритма применительно к РоАЭС-2 приведена на рисунке 2.

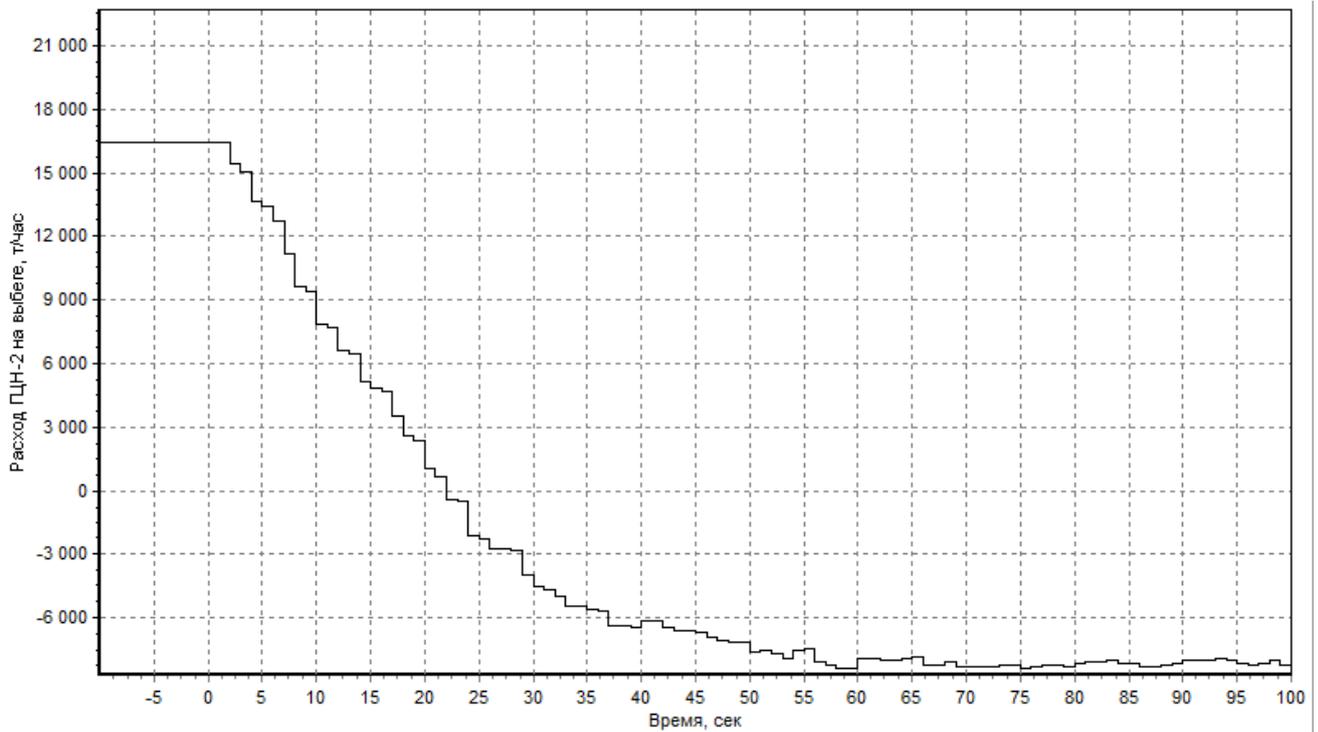


Рисунок 3. Расход теплоносителя в петле №2 при отключении ГЦН-2 из четырех работающих (РоАЭС-2. 09.09.2010 г.). Алгоритм ВНИИАЭС.

### **Недостаточность КИП, удовлетворяющих требованиям предъявляемым к УСБ.**

Одним из представительных оперативных способов расчета расхода на выбеге ГЦН мог бы являться расчет по оборотам ГЦН, т.к. до момента появления обратного тока зависимость расхода от оборотов почти прямо пропорциональная. Однако в современных проектах, к каналам контроля оборотов ГЦН не применяются требования как к каналам контроля УСБ (классификация 4Н по ОПБ-88/97 [6]), и поэтому их показания выводятся только в систему диагностирования состояния ГЦН.

Еще одним оперативным способом расчета расхода на выбеге ГЦН мог бы являться алгоритм расчета по перепаду давления на ПГ при условии определения коэффициентов гидравлического сопротивления, вывода отрицательного значения давления, применения измерительного прибора, имеющего хорошие точностные характеристики. Но, к сожалению, каналы контроля этого параметра тоже не удовлетворяют требованиям к УСБ.

**Сложность протекания физического процесса.** Для понимания физических процессов, происходящих при отключении ГЦН, по мнению авторов недостаточно знать изменение напора ГЦН и подогрева теплоносителя в петле в силу ряда причин:

- напор ГЦН снижается, но не переходит к нулевому значению, т.к. появляется обратный ток теплоносителя и тогда ГЦН работает как местное сопротивление;
- точки замера температуры в петле (холодной и горячей) находятся на некотором удалении от ПГ, что приводит к транспортной инерционности подогрева в петле;
- многочисленные опытные данные показывают, что появление обратного тока не совпадает с прекращением вращения вала ГЦН, и оно происходит немного ранее.

Повышение возможностей программно-технических средств, используемых в новых и модернизируемых системах контроля и управления АЭС позволяет осуществлять более глубокий анализ, в частности, переходных процессов и выявлять ранее не отмечаемые особенности. Так при анализе имеющихся опытных данных по выбегам ГЦН при динамических испытаниях блоков КАЭС, ТАЭС и РоАЭС во время ПНР, авторы пришли к выводу, что наиболее правильно оценивать процесс выбега можно по изменению температуры холодной нитки в отключаемой петле с учетом инерционности показаний термодатчика. Характерное поведение температуры холодной нитки при отключении ГЦН в разных сочетаниях

работающих и отключаемых петель приведено на рисунках 4а, 4б, 4в. На рисунке 4а можно выделить несколько интересных областей:

Область 1. Снижение температуры до минимального значения. В этой области идет процесс первоначального уменьшения оборотов вала ГЦН прямо пропорционального уменьшению расхода.

Область 2. Достижение точки минимума температуры. – В этой точке происходит изменение направления движения теплоносителя в петле и при этом вращение вала ГЦН еще продолжается, но из-за появления сопротивления встречного потока значение расхода не прямо пропорционально оборотам.

Область 3. Увеличение температуры до максимального значения. В этой области, по-видимому, происходит возврат из реактора теплоносителя, уже прошедшего через датчик.

Область 4. Достижение максимума температуры. Здесь происходит остановка вращения вала ГЦН.

Область 5. Снижение температуры до второго минимального значения. В этой области идет процесс увеличения обратного расхода ГЦН.

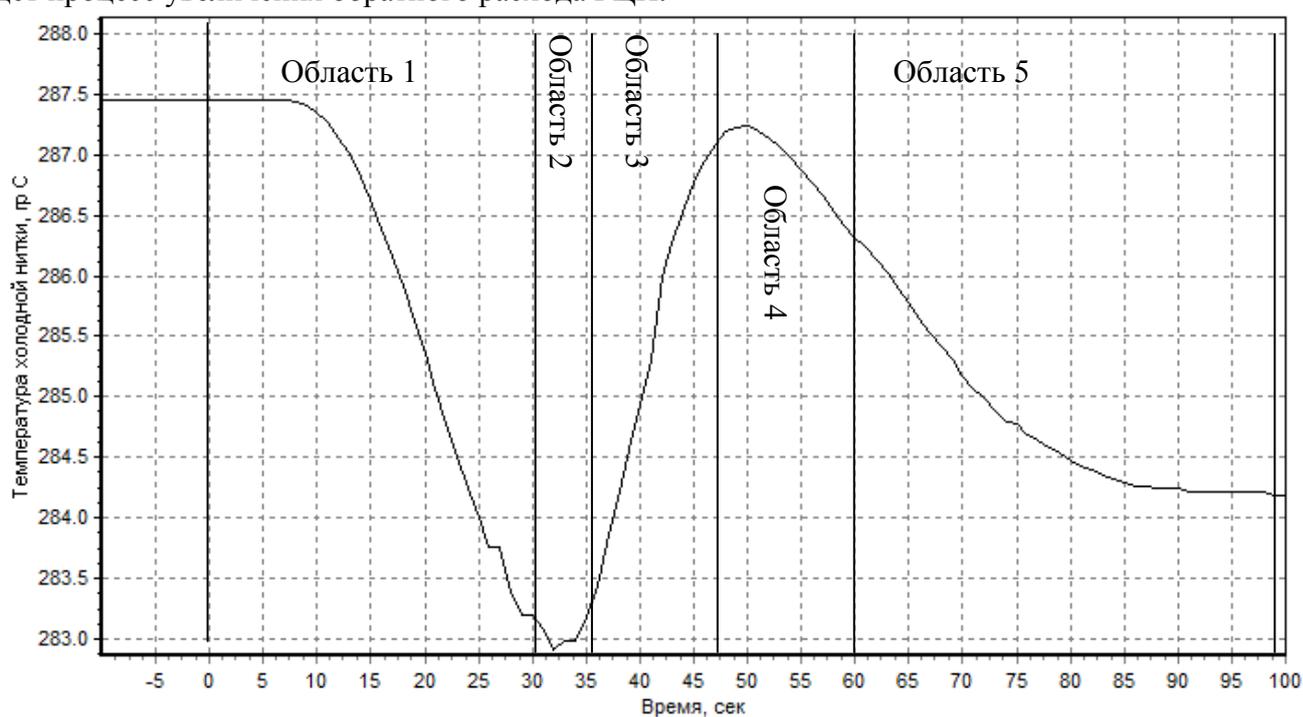


Рисунок 4а. Температура теплоносителя в холодной нитке петли №2 при отключении ГЦН-2 из четырех работающих (РоАЭС-2. 09.09.2010 г.).

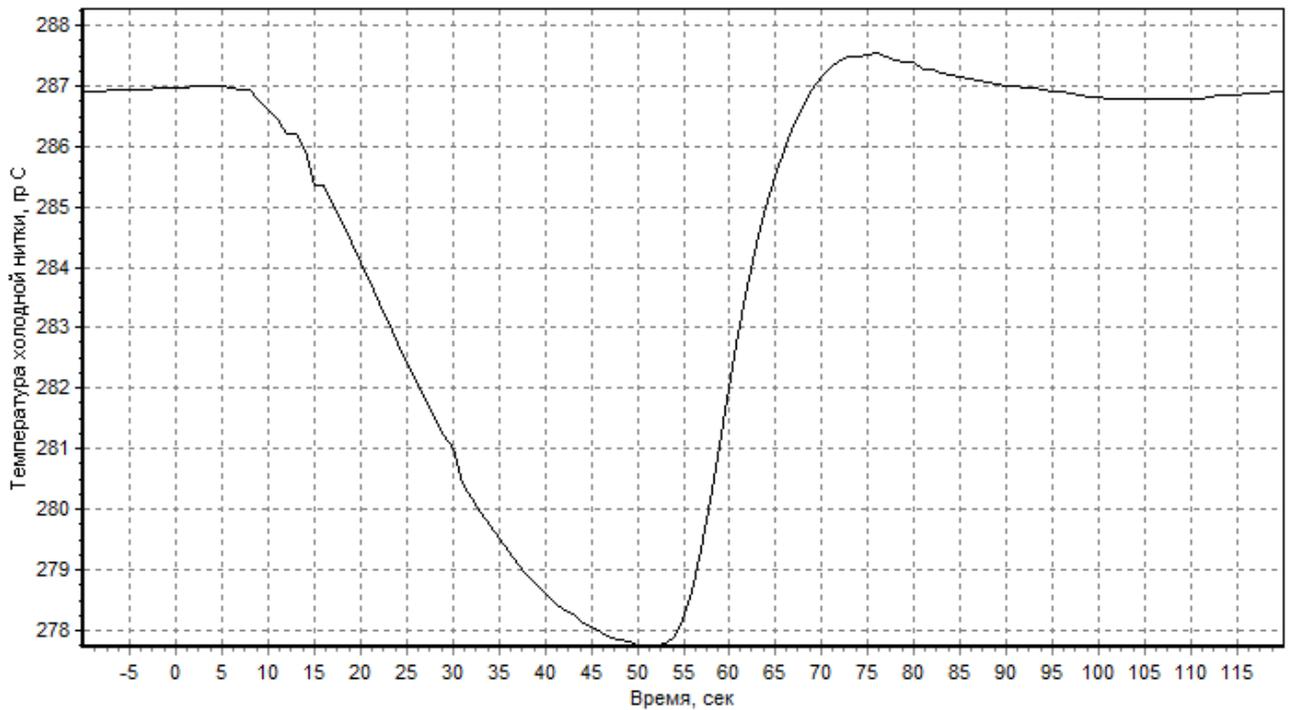


Рисунок 4б. Температура теплоносителя в холодной нитке петли №4 при отключении ГЦН-4 из трех работающих (РоАЭС-2. 09.09.2010 г.).

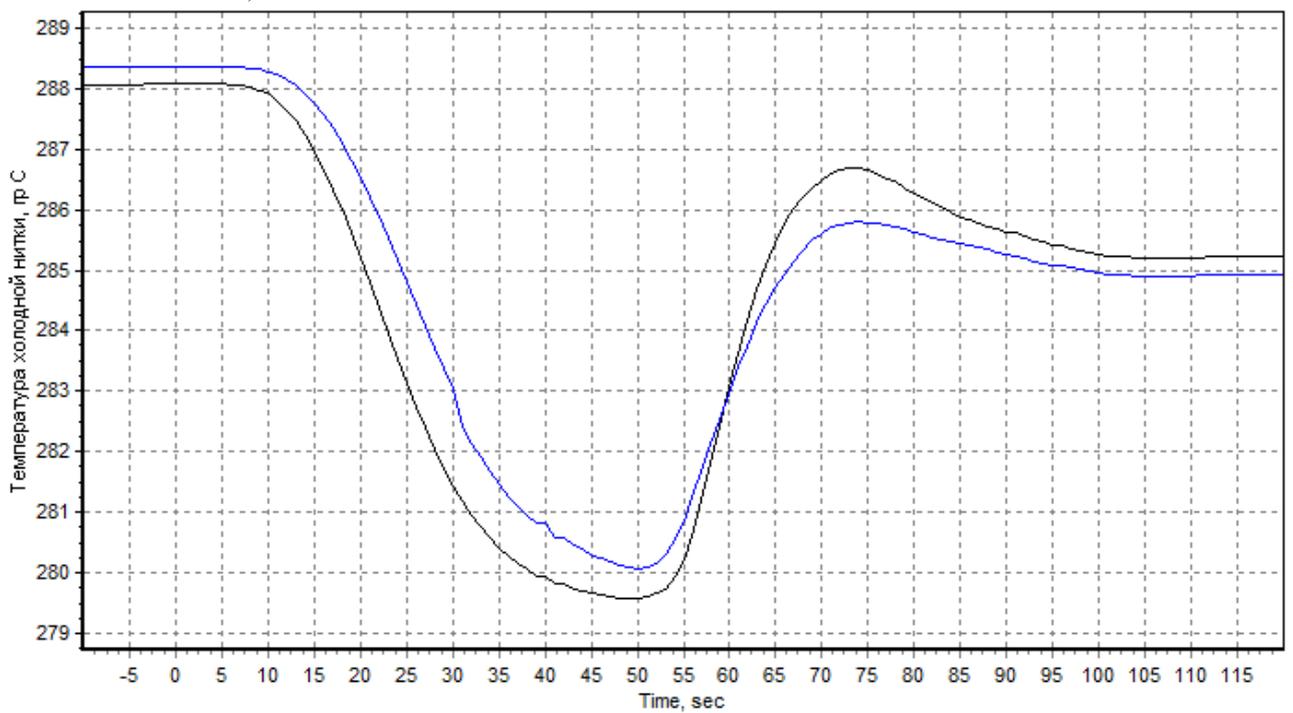


Рисунок 4в. Температура теплоносителя в холодных нитках петель №1, 2 при отключении ГЦН-1,2 из четырех работающих (РоАЭС-2. 10.09.2010 г.).

Как видно из представленных графиков практически при любом отключении длительность процессов областей 1, 2 и областей 3-5 приблизительно одинаковая, за исключением режима с отключением одного ГЦН из 4-х работающих. По-видимому, это связано с изменением теплогидравлических характеристик во входной камере смешения в зависимости от сочетаний работающих и отключенных петель. Так в работах авторов [7, 8] по определению коэффициентов влияния температуры в холодных нитках на температуру на входе в активную зону показано, что при работе на 4-х ГЦН есть смещение потока теплоносителя против часовой стрелки, а при работе на 3-х ГЦН в отключаемую петлю попадает почти весь поток из соседней смежной петли.

**Альтернативный алгоритм выбега ГЦН.** На основе анализа полученных данных по отключению ГЦН, авторы разработали собственный алгоритм расхода теплоносителя при выбегае ГЦН. Его особенности:

- а) универсальность (одна ветка для расчета любых комбинаций отключения);
- б) применимость минимального количества констант, которые корректируются один раз при ПНР, либо совсем не корректируются;
- в) неплохая сходимость по временным меткам с процессами, определяемыми температурой холодных ниток, а также с иными алгоритмами (ОКБ ГП, ВНИИАЭС, «ТРАП-97»);
- г) использование каналов контроля уже имеющихся в СВРК и относящихся только к своему ГЦН.

В основе алгоритма заложено 3 принципа:

- определение весовых коэффициентов между расчетными формулами прямого и обратного тока теплоносителя. Веса выбраны из условия приведения зависимости от перепада давления на ГЦН к первой степени, т.е. заложено, что изменение общего расхода происходит линейно.
- линейное изменение расхода нормируется на понижающий коэффициент, зависящий от квадратного корня из отношения перепадов давления на ГЦН. Это эмпирическое соотношение сделано для приведения изменения расхода в соответствие с его действительным поведением.
- после смены знака расхода (переворота теплоносителя) расчет производится по другой ветке, которая зависит только от момента возникновения значения обратного тока.

#### 1. Расчет процесса по ветке «прямой ток»

При появлении дискретного сигнала «ГЦН отключен», либо другого адекватного сигнала или фактора, указывающего на отключение ГЦН (например, потребляемая мощность ГЦН), или их комбинации, определяются:

- а) расход при прямом токе  $G_{\text{прям}}$  и при обратном токе  $G_{\text{обр}}$  по стандартным формулам, используемым в существующих алгоритмах расчетов и функционирования СВРК;
- б) вес расхода при прямом токе по формуле:

$$W_{\text{прям}} = \sqrt{\frac{\Delta P^i - \Delta P_{\text{уст}}}{\Delta P^0 - \Delta P_{\text{уст}}}} \quad (2)$$

- в) вес расхода при обратном токе по формуле:

$$W_{\text{обр}} = \left( \frac{\Delta P^0 - \Delta P^i}{\Delta P^0 - \Delta P_{\text{уст}}} \right)^2 \quad (3)$$

На рисунке 5 приведено характерное изменение значений весовых коэффициентов в процессе выбега ГЦН на примере данных.

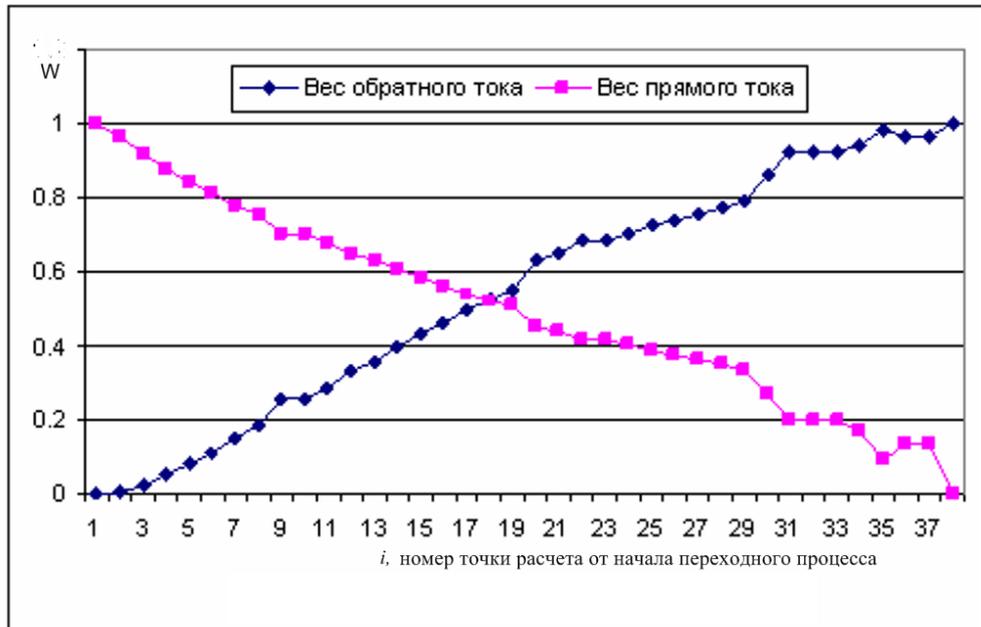


Рисунок 5. – Изменение весов расходов прямого и обратного тока на примере данных

В формулах (2, 3):  $\Delta P^i$  - значение перепада на ГЦН в  $i$ -той точке расчета переходного процесса;  $\Delta P^0$  - последнее значение перепада до отключения ГЦН;  $\Delta P^{уст}$  - значение уставки перепада на ГЦН, которая соответствует величине перепада при установившемся обратном токе.  $\Delta P^{уст}$  представляет собой набор констант для каждого режима, например, для блока №2 РоАЭС):

- при переходе к режиму работы РУ на 3-х ГЦН,  $\Delta P^{уст} = 1,8 \text{ кгс/см}^2$ ;
- при переходе к режиму работы РУ на 2-х ГЦН,  $\Delta P^{уст} = 0,8 \text{ кгс/см}^2$ .

г) нормированный расчет расхода в отключаемой петле проводится по формуле:

$$G_i = (G_{\text{прям}}^i \cdot W_{\text{прям}} + G_{\text{обр}}^i \cdot W_{\text{обр}}) \cdot \sqrt{\frac{\Delta P^i}{\Delta P^0}} \quad (4)$$

д) Расчет по ветке 1 производится до тех пор, пока  $G_i > 0$ .

## 2. Расчет процесса по ветке «обратный ток»

а) определяется время переворота потока  $\tau$ , полученное по ветке 1.

б) производится расчет расхода в отключаемой петле по формуле:

$$G_i = G_{\text{обр}}^i \cdot \frac{i-\tau}{\tau} \quad (5)$$

в) расчет по ветке 2 прекращается при  $i = 2\tau$  или  $|G_i| > |G_{\text{обр}}^i|$ .

По окончанию ветки №2 расход вычисляется по формуле обратного тока, заложенного в штатные алгоритмы СВРК.

Иллюстрация расчетов по описываемому алгоритму на примере данных, полученных при вводе в эксплуатацию энергоблока №2 Ростовской АЭС, приведена на рисунке 6.

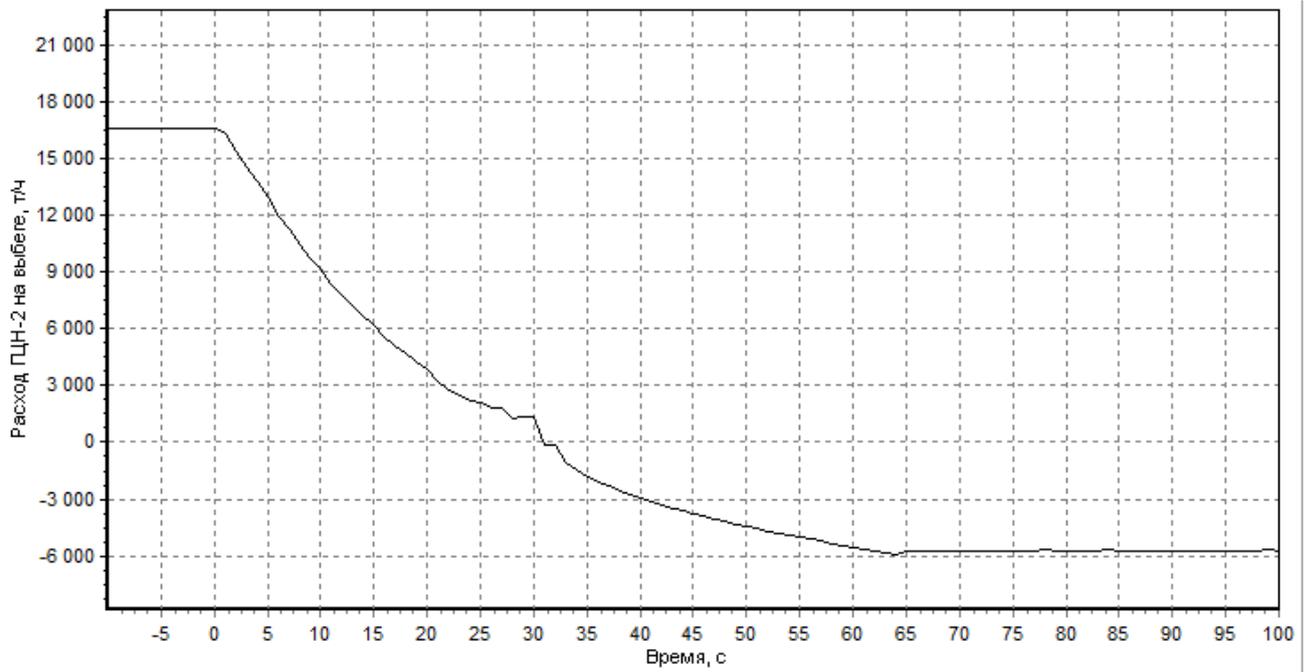


Рисунок 6. Изменение расхода теплоносителя в петле №2 при отключении ГЦН-2 из четырех работающих при расчете по алгоритму НВАТЭ. Ростовская АЭС. Энергоблок №2.

На рисунках 7а, 7б, 7в дано сравнительное поведение расходов при расчетах по всем используемым алгоритмам.

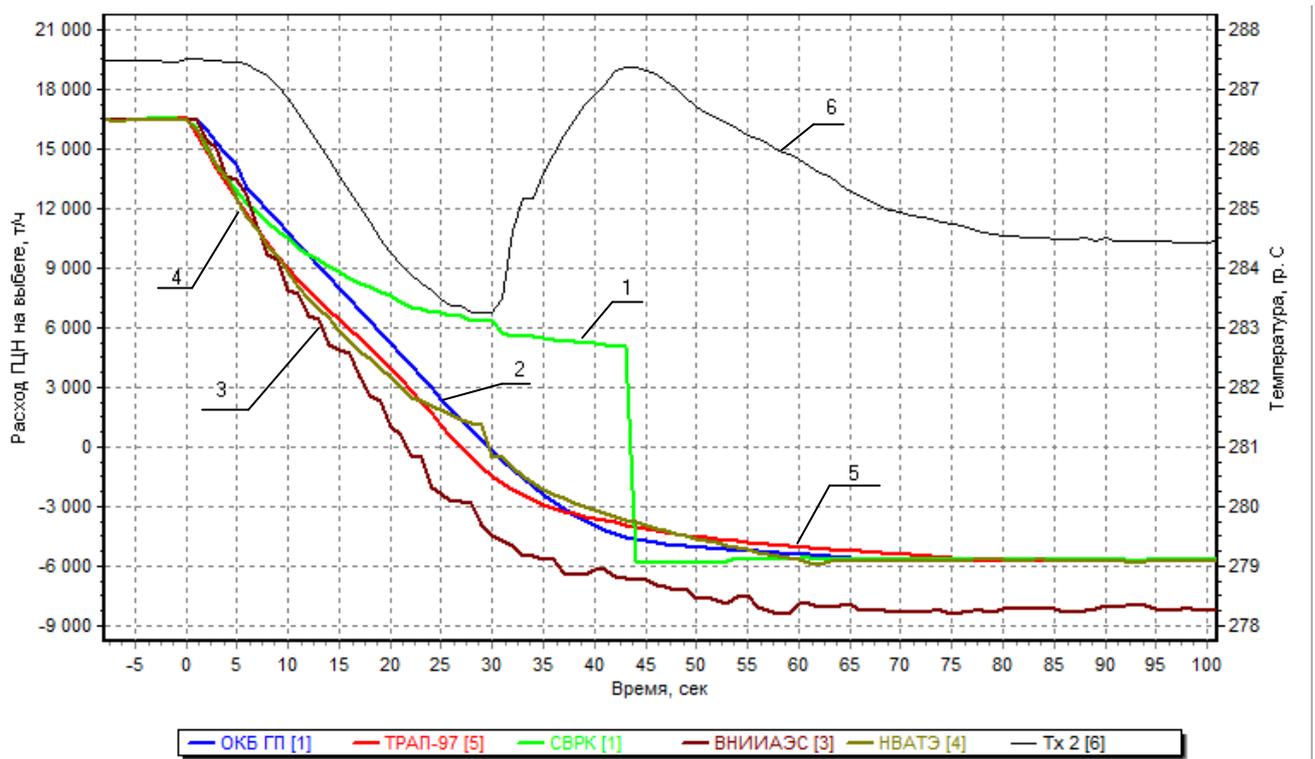


Рисунок 7а. Изменение расхода и температуры теплоносителя в холодной нитке петли №2 при отключении ГЦН-2 из четырех работающих. Ростовская АЭС. Энергоблок №2

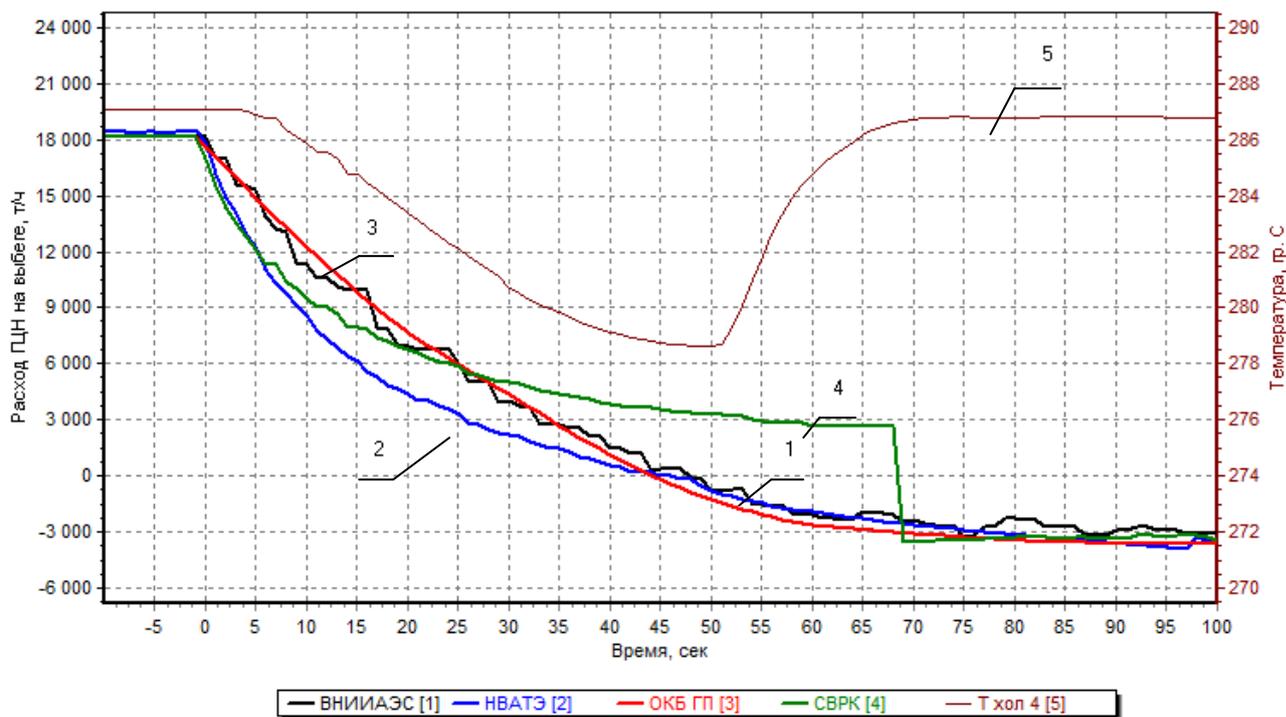


Рисунок 7б. Расход и температура теплоносителя в холодной нитке петли №4 при отключении ГЦН-4 из трех работающих (РоАЭС-2. 09.09.2010 г.).

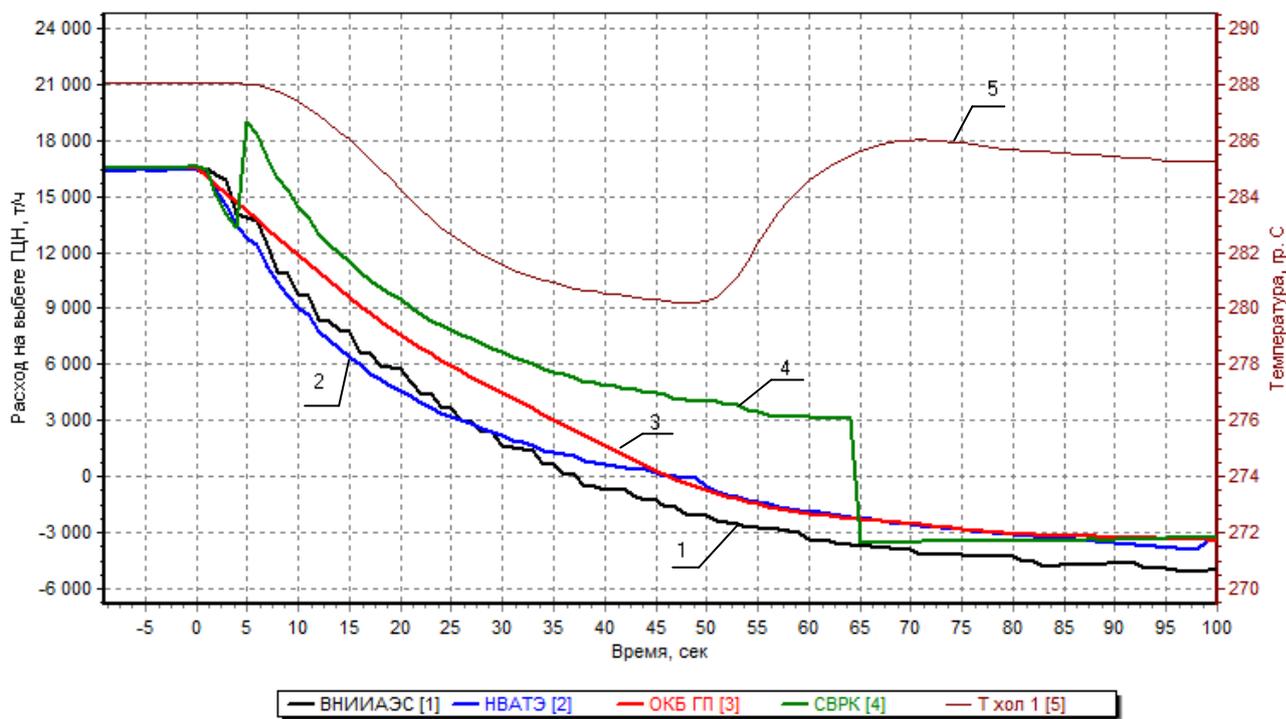


Рисунок 7в. Расход и температура теплоносителя в холодной нитке петли №1 при отключении ГЦН-1,2 из четырех работающих (РоАЭС-2. 10.09.2010 г.).

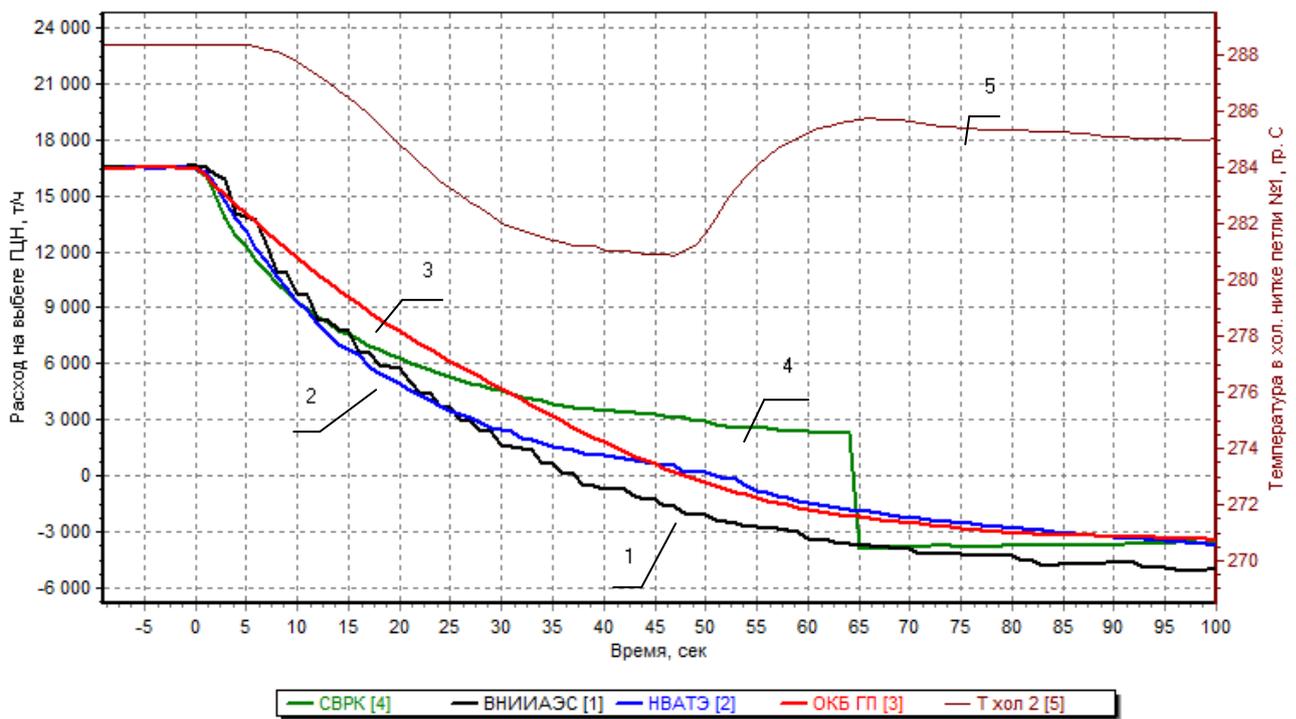


Рисунок 7г. Расход и температура теплоносителя в холодной петле №2 при отключении ГЦН-1,2 из четырех работающих (РоАЭС-2. 10.09.2010 г.). (аналогично 7а)

Из рисунков 7а-г видно, что по расчетам предлагаемого авторами алгоритма (НВАТЭ) расходы пересекают «нулевое» значение расхода в области 2, а прекращение действия алгоритма происходит в области 5. Расход по алгоритму НВАТЭ неплохо совпадает с расходом ОКБ ГП, в частности, расхождение точек «нулевого» расхода не более 5 секунд (что, учитывая значения расходов на уровне погрешности вполне допустимо), выход на 100 % обратный расход теплоносителя совпадает. Различие наблюдается на первоначальном этапе выбега ГЦН (снижения расхода до нуля), при этом, стоит отметить, что сходимость с расчетным выбегом по «ТРАП-97» (данные из работы [9]) лучше у алгоритма НВАТЭ.

Расходы по алгоритму ВНИИАЭС неплохо сходятся только для режима отключения 1-го ГЦН из 3-х работающих, а в остальных случаях опережают точку в области 2 на 10-15 секунд. Недостатком данного алгоритма также является то, что конечное значение обратного тока может не совпадать с расчетом по формуле обратного тока в СВРК.

**Заключение.** Предложенный авторами алгоритм устраняет скачкообразные изменения расхода, а также неопределенности по времени изменения направления движения теплоносителя в отключаемой петле и обладает, в отличие от алгоритма ОКБ ГП, минимальными требованиями к условиям протекания теплоносителя в 1-м контуре. В совокупности с применением коэффициентов влияния температуры в холодных нитках на температуру на входе в активную зону новый алгоритм существенно повысит представительность контроля за связанным с расходом ЗКТ, подогревами и другими параметрами в переходном режиме, на которые в технологическом регламенте безопасной эксплуатации приводятся ограничения. При накоплении опытных данных возможно уменьшение используемых инженерных коэффициентов запаса.

Принятый в СВРК алгоритм расчета расхода теплоносителя при отключении ГЦН (с контролем подогрева в петле) не требует дополнительных расчетов для мощности петли, т.к. в этом случае мощность всегда остается положительным числом. При переходе на предлагаемый авторами новый альтернативный алгоритм следует иметь в виду, что возможно кратковременное (20 секунд) появление отрицательных значений мощности в отключенной петле. Это можно учесть обнулением мощности петли с момента начала отрицательных

значений расхода в петле до появления устойчивого отрицательного подогрева в отключенной петле ( $\sim 0,1$  °С).

### Перечень использованной литературы

1. Ростовская АЭС. Блок № 2. РУ В-320. Система контроля, управления и диагностики реакторной установки. Система внутриреакторного контроля. Общее описание. 52837285.42510.432 ПД.

2. Ростовская АЭС. Блок № 2. РУ В-320. Система контроля, управления и диагностики реакторной установки. Система внутриреакторного контроля. Руководство сопровождающего физика. 52837285.42510.432 ИЗ.

3. Логвинов С.А., Ю.А. Безруков, Ю.Г. Драгунов. Экспериментальное обоснование теплогидравлической надежности реакторов ВВЭР. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004 г.

4. Терешонок В.А, Питилимов В.А., Степанов В.С., Воронков И.А. Методика измерения расходов теплоносителя в петлях ГЦК и через реактор в переходных режимах при отключении ГЦН. 6-ая МНТК "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР". 26-29 мая 2009 г. ОКБ "Гидропресс", Подольск.

5. Протоколы комплексных испытаний СВРК при вводе в эксплуатацию энергоблока №2 Ростовской АЭС. 02.РО.СВРК.ЦТАИ/К.О.п-7397, 413 (н), 647 (н).

6. ОПБ-88/97. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. НП-001-97 (ПНАЭ Г-01-011-97). - М.: Госатомнадзор России, 1997

7. Саунин Ю.В., Добротворский А.Н., Семенихин А.В. Исследование температуры теплоносителя на входе в активную зону на примере реактора Тяньваньской АЭС (Китай) // Атомная энергия. – 2007, т.103, вып. 2.

8. Саунин Ю.В., Добротворский А.Н., Семенихин А.В. Сравнительный анализ перемешивания потоков теплоносителя в корпусе реактора по результатам натурных испытаний при вводе в эксплуатацию энергоблоков Тяньваньской АЭС // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: Сб.тр. 6-й междунар. научн.-технич. конф., Подольск, 26 мая – 29 мая 2009 г. – Подольск, ОАО ОКБ "Гидропресс".

9. Васин В.М., Еремеев С.А., Коноплев Н.П., Подшибякин М.А. Результаты проверки усовершенствованного алгоритма расчета расхода теплоносителя в СВРК энергоблока №2 Ростовской АЭС. // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: Сб.тр. 7-й междунар. научн.-технич. конф., Подольск, 17 мая – 20 мая 2011 г. – Подольск, ОАО ОКБ "Гидропресс".