МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Обнинский институт атомной энергетики –
филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(ИАТЭ НИЯУ МИФИ)

Отделение Ядерной физики и технологий (О)

Выпускная квалификационная работа –
дипломный проект (дипломная работа)
по специальности: 14.05.02«Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг»
Специализация: «Проектирование и эксплуатация атомных станций»

«Расчет теплогидравлических характеристик ТВС ВВЭР-1200 при переменном расходе теплоносителя»

Выполнил: студент гр. АЭС2-С14	_____ (подпись, дата)	Турутоглу Мехмет
Руководитель ВКР: доцент отделения ЯФиТ, к.т.н.	_____ (подпись, дата)	Слободчук В.И.
Нормоконтроль	_____ (подпись, дата)	Чистозвонова Е.А.
Выпускная квалификационная работа допущена к защите	_____ (№ протокола, дата заседания комиссии)	
Руководитель образовательной программы 14.05.02«Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг», д.т.н., профессор	_____ (подпись, дата)	Лескин С.Т.

Обнинск, 2020г.

РЕФЕРАТ

На 59 с., 44 рисунков, 7 таблицы, 8 ист.

ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕКИЙ РАСЧЕТ, ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮШАЯ СБОРКА, ТЕПМПЕРАТУРА ТЕПЛОНОСИТЕЯЛЯ, ТЕМПЕРАТУРА ОБОЛОЧКИ ТВЭЛа, ТЕМПЕРАТУРА ТОПЛИВА, КАМПАНИЯ РЕАКТОРА, РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ.

Объект исследования – теплогидравлические характеристики активной зоны ВВЭР-1200 при изменении расхода теплоносителя через отдельные ТВС.

Целью работы является поверочный теплогидравлический расчет активной зоны реактора ВВЭР-1200 для определения основных характеристик при частичной блокировке проходного сечения тепловыделяющих сборок.

Результаты, полученные в работе, позволяют оценить влияние изменения расхода теплоносителя на основные критические характеристики ТВС реактора.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 3
ГЛАВА 1. ПРЯМОЙ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ 14
1.1 Определение характеристик 14
1.2 Первый этап расчета. 17
1.3 Второй этап расчета 29
1.4 Обратный теплогидравлический расчет 35
1.5 Расчет основных характеристик в конце кампании с начальной загрузкой топлива (кампания реактора 343 эффективных суток) 37
ГЛАВА 2. РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ПОНИЖЕННОМ РАСХОДЕ ЧЕРЕЗ ТВС 41
2.1 Расчет температуры при пониженных расходах через ТВС на начало кампании 41
2.1 Расчет температуры при пониженных расходах через ТВС на конец кампании 47
2.2 Сравнение максимальных температур по высоте ТВС 53
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 58
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 59
ПРИЛОЖЕНИЕ 60

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

Перечень принятых сокращений

АЭС – атомная электростанция;

ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор;

РУ – реакторная установка;

РБМК – реактор большой мощности канальный;

ОЭС – объединенная энергетическая система;

ВХР – водно-химический режим;

ТВС – тепловыделяющая сборка;

ТГР – тепло-гидравлический расчет;

ТВЭЛ – тепловыделяющий элемент;

ВВЕДЕНИЕ

27 июня 1954 года в г. Обнинске была пущена первая в мире атомная электростанция (АЭС). Она проработала 48 лет, эксплуатация ее прекращена 29 апреля 2002г. [1].

На 1 января 2019 года в России на 10 действующих АЭС эксплуатируется 35 энергоблоков общей мощностью 29 132,2 МВт, из них:

— 20 реакторов с водой под давлением — 13 ВВЭР-1000 (12 блоков 1000 МВт и 1 блок 1100 МВт), 2 ВВЭР-1200 (1200 МВт), 5 ВВЭР-440 (4 блока 440 МВт и 1 блок 417 МВт);

— 13 канальных кипящих реакторов — 10 РБМК-1000 (1000 МВт каждый) и 3 ЭГП-6 (12 МВт каждый);

— 2 реактора на быстрых нейтронах — БН-600 (600 МВт) и БН-800 (885 МВт)

На 1 января 2019 года суммарная установленная электрическая мощность атомных электростанций России составляет 11,98% от установленной мощности электростанций энергосистемы, а доля атомной энергетики в общей выработке объединенных энергетических систем (ОЭС) России в 2018 году составила 18,7 % [6].

Россия обладает полным спектром технологий атомной энергетики от добычи урановых руд до выработки электроэнергии. Осуществляет проектирование, строительство и вывод из эксплуатации атомных энергоблоков. Россия является мировым лидером по обогащению урана, владеет технологиями проектирования и производства ядерного топлива, ведет переработку и утилизацию отработанного ядерного топлива. Занимает второе место среди стран Европы по мощности атомной генерации.

В российской атомной отрасли работает свыше 250 000 человек, на более 400 предприятиях (включая АЭС, машиностроительные, производственные и научные предприятия).

Развитие крупномасштабной атомной энергетики позволит в полной мере использовать ее принципиальные особенности по сравнению с другими энерготехнологиями, а именно:

- при использовании всего урана ядерное топливо обеспечивает энергетику ресурсами на сотни лет:

- отходы атомной энергетики имеют относительно малые объемы и могут быть надежно локализованы, а наиболее опасные из них можно будет «сжигать» в ядерных реакторах.

При любом варианте развития в крупномасштабной ядерной энергетике могут найти свое место разные типы реакторов на тепловых нейтронах при доминирующей роли быстрых реакторов.

Одним из направлений развития атомной энергетики в России стало строительство двухконтурных АЭС с реакторами водо-водяного типа (ВВЭР).

Водо - водяные реакторы имеют ряд преимуществ и ряд недостатков.

Преимуществом является то, что в качестве замедлителя и теплоносителя используется обыкновенная вода. Это легкодоступный и дешевый материал, у воды хорошая замедляющая способность. Из этого следует небольшие размеры активной зоны, из-за снижения плотности воды-теплоносителя с ростом температуры имеем отрицательный температурный коэффициент реактивности, вода пожаробезопасна, безвредна для окружающей среды.

К недостаткам этого типа реакторов можно отнести:

— большое сечение поглощения тепловых нейтронов;

— сложности монтажа оборудования;

— ограничение единичной мощности реактора из-за производственных и транспортных трудностей;

— сложности обеспечения безопасности при разрывах трубопроводов первого контура;

— коррозионная активность воды, необходимо строго поддерживать ВХР.

Увеличение единичной мощности возможно за счет выравнивания тепловыделения в активной зоне. Для этого необходим точный тепло-гидравлический расчет.

Задачи ТГР:

— определение тепловой мощности отдельных ТВС в АЗ,

— определение расхода теплоносителя через канал АЗ,

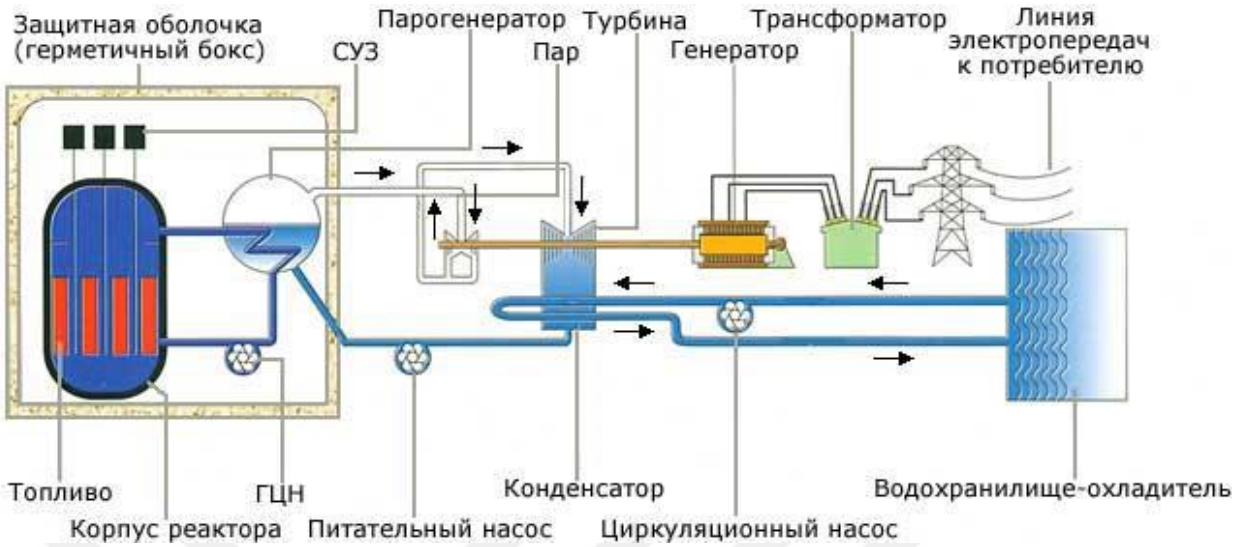
— определение необходимой степени дросселирования потока теплоносителя на входе в отдельные каналы для обеспечения необходимого расхода через них,

определение теплотехнических параметров теплоносителя,

определение полей температуры в ТВЭЛах и конструкционных материалах АЗ.

Различают поисковый и поверочный расчеты. Поисковый расчет заключается в выборе оптимального количества ТВС для данной мощности реактора, которая удовлетворяет предельно допустимым параметрам. В поверочный расчет входит определение основных теплотехнических параметров при известной конструкции и мощности реактора и сравнение их с допустимыми параметрами.

Технологическая схема энергоблоков с реактором ВВЭР-1200 представлена на рисунке 1.



Источник: [7].

Рисунок 1 – Технологическая схема блока с реактором ВВЭР-1200

Технологическая схема энергоблока с реактором ВВЭР-1200 имеет два контура.

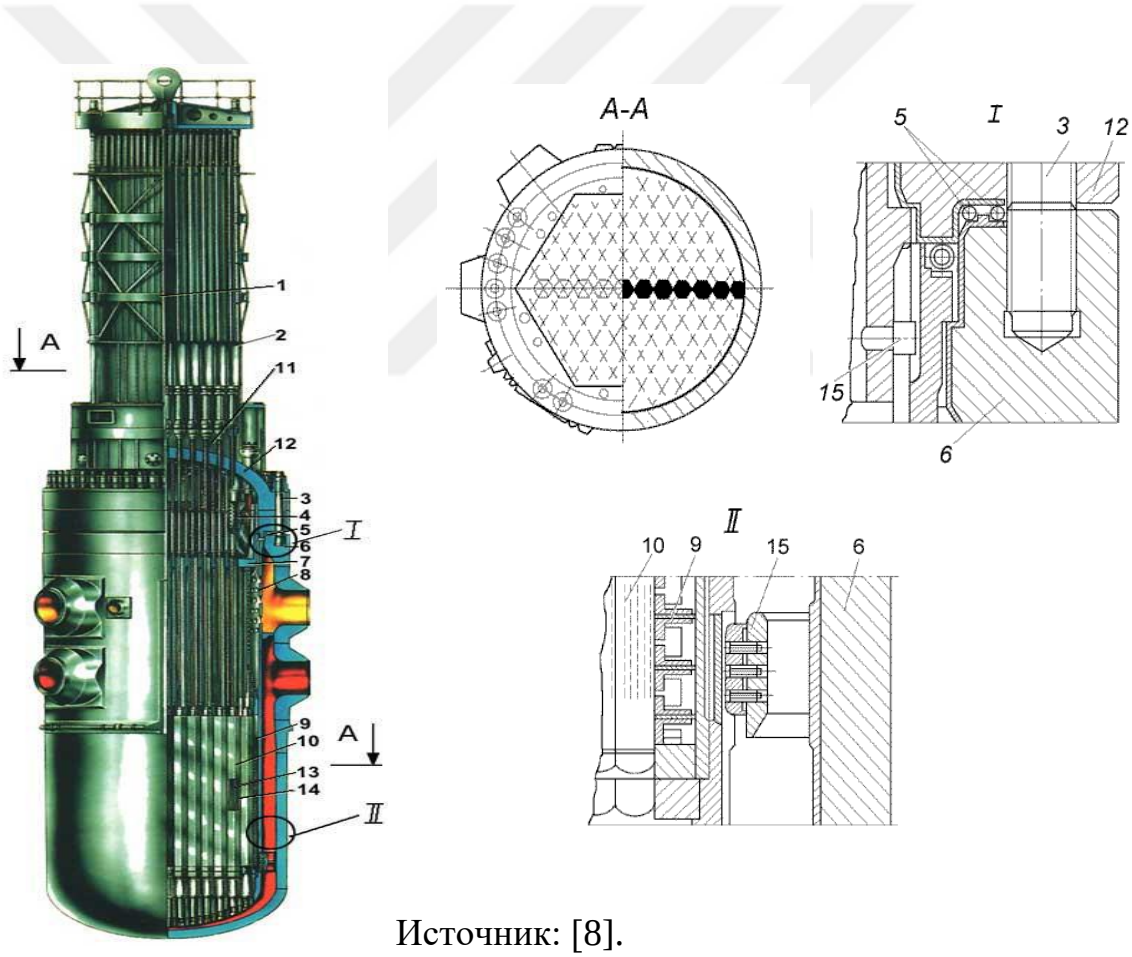
Первый контур - радиоактивный. Он включает в себя реактор типа ВВЭР и циркуляционные петли охлаждения. Каждая петля содержит главный циркуляционный трубопровод, главный циркуляционный насос (ГЦН), парогенератор. К двум из циркуляционных петель первого контура подсоединен компенсатор давления, с помощью которого в контуре поддерживается заданное давление воды, являющейся в реакторе одновременно и теплоносителем и замедлителем нейтронов. На энергоблоке с ректором ВВЭР-1200 4 циркуляционные петли.

Второй контур - нерадиоактивный. Он включает в себя парогенераторы, паропроводы, паровые турбины, питательные насосы и трубопроводы, деаэраторы и регенеративные подогреватели. Парогенератор является общим оборудованием для первого и второго контуров. В нем тепловая энергия, выработанная в реакторе, от первого контура через теплообменные трубки передается второму контуру. Насыщенный пар, вырабатываемый в

парогенераторе, по паропроводу поступает на турбину, которая приводит во вращение генератор, вырабатывающий электрический ток.

В системе охлаждения конденсаторов турбин на АЭС используются башенные градирни и водохранилище-охладитель.

Корпус реактора представляет собой вертикальный цилиндрический сосуд высокого давления с крышкой, имеющей разъем с уплотнением и патрубки для входа и выхода теплоносителя, представлен на рис. 2. Внутри корпуса закрепляется шахта, являющаяся опорой для активной зоны и части внутрикорпусных устройств и служащая для организации внутренних потоков теплоносителя



Источник: [8].

Рисунок 2 – Реактор ВВЭР-1200

1-верхний блок; 2-привод СУЗ (системы управления и защиты); 3-шпилька; 4-труба для загрузки образцов-свидетелей; 5-уплотнение; 6-корпус реактора; 7-блок защитных труб; 8-шахта; 9-выгородка активной зоны; 10-топливные сборки; 11-теплоизоляция реактора; 12-крышка реактора; 13-регулирующие стержни; 14-топливные стержни; 15-фиксирующие шпонки

Активная зона реакторов собрана из шестигранных тепловыделяющих сборок (ТВС), содержащих тепловыделяющие элементы (ТВЭЛ) стержневого типа с сердечником из диоксида урана в виде таблеток, находящихся в оболочке из циркониевого сплава. В тепловыделяющих сборках ТВЭЛы размещены по треугольной решетке. В свою очередь, ТВС также собраны в треугольную решетку. Нижние цилиндрические части ТВС входят в отверстия опорной плиты, верхние в дистанционирующую прижимную плиту. Сверху на активную зону устанавливается блок зашитых труб, дистанционирующий кассеты в плане и предотвращающий всплытие и вибрацию. На фланец корпуса устанавливается верхний блок с приводами СУЗ, обеспечивающий уплотнение главного разъема. Регулирование реактора осуществляется перемещаемыми регулирующими органами и жидким поглотителем.

Теплоноситель поступает в реактор через входные патрубки корпуса, проходит вниз по кольцевому зазору между шахтой и корпусом, затем через отверстия в опорной конструкции шахты поднимается вверх по тепловыделяющим сборкам. Нагретый теплоноситель выходит из головок ТВС в межтрубное пространство блока защитных труб и через перфорированную обечайку блока и шахты отводится выходными патрубками из реактора.

В качестве ядерного топлива используется спеченный диоксид урана с начальным обогащением ураном-235 в стационарном режиме в диапазоне от 2.4 до 4.4 % (масс).

Реактор ВВЭР обладает важным свойством саморегулирования: при повышении температуры теплоносителя или мощности реактора происходит самопроизвольное снижение интенсивности цепной реакции в активной зоне, и в конечной итоге снижение мощности реактора. [3; 4]

Цель работы: Провести поверочный теплогидравлический расчет активной зоны реактора ВВЭР-1200 для определения основных характеристик при изменении расхода теплоносителя через ТВС.

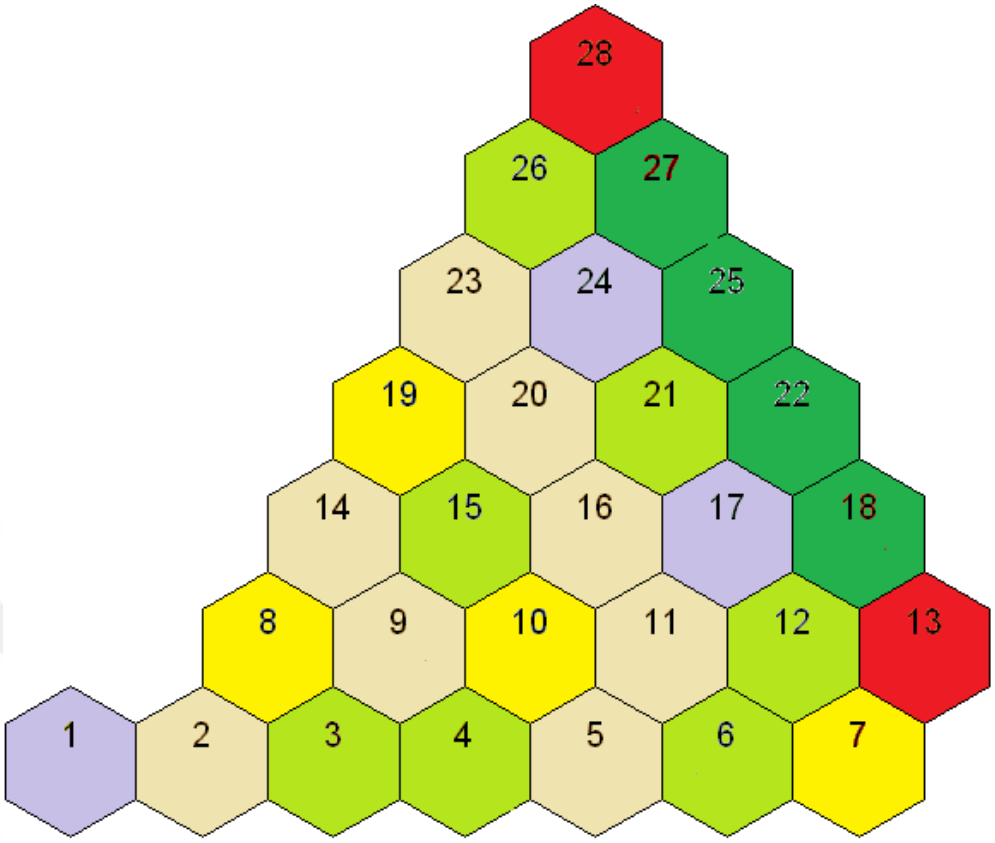
Основные задачи работы: Изучить более детально конструкцию ТВС и активной зоны ВВЭР-1200; получить распределение энерговыделения по кассетам активной зоны на начало и конец кампании; рассчитать распределение температуры теплоносителя, оболочки твэла и топлива как при нормальном режиме эксплуатации, так и при изменении расхода теплоносителя через ТВС; сравнить полученные данные с предельными значениями; сделать выводы.

Удельная мощность и энерговыделение при равномерном распределении всех компонентов по активной зоне и постоянном спектре нейтронов пропорциональны плотности потока нейтронов. По высоте цилиндрической гомогенной активной зоны это распределение имеет форму косинуса.

В реальном реакторе распределение энерговыделения по высоте заметно отличается от косинусоидального вследствие ряда факторов. Поэтому необходимо в качестве исходных данных для расчета брать распределение энерговыделения по высоте более близкие к реальным. В данной работе используется распределение энерговыделения по высоте активной зоны, полученное в виртуальной учебной лаборатории «Реакторная физика, конструкция, управление и безопасная эксплуатация ЯЭУ», созданной на кафедре Автоматики НИЯУ МИФИ [2]. Использовалось имеющееся в лаборатории готовое состояние, моделирующее активную зону реактора ВВЭР-1200, была создана загрузка топлива, соответствующая начальной проектной загрузке реактора. Распределение энерговыделения получено для начала кампании и для конца кампании начальной загрузки.

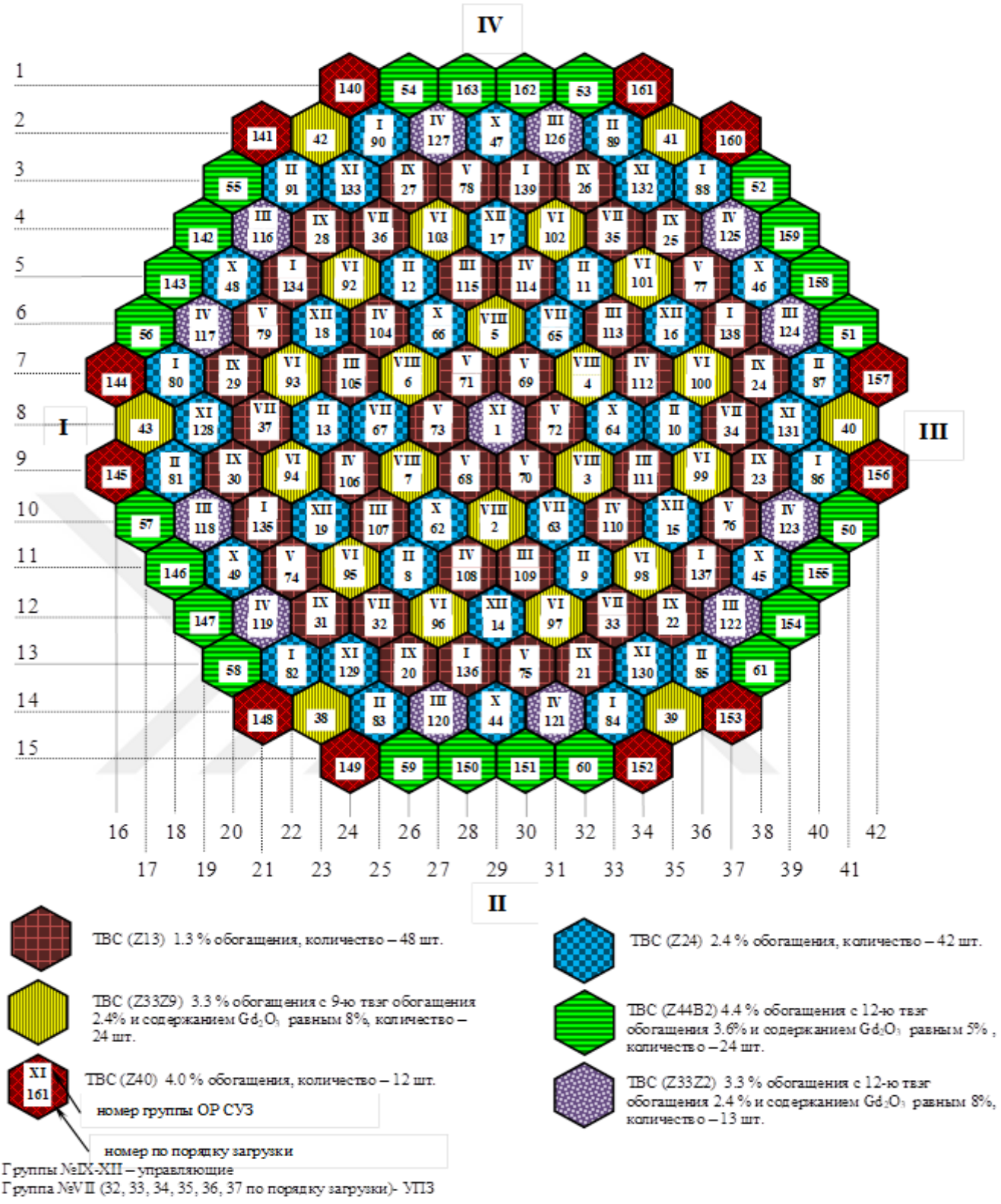
Картограмма начальной загрузки а.з. ВВЭР-1200 представлена на рис. 4. Для теплогидравлического расчета взят сектор симметрии, представленный на рис.3. Номера ТВС, для которых в дальнейшем будут представлены

результаты расчета, показаны на рис.3. Исходные данные, используемые в процессе расчета, представлены в таблице 1.



Источник: [2].

Рисунок 3– Сектор симметрии с порядковыми номерами ТВС



Источник: [2].

Рисунок 4 – Картограмма активной зоны реактора ВВЭР-1200 с начальной загрузкой топлива

Таблица 1. Исходные данные для расчета.

Тепловая мощность	$Q_т$=3200 МВт
Теплоноситель и замедлитель	вода (не кипит)
Конструкционные материалы ТВЭЛов	UO_2
Давление теплоносителя на входе в АЗ	$P_{вх}$=16,2· 10^6 Па
Температура теплоносителя на входе в АЗ	$t_{вх}$=298,2℃
Расход теплоносителя в номинальном режиме	$G_{аз}$=17596.8 кг/с
Полное количество стержней в ТВС	$n_{твс}$=331 шт
Количество ТВЭЛов	n =312 шт
Размер ТВЭЛа:	
внешний диаметр оболочки ТВЭЛа	d_2=9,1·10^{-3} м
внутренний диаметр оболочки ТВЭЛа	d_1=7,73·10^{-3} м
внешний диаметр топливной таблетки	d_c=7,60·10^{-3} м
внутренний диаметр топливной таблетки	d_0=1,20·10^{-3} м
Количество трубок для стержней регулирования	n_p=18 шт
Диаметр трубок под стержни регулирования	d_p=12,6·10^{-3}
Количество центральных трубок	$n_{ц}$=1 шт
Диаметр центральной трубки	$d_{ц}$=10,2·10^{-3} м
Высота активной зоны	H_0=3,73 м
Размер ТВС под ключ	$h_к$=235·10^{-3} м
Расстояние между центрами ТВС	$h_{яч}$=230·10^{-3} м
Количество дистанционирующих решеток	n=13 шт
Шаг размещения ТВЭЛов в сборке	s=12,75·10^{-3} м
Доля энерговыделения в ТВЭЛе	χ =0,92
Теплопроводность оболочки ТВЭЛа	λ_w =20,6 Вт/м·К
Проводимость контактного слоя (газового зазора)	$\alpha_з$=4,9·10^3 Вт/м^2·К
Диаметр кластерного стержня	$d_{кл}$=8,2·10^{-3} м

Источник: [2].

Рассчитанные распределения линейного энерговыделения, используемые в расчете, приведены в Приложении 1.

— Этапы теплогидравлического расчета

При имеющейся постановке задачи ТГР делится на два этапа. На первом этапе проводится прямой расчет а.з. для номинального режима (100% расход теплоносителя через все кассеты). Результатами являются значения расходов через все ТВС, перепад давления на а.з., также проверяются температуры топлива и оболочки. На втором этапе для ТВС задается пониженный расход в процентах от номинального, ТГР ведется в обратном направлении - от выхода из а.з. ко входу. Давление на выходе принимается равным значению, полученному в прямом расчете. Это допустимо в предположении частичной блокировки проходного сечения в одной отдельно взятой ТВС, так как расходы через остальные оставшиеся ТВС изменятся очень слабо. Случай одновременного снижения расходов множества ТВС также может быть рассчитан (с учетом изменения перепада давления на а.з. и суммарного расхода), но в данной работе не рассматривается. [3]

Расчет ведется с разбиением активной зоны на 12 участков в соответствии с количеством дистанционирующих решеток. Более подробное разбиение бессмысленно, так как исходные данные представлены в разбиении всего лишь на десять участков. А для оценки величин между расчетными узлами можно использовать нелинейную интерполяцию результатов

ГЛАВА 1. ПРЯМОЙ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ

1.1 Определение характеристик

Подробно рассмотрим этапы прямого расчета. Его оказалось удобно разделить на три подэтапа:

1) нахождение расходов по ТВС и определение параметров теплоносителя на выходе из участков.

2) нахождение перепадов температуры оболочка-жидкость, на оболочках твэл и контактных термических сопротивлениях (или зазорах) между топливом и оболочками твэл. На этом этапе все величины вычисляются последовательно, без каких-либо итераций.

3) нахождение перепадов температуры в топливе.

1.1.1 Определение геометрических характеристик

Площадь одной ячейки:

$$f_{\text{яч}} = \frac{6}{\sqrt{3}} \cdot (\frac{h_k}{2})^2 = 0{,}048 m^2. \quad (1)$$

Площадь поперечного сечения ТВЭЛа

$$f_{\text{ТВЭЛ}} = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} = 6{,}5038 \cdot 10^{-5} m^2. \quad (2)$$

Площадь поперечного сечения стержня регулирования:

$$f_{\text{р}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{р}}^2}{4} = 1{,}2469 \cdot 10^{-4} m^2. \quad (3)$$

Площадь поперечного сечения канала без кластера

$$f_{\text{бкк}} = \frac{\pi \cdot (d_{\text{р}}^2 - (d_p - 2\delta_k)^2)}{4} = 3{,}138 \cdot 10^{-5} m^2. \quad (4)$$

Площадь поперечного сечения канала с кластером

$$f_{\text{кк}} = \frac{\pi \cdot (d_{\text{р}}^2 - (d_p - 2\delta_k)^2 + d_{\text{кл}}^2)}{4} = 8{,}419 \cdot 10^{-5} m^2. \quad (5)$$

Площадь поперечного сечения центральной трубки

$$f_{\text{цт}} = \frac{\pi \cdot (d_{\text{ц}}^2 - (d_{\text{ц}} - 2\delta_{\text{ЦТ}})^2)}{4} = 1{,}950 \cdot 10^{-5} m^2. \quad (6)$$

Площадь поперечного сечения участка ТВС с поднятыми стержням СУЗ

$$F1 = f_{\text{яч}} - n \cdot f_{\text{твел}} - f_{\text{ЦТ}} - n_p \cdot f_{\text{бкк}} = 0{,}027 m^2. \quad (7)$$

Площадь поперечного сечения участка ТВС с опущенными стержням СУЗ

$$F2 = f_{\text{яч}} - n \cdot f_{\text{твел}} - f_{\text{ЦТ}} - n_p \cdot f_{\text{кк}} = 0{,}026 m^2. \quad (8)$$

Первая и шестая *ТВС* с опущенными стержням СУЗ

$$F_{i,j} = F1 \qquad F_{8,6}, F_{9,6}, F_{10,6}, F_{11,6}, F_{12,6}, F_{9,1}, F_{10,1}, F_{11,1}, F_{12,1} = F2$$

Смоченный периметр на участках ТВС без стержней СУЗ

$$\text{П} = \pi \cdot (n \cdot d_2 + n_p \cdot d_p + d_{\text{ц}}). \quad (9)$$

Смоченный периметр на участках ТВС с опущенными стержням СУЗ

$$\Pi_{\text{суз}} = \pi \cdot \left(n \cdot d_2 + n_p \cdot \left(d_p - d_{\text{кл}}\right) + d_{\text{ц}}\right). \quad (10)$$

Средний гидравлический диаметр на участках без стержней СУЗ

$$D\text{г}_{i,j} = 4 \cdot \frac{F_{i,j}}{П}. \quad (11)$$

Гидравлический диаметр при опущенных стержнях СУЗ

$$D2 = 4 \cdot \frac{F_{\text{кл}}}{П\text{суз}} = D\text{г}_{9,1}, D\text{г}_{10,1}, D\text{г}_{11,1}, D\text{г}_{12,1}, D\text{г}_{9,6}, D\text{г}_{10,6}, D\text{г}_{11,6}, D\text{г}_{12,6} \quad (12)$$

1.1.2 Определение гидравлических параметров

Активную зону разбиваем на 12 равных участков по высоте, высота одного участка равна:

$$\Delta z = \frac{H_0}{n_{\text{др}} - 1} = \frac{3{,}73}{13-1} = 0{,}311 \text{ (м)}. \quad (13)$$

Расход теплоносителя через одну ТВС:

$$G_j = \frac{G_{\text{аз}}}{N} = \frac{17596{,}8}{163} = 107{,}9 \text{ (кг/с)}. \quad (14)$$

Энтальпия на выходах участков ТВС находится следующим образом:

$$h_{i,j} = h_{i-1,j} + \frac{q_{i,j}}{G_j}. \quad (15)$$

Нахождение параметров на входе в а.з. Здесь и далее для нахождения теплофизических свойств воды используются функции термодинамического калькулятора WaterSteamPro.

$$h_{\text{вх}} = wspHPT(P_{\text{вх}}, t_{\text{вх}}),$$
$$P_{0,j} = P_{\text{вх}},$$
$$t_{0,j} = t_{\text{вх}},$$
$$v_{0,j} = wspVPT(P_{\text{вх}}, t_{\text{вх}}),$$
$$\upsilon_{0,j} = wspKINVISPT(P_{\text{вх}}, t_{\text{вх}}).$$

1.2 Первый этап расчета.

В нулевом приближении расходы теплоносителя через ТВС принимаются одинаковыми (что близко к действительности). Требуется найти потери давления для каждого из 12 участков и параметры т/н на выходе из участков для всех ТВС. Параметры т/н на входе в а.з. известны, для остальных точек расчет проводится последовательно, от данной точки к следующей. Результаты расчетов на выходе из данного участка являются входными данными для расчета следующего по высоте участка а.з. Для большей точности свойства воды на участке берутся средними по входу и выходу. Проверка показала, что нет разницы, брать ли свойства воды средними или усреднять результаты, полученные по свойствам воды на входе и выходе из участка. Первый подход оказался практичнее. Рассмотрим используемые для расчета уравнения. Для обозначения номера участка ТВС по высоте будем использовать индекс «i», изменяющийся от 1 до 12, а для обозначения номера ТВС индекс «j», изменяющийся от 1 до 28 (так как в исходных данных имеет место 6-секторная симметрия). Потери давления складываются из потерь на дистанционирующей решетке, потерь на трение в пучке твэл, потерь на преодоление высоты участка, потерь на ускорение потока. Тогда давление на выходе i-го участка составит:

$$P_{i,j} = P_{i-1,j} - \Delta P\text{др}_{i,j} - \Delta P\text{тр}_{i,j} - \Delta Pdz_{i,j} - \Delta P\text{уск}_{i,j}\ . \quad (16)$$

— Потери давления на дистанционирующей решетке имеют вид

$$\Delta P\text{др}_{i,j} = \frac{\xi_{\text{др}} \cdot G_j^2 \cdot v_{i,j}}{2F_{i,j}^2}, \quad (17)$$

$\xi_{\text{др}} = 0{,}94 -$ коэф. сопротивления одной дистанционирующей решетки

— Потери на трение рассчитываются следующим образом:

$$\Delta P\text{тр}_{i,j} = \xi_{\text{тр}_{i,j}} \cdot \frac{\Delta z}{D\text{г}_{i,j}} \cdot \frac{G_j^2 \cdot (v_{i,j} + v_{i-1,j})}{4F_{i,j}^2}, \quad (18)$$

где $\Delta z -$ высота участка

$D\text{г}_{i,j} -$ гидравлический диаметр ячейки твэл

$\xi_{\text{тр}} -$ коэф. потерь на трение

$$\xi_{\text{тр}} = [1 + (x-1)^{0,32}] \cdot \frac{0{,}210}{Re_{i,j}^{0,25}} = \frac{C}{Re_{i,j}^{0,25}},$$

$$C = 0{,}21 \cdot [1 + (x-1)^{0,32}], \quad (19)$$

x = s/d- относительныйЙ шаг решетки твэл. С - константа, вычисляемая один раз до решения системы уравнений,

$Re_{i,j}$- среднее число Рейнольдса на участке определяемое, как

$$Re_{i,j} = \frac{2w_{i,j} D\text{г}_{i,j}}{v_{i,j} + v_{i-1,j}}, \quad (20)$$

$$w_{i,j} = \frac{G_j \cdot (v_{i,j} + v_{i-1,j})}{2F_{i,j}}. \quad (21)$$

$v_{i,j} -$ кинематическая вязкость воды

$w_{i,j} -$ средняя скорость

— Потери давления на преодоление высоты участка равны:

$$\Delta Pdz_{i,j} = \frac{19{,}62 \cdot \Delta z}{(v_{i,j}+v_{i-1,j})}. \quad (22)$$

— Потери на ускорение потока равны:

$$\Delta P\text{уск}_{i,j} = (\frac{G_j}{F_{i,j}})^2 \left(v_{i,j} + v_{i-1,j}\right). \quad (23)$$

Наконец, для нахождения значений удельного объема и кинематической вязкости используются функции WaterSteamPro

$$v_{i,j} = wspVPH\left(P_{i,j}, h_{i,j}\right), \quad (24)$$

$$v_{i,j} = wspKINVISPH\left(P_{i,j}, h_{i,j}\right). \quad (25)$$

Записав уравнения (16-25), получим замкнутую систему. Эту систему уравнений можно упростить, оставив только минимальное число неизвестных (три):

$$P_{i,j} = P_{i-1,j} - \left(\frac{G_j}{F_{i,j}}\right)^2 \left(v_{i,j} + v_{i-1,j} + \frac{\varepsilon_{\text{др}} \cdot v_{i,j}}{2} + \frac{C \cdot \Delta z \cdot (v_{i,j}+v_{i-1,j})}{2D\text{r}_{i,j}} \times \frac{F_{i,j}}{G_j D\text{r}_{i,j}} \cdot \frac{v_{i,j}+v_{i-1,j}}{v_{i,j}+v_{i-1,j}}\right) - \frac{19{,}62 \cdot \Delta z}{(v_{i,j}+v_{i-1,j})}. \quad (26)$$

К этому уравнению нужно еще добавить (24) и (25). Чтобы иметь возможность контролировать такие параметры как скорость теплоносителя, числа Рейнольдса и отдельные составляющие потерь давления на каждом участке, было принято решение использовать развернутую систему уравнений. Эта система решается последовательно для всех ТВС и для каждого участка каждой ТВС, причем результаты расчетов на данном участке являются входными данными для расчета следующего участка. Получаемые перепады давлений на ТВС будут различными, это является следствием

задания одинаковых расходов через все ТВС в нулевом приближении. Но все ТВС объединены общими коллекторами, значит, перепад давлений на них должен быть одинаков, а расходы - отличаться. Поэтому нужно пересчитать расходы через все ТВС. Наиболее практичным представляется следующий итерационный способ расчета. Новым приближением перепада давления на а.з. является среднее значение перепадов, полученных для каждой ТВС при решении системы:

$$\Delta P\text{а.з} = \frac{1}{N\text{твс}} \sum_1^{N\text{твс}} \Delta P_i. \quad (27)$$

Пересчитываются расходы через все ТВС следующим образом:

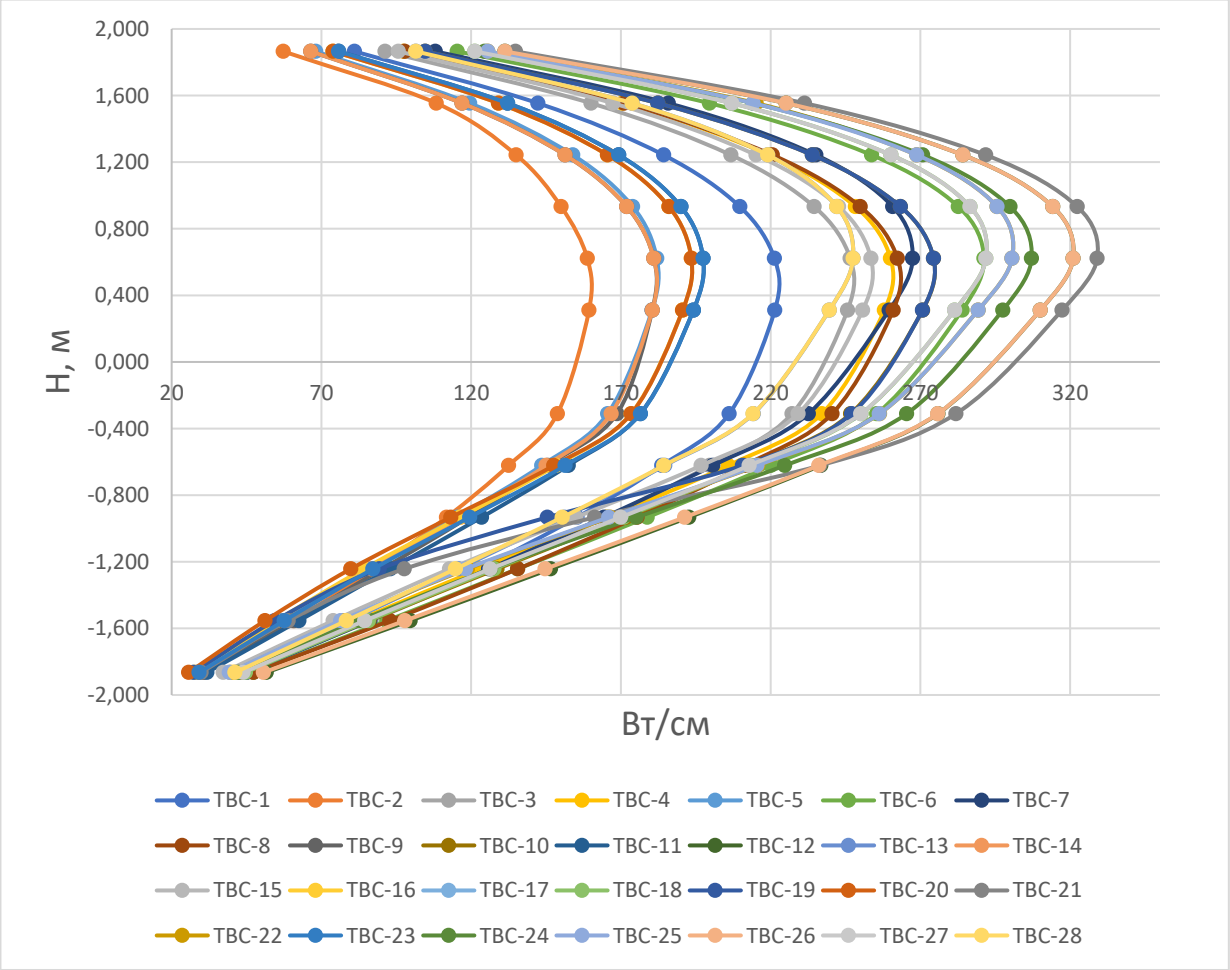
$$G_{i,\text{нов}} = G_{i,\text{стар}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{а.з}}}{\Delta P_i}}. \quad (28)$$

Далее по (15) пересчитываются энтальпии на выходе из участков (так как расходы через ТВС изменились, а мощности предполагаются постоянными, должны измениться подогревы), и используются вместе с уточненными расходами для повторного решения системы уравнений (16-25). Уравнения (27), (28) не являются точными, они приближенные, но сходимость всего итерационного процесса к точному решению обеспечивается присутствием точной (до точности используемых уравнений) системы (16-25). Теоретически, такой процесс не должен точно сохранять суммарный расход через а.з., поэтому может потребоваться еще и перенормировка расходов, на каждой итерации, но на практике погрешность расхода составляет около 0,1%. В большинстве случаев достаточно двух пересчетов расхода по формулам (27), (28) и (16-25) для полной сходимости, что выражается в равенстве получаемых перепадов давлений по всем ТВС. В принципе, можно записать в MathCAD систему из уравнений (24-26) в несколько строк - сразу для всех слоев и ТВС, используя индексы. При этом не требуется проводить итерационное вычисление расходов, они находятся сразу одним вектором. Но

такой подход можно рекомендовать только при малом числе ТВС и участков разбиения, расчет при этом выполняется медленнее, чем по организованной схеме. Также уже для десяти ТВС число неизвестных составляет несколько сотен, и MathCAD не решает системы нелинейных уравнений с таким числом неизвестных. [2]

1.2.1 Линейное энерговыделение

С использованием функционально-аналитического тренажера были получены следующие значения линейного энерговыделения для начала кампании и начальной загрузки а.з. (Вт/см), рис. 5, таблица 2.



Источник: собственная разработка

Рисунок 5. Распределение энерговыделения по высоте ТВС на начало кампании

Таблица 2. Значения энерговыделения по высоте ТВС на начало кампании (номера ТВС соответствуют рис. 3)

ТВС-1	ТВС-2	ТВС-3	ТВС-4	ТВС-5	ТВС-6	ТВС-7	ТВС-8	ТВС-9	ТВС-10
43.494	30.126	44.027	40.792	28.599	47.290	45.140	47.326	30.717	43.365
85.144	60.576	86.590	81.675	56.724	91.834	86.159	92.865	60.905	85.917
122.467	87.696	126.954	122.954	85.437	135.514	125.848	135.564	90.345	128.646
155.360	111.792	165.174	165.392	115.159	178.798	164.382	175.444	119.068	171.722
183.666	132.504	199.652	205.806	143.562	220.034	200.722	211.266	145.544	212.834
206.170	148.800	227.140	237.070	165.570	255.450	232.610	240.530	168.680	246.690
221.400	159.360	245.690	257.990	180.380	283.940	259.570	260.920	180.480	270.740
221.272	158.784	246.570	260.030	181.980	291.220	267.402	262.336	180.984	274.388
209.714	150.036	234.538	248.318	173.944	282.666	260.750	249.928	171.966	263.348
184.274	135.044	206.714	219.622	153.952	253.714	235.134	220.596	151.370	233.956
142.317	108.380	160.034	170.534	119.544	199.598	185.866	171.044	116.984	182.386
81.027	57.260	91.249	97.472	68.120	115.350	108.050	97.779	66.442	104.650

ТВС-11	ТВС-12	ТВС-13	ТВС-14	ТВС-15	ТВС-16	ТВС-17	ТВС-18	ТВС-19	ТВС-20
31.764	51.619	41.676	29.169	37.206	27.650	43.727	44.634	27.345	25.658
62.514	99.620	79.235	57.766	73.934	54.959	85.485	85.697	54.438	51.183
93.007	146.522	115.718	86.626	112.770	84.142	129.552	127.671	89.356	79.792
123.486	192.662	151.180	116.504	155.004	116.260	177.410	170.950	145.452	113.218
152.418	236.754	184.666	145.038	196.796	148.348	225.556	213.376	210.564	147.596
176.490	275.890	214.210	166.750	229.180	173.420	265.500	250.240	247.020	173.460
194.220	310.030	239.610	180.480	250.730	190.620	297.510	281.470	270.690	190.620
197.436	320.990	247.506	180.984	253.482	193.516	307.118	291.894	274.386	193.516
190.044	314.202	242.100	171.966	242.704	186.044	299.932	286.580	263.352	186.044
169.276	284.178	219.048	151.370	215.132	165.528	270.768	260.176	233.952	165.524
132.203	225.188	173.780	116.984	167.334	129.142	214.182	207.038	182.378	129.134
75.734	131.260	101.500	66.442	95.711	73.908	124.47	121.230	104.650	73.908

ТВС-21	ТВС-22	ТВС-23	ТВС-24	ТВС-25	ТВС-26	ТВС-27	ТВС-28
29.839	39.629	29.156	42.171	39.272	50.621	43.877	41.129
58.898	77.011	57.569	82.699	76.437	97.908	84.463	78.332
97.691	118.758	87.217	126.478	118.165	144.704	126.380	114.751
161.274	166.436	119.502	175.154	165.958	191.284	169.932	150.430
236.470	215.712	151.392	224.698	215.426	236.098	212.810	184.284
281.870	256.360	176.520	265.410	256.290	275.770	250.090	214.100
317.330	289.290	194.220	297.510	289.290	310.020	281.470	239.590
329.026	300.602	197.428	307.110	300.602	320.980	291.894	247.494
322.392	295.636	190.040	299.928	295.636	314.192	286.574	242.090
291.792	268.804	169.272	270.764	268.804	284.172	260.170	219.042
231.326	215.194	132.195	214.174	214.194	225.188	207.038	173.780
134.830	125.570	75.734	124.470	125.570	131.260	121.230	101.500

Источник: [2]

1.2.2 Потери на трение

$$\Delta P\text{тр}_{i,j} = \xi_{\text{тр}_{i,j}} \cdot \frac{\Delta z}{D\text{г}_{i,j}} \cdot \frac{G_j^2 \cdot \left(v_{i,j} + v_{i-1,j}\right)}{4F_{i,j}^2},$$

$\Delta z -$ высота участка

$D\text{г}_{i,j} -$ гидравлический диаметр ячейки твэл

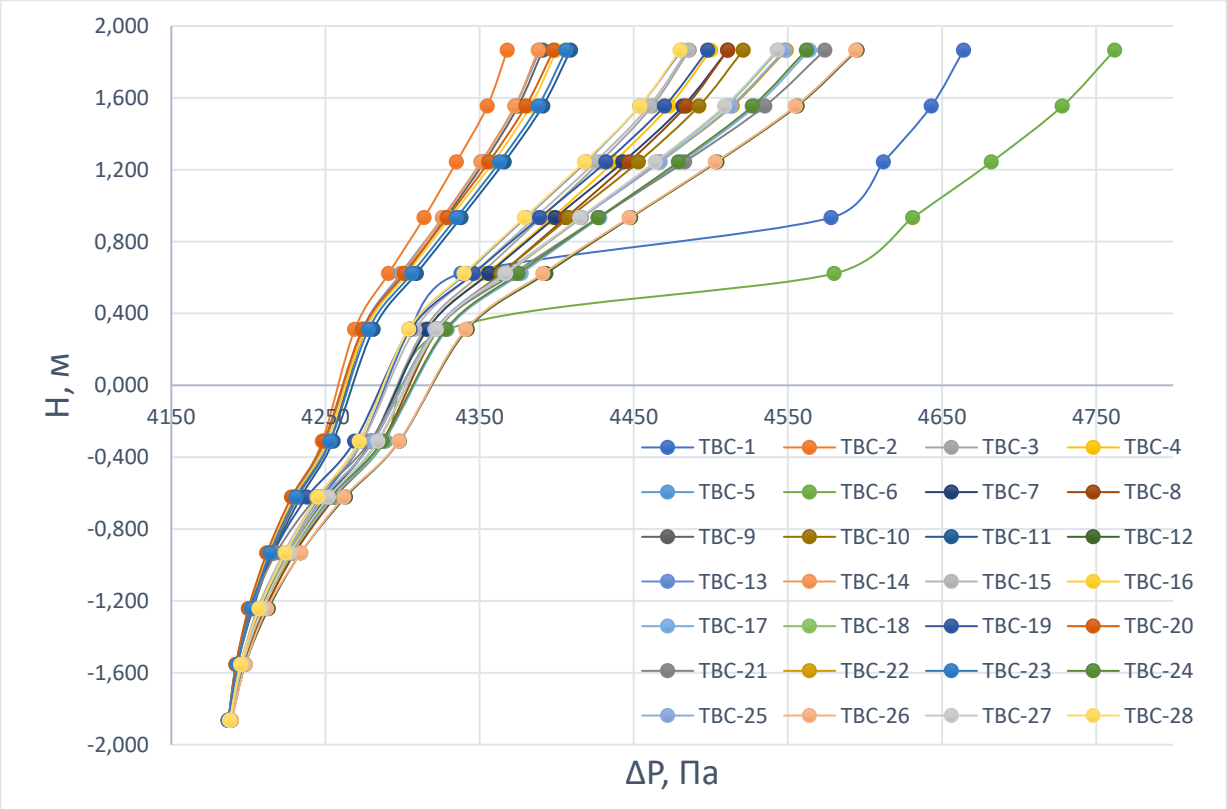
$\xi_{\text{тр}} -$ коэф. потерь на трение

$$\xi_{\text{тр}} = [1 + (x-1)^{0,32}] \cdot \frac{0,210}{Re_{i,j}^{0,25}} = \frac{C}{Re_{i,j}^{0,25}},$$

$$C = 0,21 \cdot (1 + (x-1)^{0,32}),$$

x = s/d- относительный шаг решетки твэл. C - константа, вычисляемая один раз до решения системы уравнений,

Результаты расчетов представлены на рис. 6.



Источник: собственная разработка

Рисунок.6. Сопротивление трения по ТВС рассматриваемой модели.

$Re_{i,j}$- среднее число Рейнольдса на участке, определяемое, как

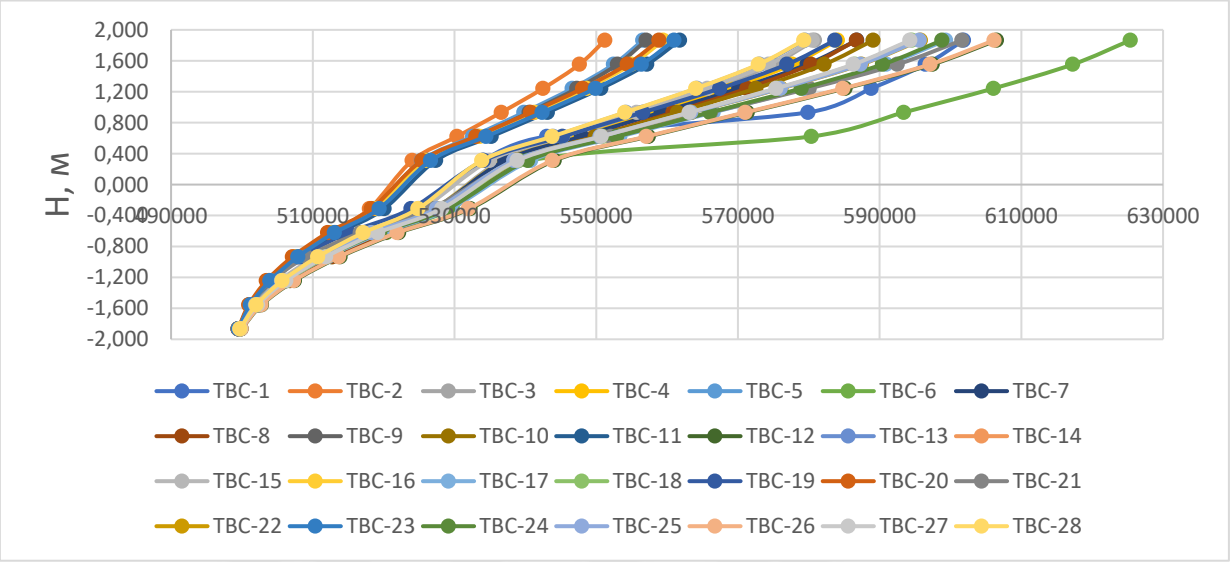
$$Re_{i,j} = \frac{2w_{i,j}D\text{г}_{i,j}}{v_{i,j} + v_{i-1,j}},$$

$$w_{i,j} = \frac{G_j \cdot \left(v_{i,j} + v_{i-1,j}\right)}{2F_{i,j}},$$

$\upsilon_{i,j}$ – кинематическая вязкость воды

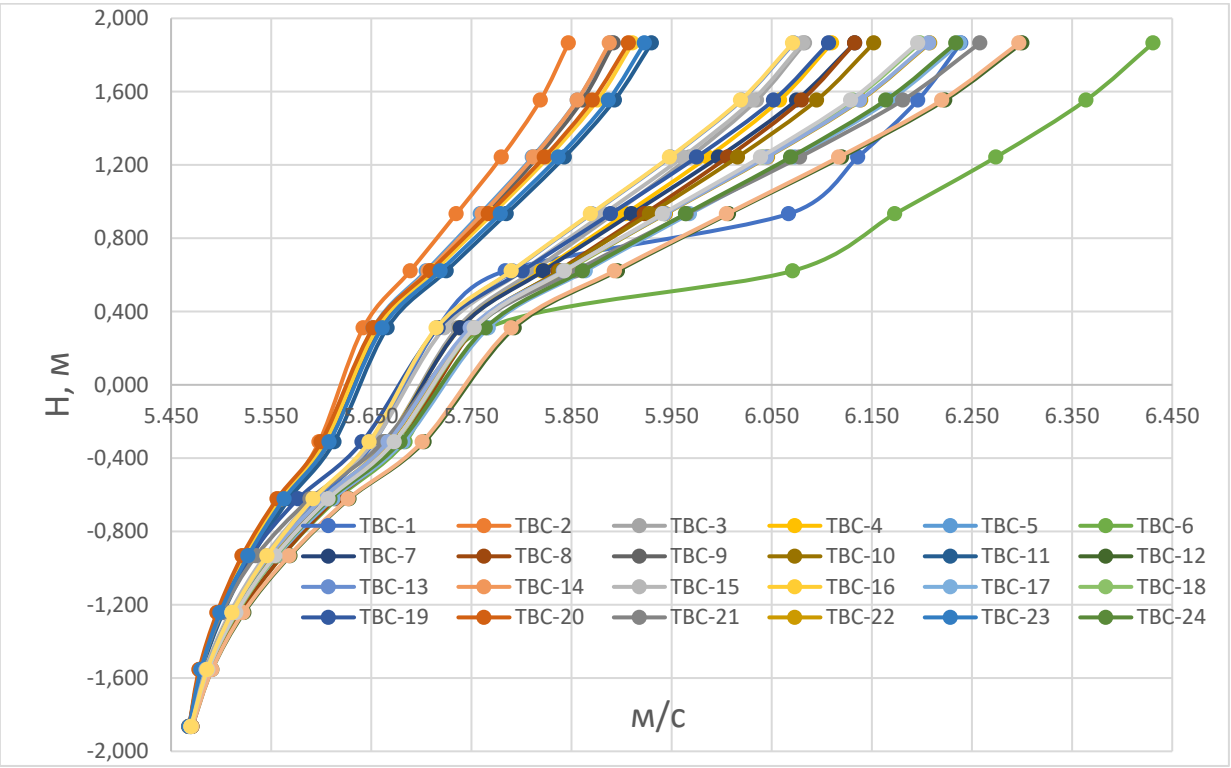
$w_{i,j}$ – средняя скорость

Изменение числа Рейнольдса и средней скорости по высоте ТВС представлено на рис. 7,8.



Источник: собственная разработка

Рисунок 7 – Изменение числа Рейнольдса по высоте ТВС



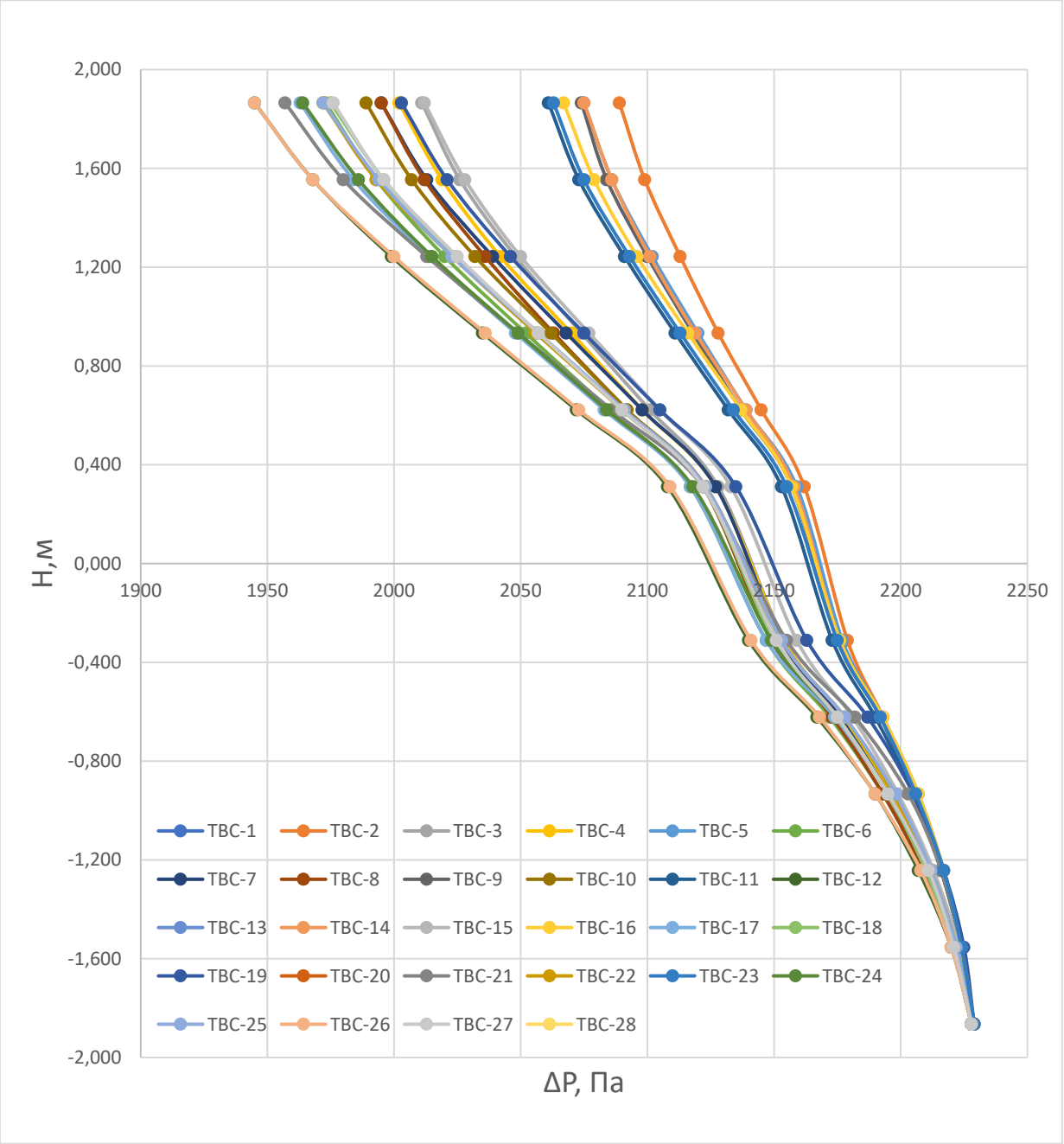
Источник: собственная разработка

Рисунок 8 – Изменение средней скорости по высоте ТВС (м/с)

1.2.3 Потери давления на преодоление высоты участка

$$\Delta Pdz_{i,j} = \frac{19{,}62 \cdot \Delta z}{\left(v_{i,j} + v_{i-1,j}\right)}.$$

Результаты представлены на рис.9.



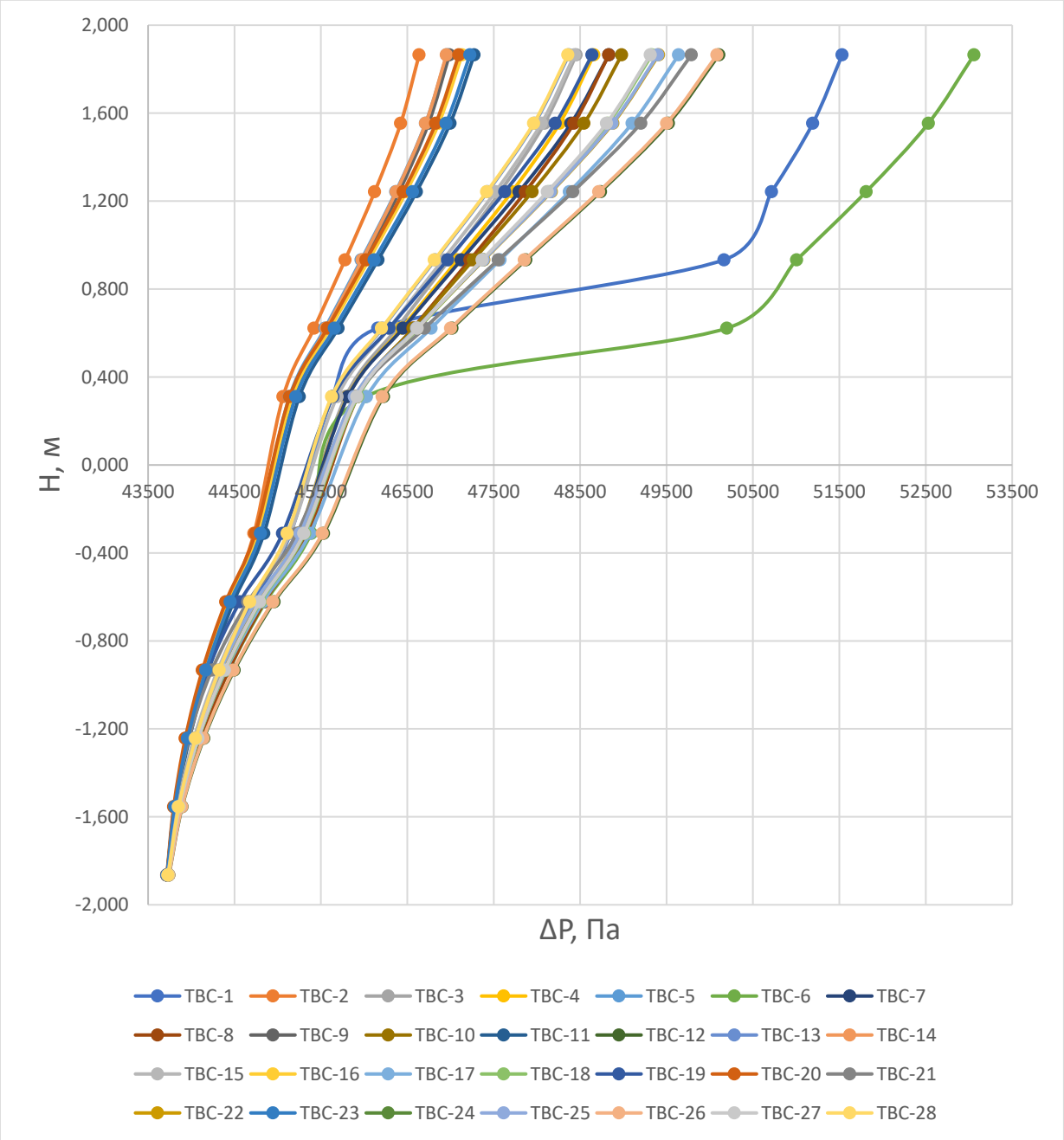
Источник: собственная разработка

Рисунок 9 –. Потери давления на преодоление высоты.

1.2.4 Потери на ускорение потока

$$\Delta P\text{уск}_{i,j} = \left(\frac{G_j}{F_{i,j}}\right)^2 \left(v_{i,j} + v_{i-1,j}\right).$$

Результаты представлены на рис.10.



Источник: собственная разработка

Рисунок 10 – Потери давления на ускорение потока

Наконец, для нахождения значений удельного объема и кинематической вязкости используются функции WaterSteamPro

$$v_{i,j} = wspVPH(P_{i,j}, h_{i,j})$$

$$v_{i,j} = wspKINVISPH(P_{i,j}, h_{i,j})$$

$$P_{i,j} = P_{i-1,j} - \left(\frac{G_j}{F_{i,j}}\right)^2 \left(v_{i,j} + v_{i-1,j} + \frac{\varepsilon_{\text{др}} \cdot v_{i,j}}{2} + \frac{C \cdot \Delta z \cdot (v_{i,j} + v_{i-1,j})}{2D\text{г}_{i,j}} \times \frac{F_{i,j}}{G_j D\text{г}_{i,j}} \cdot \frac{v_{i,j} + v_{i-1,j}}{v_{i,j} + v_{i-1,j}}\right) - \frac{19{,}62 \cdot \Delta z}{(v_{i,j} + v_{i-1,j})}.$$

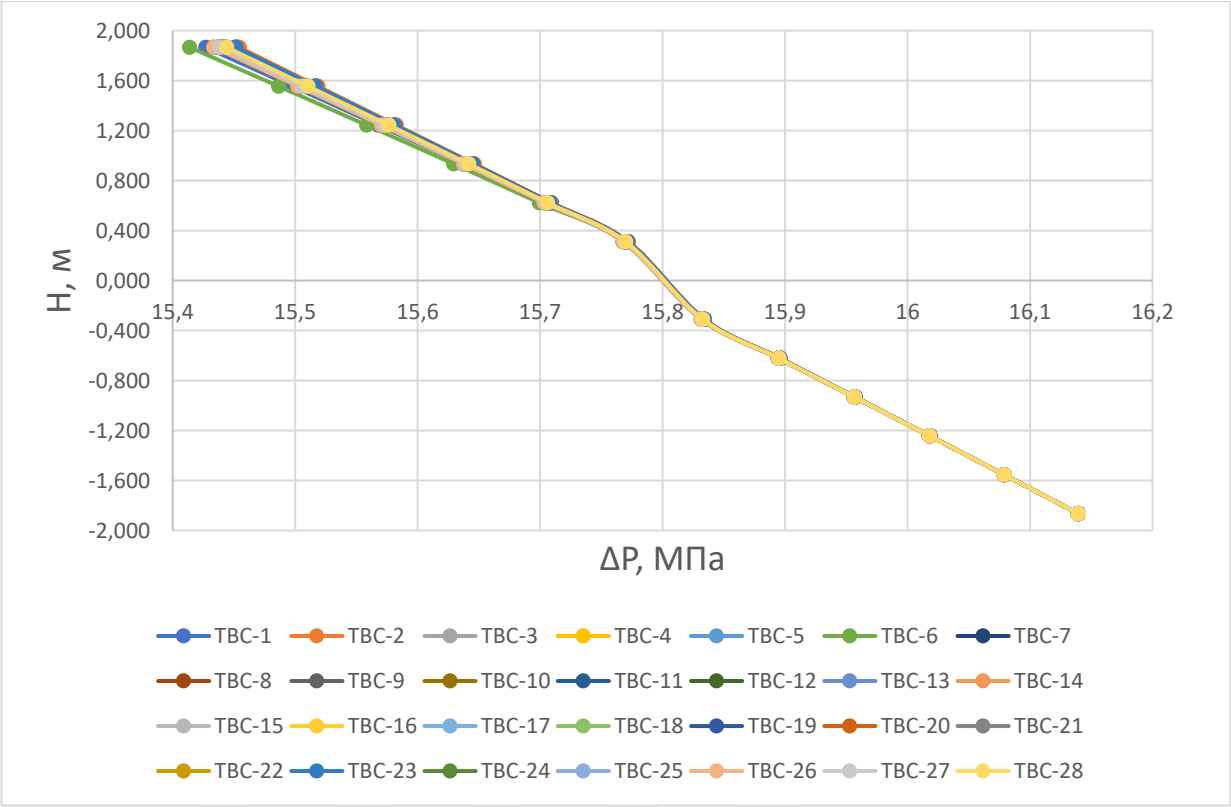
$$\Delta P\text{а.з} = \frac{1}{N\text{твс}} \sum_{1}^{N\text{твс}} \Delta P_i .$$

На рис. 11 представлено изменение давления по высоте активной зоны для рассматриваемых ТВС при одинаковом расходе через кассеты. Как и следовало ожидать, при принятом допущении об одинаковых расходах теплоносителя по кассетам перепады давления на разных ТВС оказались разными.

Далее пересчитываются расходы через все ТВС следующим образом:

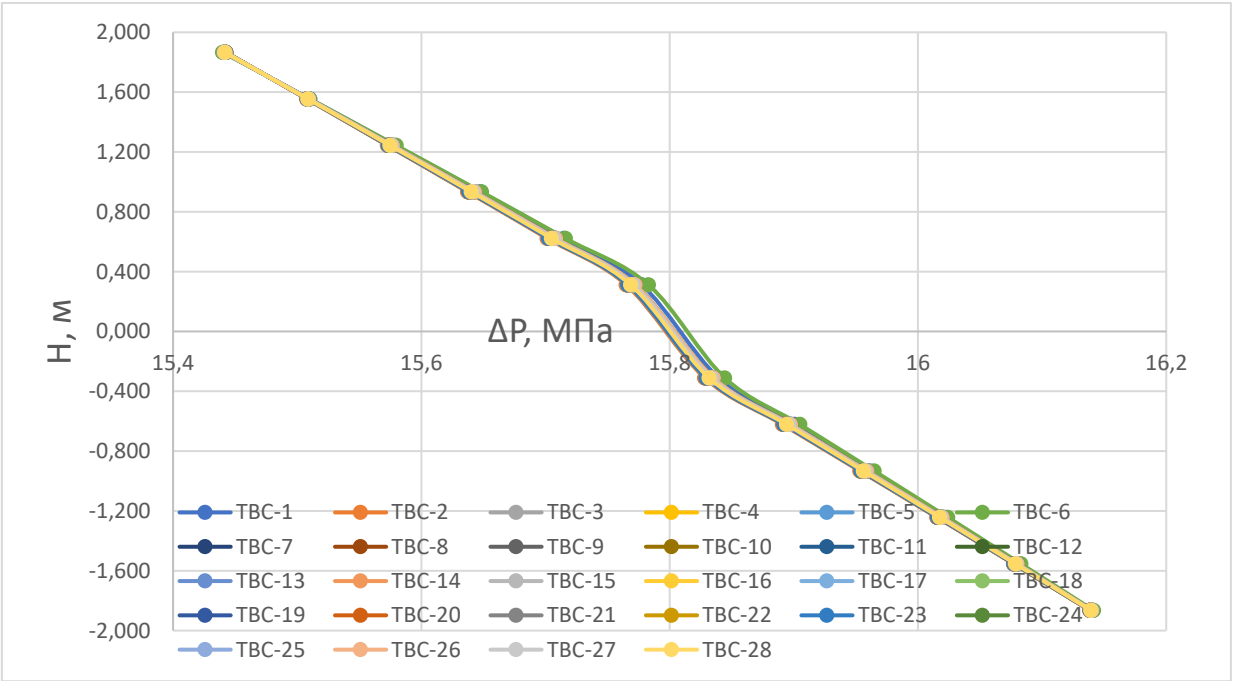
$$G_{i,\text{нов}} = G_{i,\text{стар}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{а.з}}}{\Delta P_i}}.$$

Повторяем расчет с измененными расходами через ТВС до сходимости перепада давлений по всем ТВС. Видно (рис. 12), что перепады давления по всем ТВС рассматриваемой модели теперь совпадают.



Источник: собственная разработка

Рисунок 11 – Изменение давления по высоте ТВС при одинаковом расходе теплоносителя по кассетам.



Источник: собственная разработка

Рисунок 12 – Изменение давления по высоте ТВС при разных расходах теплоносителя по кассета

1.3 Второй этап расчета

Последовательное вычисление перепадов температуры от жидкости к топливу. Так как входные данные относятся не к конкретным точкам, а к участкам, логично отнести расчеты к центрам этих участков и все значения вычислять на середине участков. Кроме того, на выходах из участков расположены дистанционирующие решетки (ДР), их влияние на теплообмен учесть достаточно трудно. В данном случае удобнее оказалось вычислять значения по средним энтальпии и давлению на участках, а не усреднять значения на входе и выходе, как это было сделано на первом этапе расчетов. Параметры воды вычисляются по следующим формулам:
Число Прандтля:

$$Pr_{i,j} = wspPRANDTLEPH(0{,}5 \cdot \left(P_{i,j} + P_{i-1,j}\right), 0{,}5 \cdot \left(h_{i,j} + h_{i-1,j}\right). \quad (29)$$

Коэффициент теплопроводности воды:

$$\lambda f_{i,j} = wspTHERMCONDPH(0{,}5 \cdot \left(P_{i,j} + P_{i-1,j}\right), 0{,}5 \cdot \left(h_{i,j} + h_{i-1,j}\right). \quad (30)$$

Далее находится число Нуссельта по следующей корреляции [4]:

$$Nu_{i,j} = 0{,}0165 + 0{,}02 \cdot (1 - 0{,}91 \cdot x^{-2}) \cdot x^{0{,}15} \cdot Re_{i,j}^{0{,}8} Pr_{i,j}^{0{,}4} = A \cdot Re_{i,j}^{0{,}8} Pr_{i,j}^{0{,}4}\,. \quad (31)$$

где постоянная А вычисляется один раз до начала расчетов. Диапазон применимости формулы:

$$Re = 5 \cdot 10^3 \div 5 \cdot 10^5\,, Pr = 0{,}7 \div 20\,, x = 1{,}1 \div 1{,}8.$$

Далее находится коэффициент теплоотдачи от воды к оболочке твэл:

$$\alpha_{i,j} = \frac{Nu_{i,j} \cdot \lambda_{i,j}}{D\text{г}_{i,j}}. \quad (32)$$

Эта формула справедлива только при отсутствии кипения. Создание модели теплообмена при кипении оказалось весьма трудоемким, поэтому в данной работе кипение не рассчитывается.

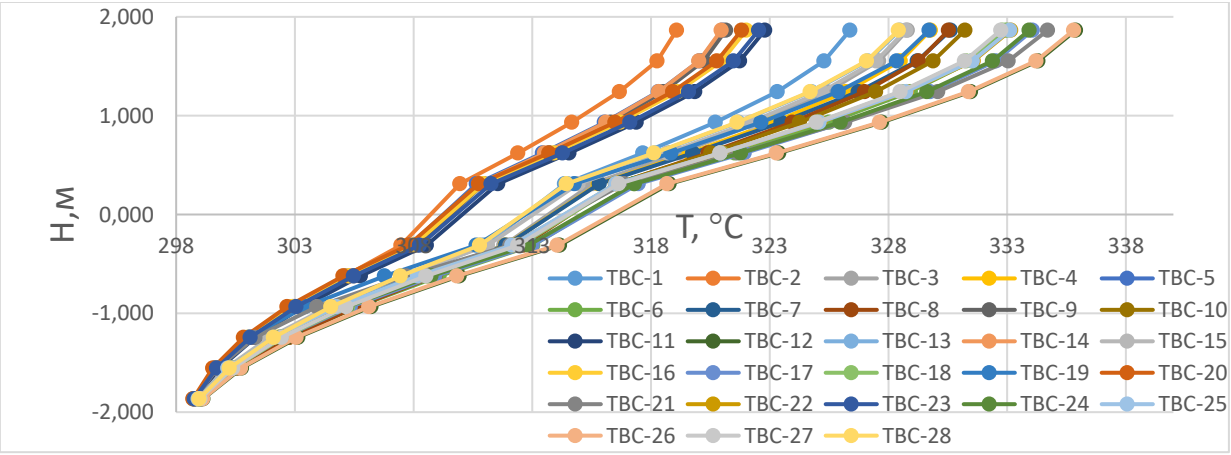
Температуру воды можно найти так же, как Pr и $\lambda_{i,j}$

$$t_{i,j} = wspTPH(0{,}5 \cdot (P_{i,j} + P_{i-1,j}), 0{,}5 \cdot (h_{i,j} + h_{i-1,j}). \quad (33)$$

А можно выразить через найденные ранее температуры на выходах из участков

$$t_{i,j} = 0{,}5 \cdot (t_{i,j} + t_{i-1,j}). \quad (34)$$

Распределение температуры воды, наружной поверхности оболочки твэл, внутренней поверхности оболочки твэл и наружной и внутренней поверхности топлива по высоте ТВС представлено на рис. [13-18].

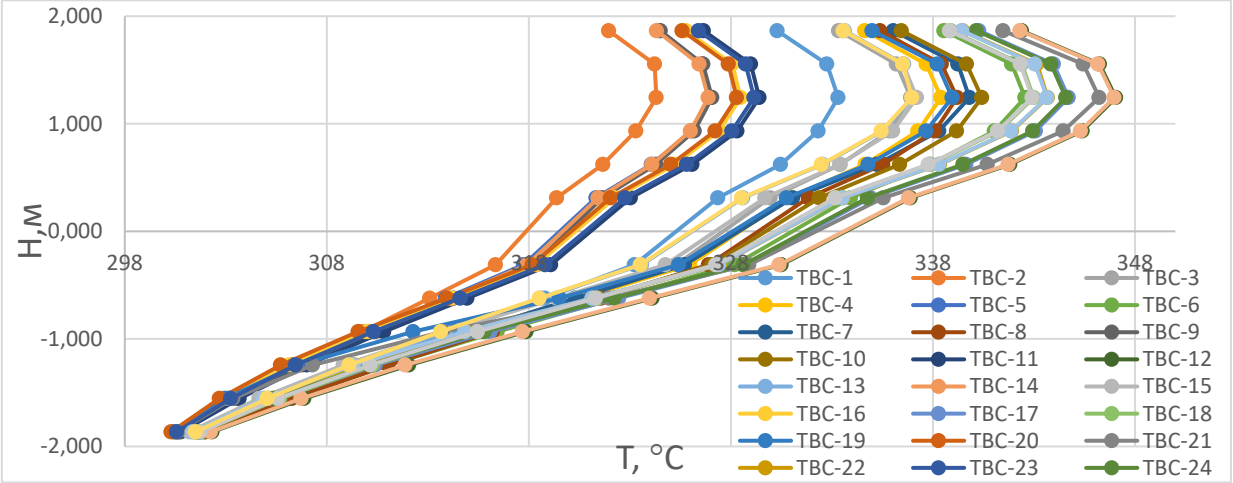


Источник: собственная разработка

Рисунок 13 – Распределение температуры воды по высоте ТВС (начало кампании)

Прибавив к температуре воды перепад температуры стенка-жидкость, получаем температуру наружной поверхности оболочки твэл:

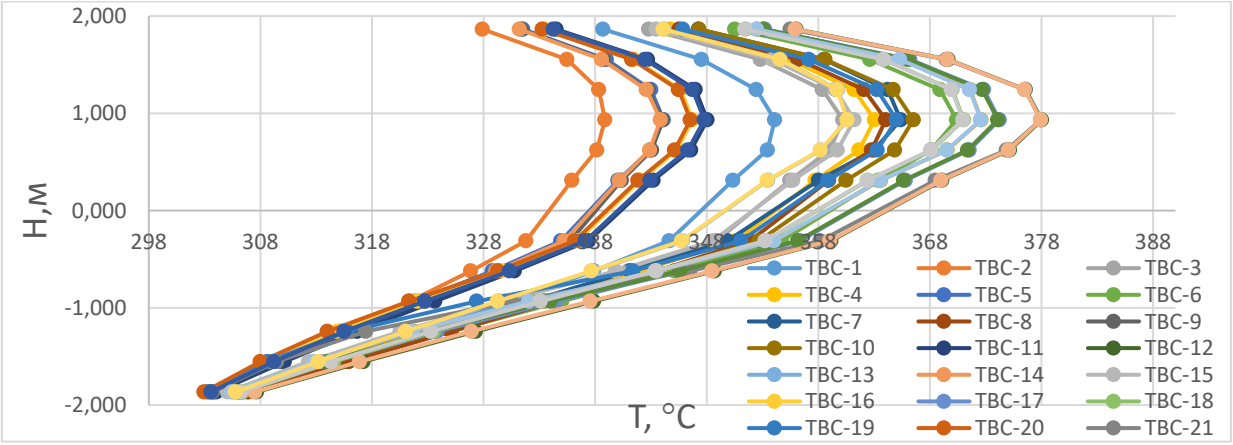
$$t_{\text{об } i,j}^{\text{нар}} = t_{i,j} + \frac{\gamma \cdot q_{i,j}}{\pi \cdot n \cdot d_2 \cdot \Delta z \cdot \alpha_{i,j}} . \quad (35)$$



Источник: собственная разработка

Рисунок 14 – Распределение температуры наружной поверхности оболочки по высоте твэла (начало кампании)

$$t_{\text{об } i,j}^{\text{внутр}} = t_{\text{об } i,j}^{\text{нар}} + \frac{\gamma \cdot q_{i,j}}{2\pi \cdot n \cdot \Delta z \cdot \lambda_{\text{об}}} \cdot ln \frac{d_{\text{об}}^{\text{нар}}}{d_{\text{об}}^{\text{внутр}}} . \quad (36)$$

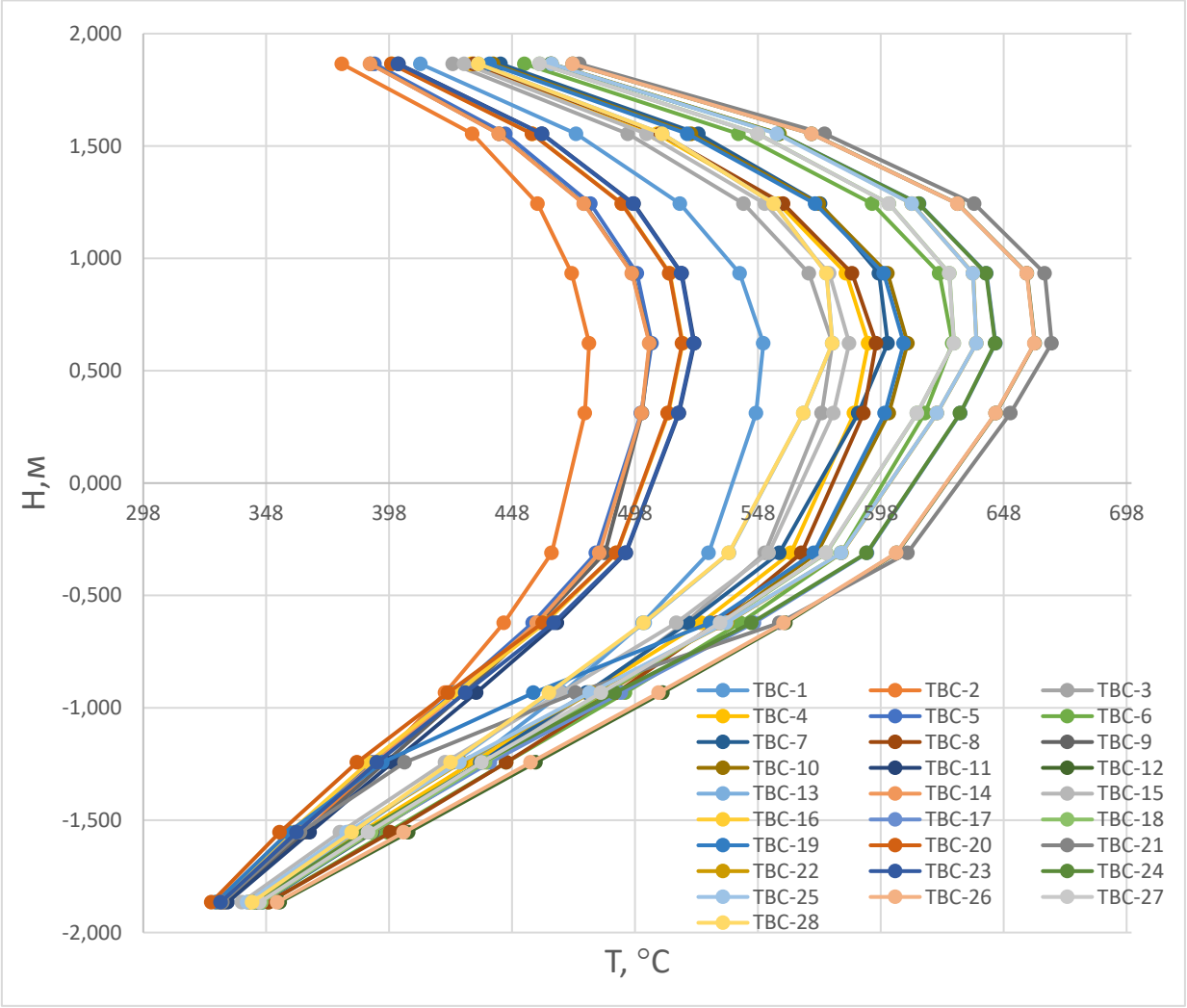


Источник: собственная разработка

Рисунок 15 – Распределение температуры внутренней поверхности оболочки по высоте твэла (начало кампании)

Если топливо свежее, то между ним и оболочкой имеется газовый зазор и температура рассчитывается по формуле

$$t_{\text{т } i,j}^{\text{нар}} = t_{\text{об } i,j}^{\text{внутр}} + \frac{\gamma \cdot q_{i,j}}{2\pi \cdot n \cdot \Delta z \cdot \lambda_{\text{з}}} \cdot ln \frac{d_{\text{об}}^{\text{нар}}}{d_{\text{об}}^{\text{внутр}}}. \quad (37)$$



Источник: собственная разработка

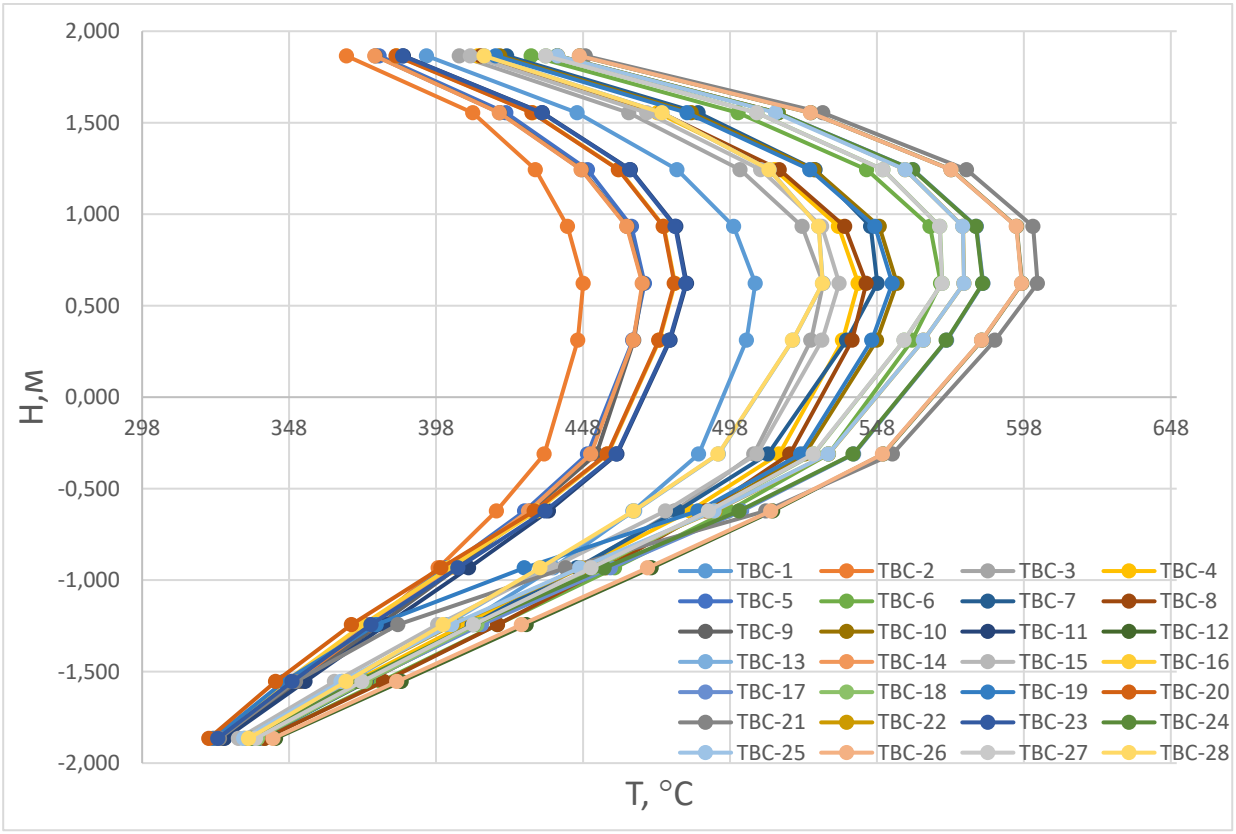
Рисунок 16 – Распределение температуры наружной поверхности топлива по высоте твэл (начало кампании)

При распухании топлива и достижении контакта с оболочкой газового зазора нет, тогда внешний диаметр топлива равен внутреннему диаметру оболочки. Тем не менее, между топливом и оболочкой в этом случае будет

контактное термическое сопротивление, которое достаточно велико, но меньше сопротивления газового зазора и перепад температуры имеет вид

$$t_{\text{т } i,j}^{\text{нар}} = t_{\text{об } i,j}^{\text{внутр}} + \frac{\gamma \cdot q_{i,j}}{\pi \cdot n \cdot \Delta z \cdot d_{\text{об}}^{\text{внутр}} \cdot \alpha_{\text{з}}} . \quad (38)$$

$\alpha_{\text{з}} \approx 4900 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ проводимость контактного слоя в зазоре



Источник: собственная разработка

Рисунок 17 – Распределение температуры наружной поверхности топлива по высоте твэл (при контакте топлива и оболочки)

Расчет внутренней температуры топлива состоит из решения нелинейного уравнения, поэтому с учетом специфики MathCAD пришлось вынести его в отдельный этап ТГР. При расчете учитывается зависимость теплопроводности топлива от температуры (в общем случае, теплопроводность зависит также и от выгорания).

Для этого используется следующая формула, дающая достаточно качественные результаты [5]:

$$\lambda(t,B) = 10^4 \cdot [1148 + 35B + 2{,}475 \cdot (1 - 0{,}00333B) \cdot t]^2 + 0{,}0132e^{0{,}00188t}. \quad (39)$$

Температуру топлива легче всего найти методом интегральной теплопроводности. Найдем выражение для Λ (t, B) по формуле (39):

$$\Lambda(\mathrm{t,B}) = \int_0^t \lambda(t,B)dt = \frac{ln[1148+35B+2{,}475\cdot(1-0{,}00333B)\cdot t]-\ln(1148+35B)}{0{,}0002475\cdot(1-0{,}00333B)} + 7{,}0213\cdot(e^{0{,}00188t}).$$

Перепишем эту зависимость в более удобном виде:

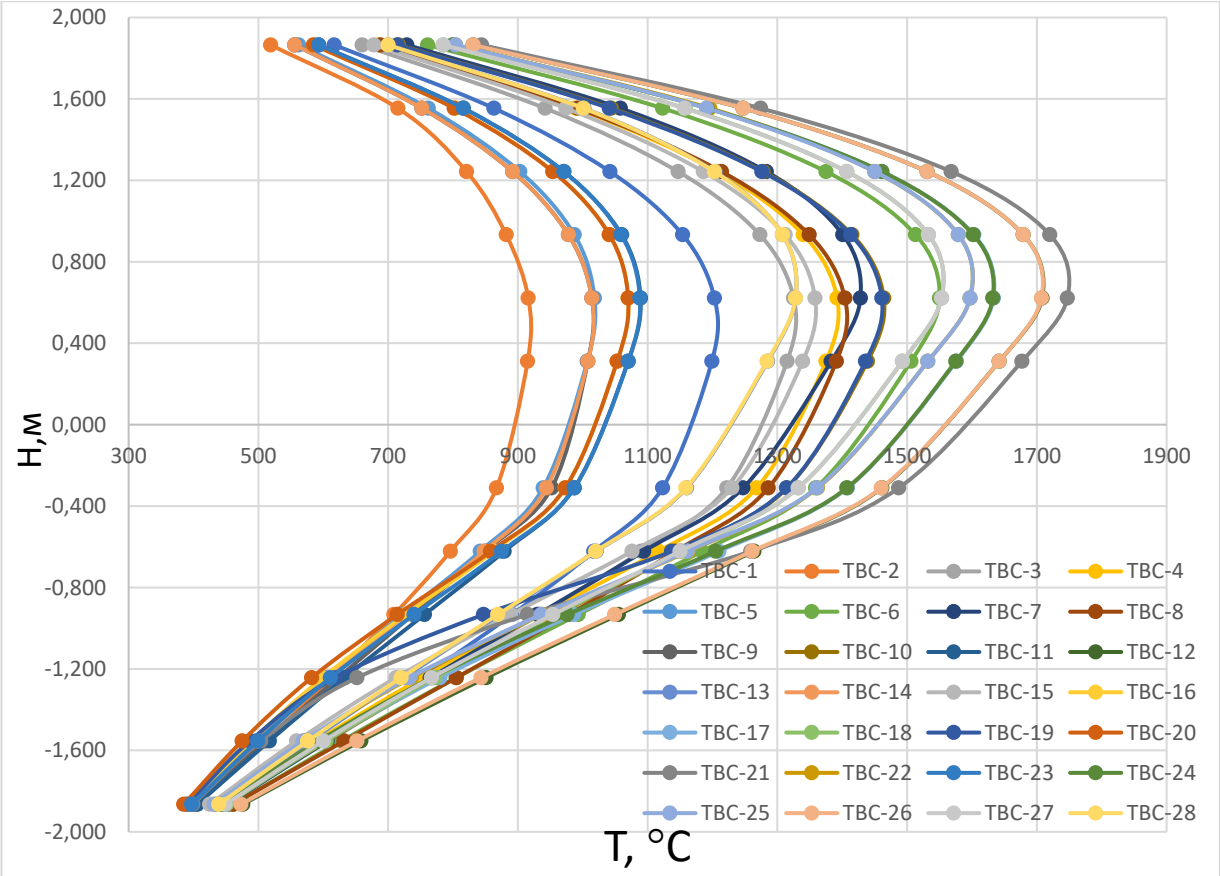
$$\Lambda(\mathrm{t,B}) = \frac{10^6}{247{,}5-0{,}8242B} \cdot \ln\left(1 + t \cdot \frac{1-0{,}00333B}{463{,}84+14{,}14B}\right) + 7{,}0213 \cdot (e^{0{,}00188t} - 1). \quad (40)$$

По (40) находится интегральная теплопроводность на поверхности топлива. Внутрь по толщине топлива величина Λ растет и на диаметре d составляет:

$$\Lambda(t_{i,j}^{\text{внутр}}(\mathrm{d}), B_{i,j}) = \Lambda(t_{i,j}^{\text{нар}}, B_{i,j}) + \frac{\gamma \cdot q_{i,j}}{2\pi \cdot n \cdot \Delta z} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot d^2}{d_{\text{нар}}^2 - d^2} \cdot ln\frac{d_{\text{нар}}}{d}\right). \quad (41)$$

Выгорание топлива не учитывается, как допущение при расчете.

Полученному значению Λ для рассматриваемого диаметра d (например, для внутренней поверхности топлива) однозначно соответствует искомая температура топлива $t_m^{внут}{}_{i,j}(d)$. В явном виде выразить температуру из (41) невозможно, но это не является препятствием для использования данного уравнения в MathCAD, где оно легко решается итерационными методами.



Источник: собственная разработка

Рисунок 18 – Распределение температуры внутренней поверхности топлива по высоте твэла (начало кампании)

1.4 Обратный теплогидравлический расчет

Обратный расчет (в направлении от выхода из а.з. ко входу) состоит из тех же этапов, что и прямой расчет. Различия есть только в первом этапе. Сначала по (15) пересчитываются энтальпии воды на выходах из участков в соответствии с величиной уменьшения расходов. Давление на выходе из а.з. известно после прямого расчета. По энтальпии и давлению вычисляются параметры на выходе из а.з. Система уравнений останется та же, но изменится уравнение для определения давлений, так как неизвестными будут входные величины:

$$p_{i,j} = p_{i+1,j} + \Delta p_{ДР\,i,j} + \Delta p_{mp\,i,j} + \Delta p_{dz\,i,j} + \Delta p_{уск\,i,j}. \quad (42)$$

Перебор индекса «i» в сторону уменьшения при решении системы уравнений (42, 17-25) позволит найти параметры воды на всех участках до входа в а.з. Для выявления возникновения объемного кипения в той или иной ТВС проводится сравнение энтальпии воды на выходе из каждого участка с энтальпией насыщения. Использовать функцию wspXPH(p,h), возвращающую степень сухости, для этой цели нельзя, так как она определена только в области влажного пара, а в области воды возвращает
ошибку. Кипение есть, если:

$$h>wspHSWT(wspTSF(P)). \quad (43)$$

Если кипение имеется, результаты расчетов для данной ТВС считаются недостоверными. Положительно сказывается то, что самые горячие участки топлива и оболочки расположены не в самых верхних участках ТВС, а там, где, как правило, еще не наступает и поверхностное кипение.

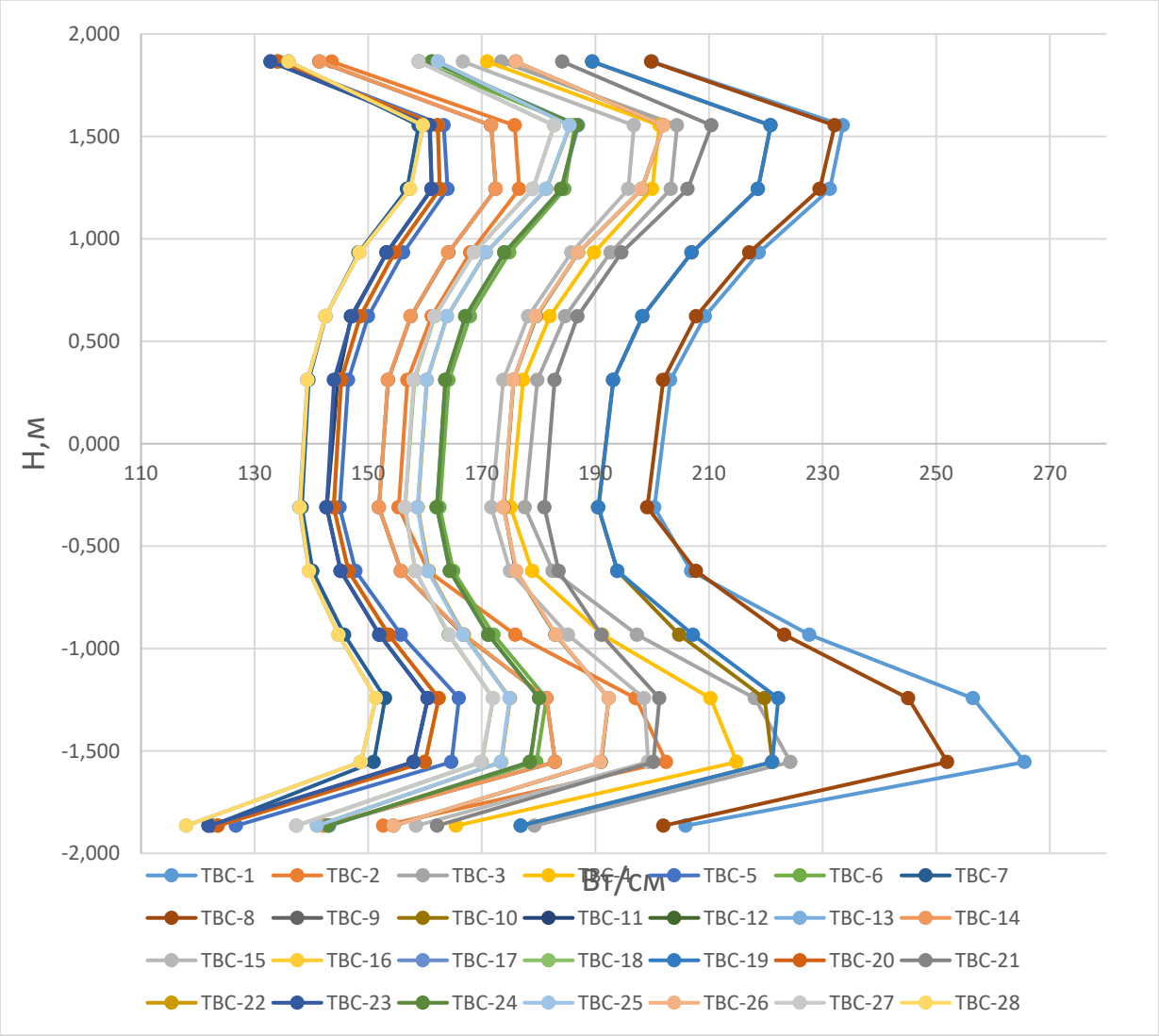
wspHSWT(wspTSF(P))=H

максимальное значение параметра H=1.627· 10^6 Дж/кг

минимальное значение параметра h=1.552· 10^6 Дж/кг

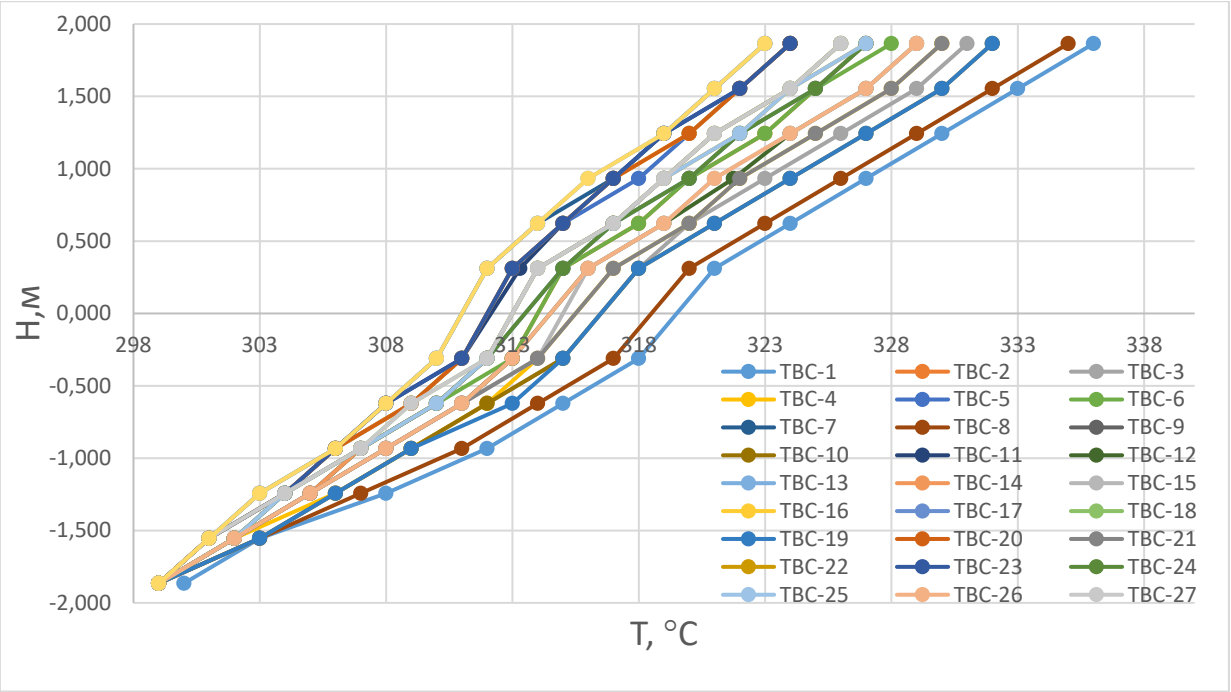
1.5 Расчет основных характеристик в конце кампании с начальной загрузкой топлива (кампания реактора 343 эффективных суток)

Распределение линейного энерговыделения, температуры воды и температуры наружной и внутренней оболочки твэлов на конце кампании по высоте ТВС представлено на рис.19-24.



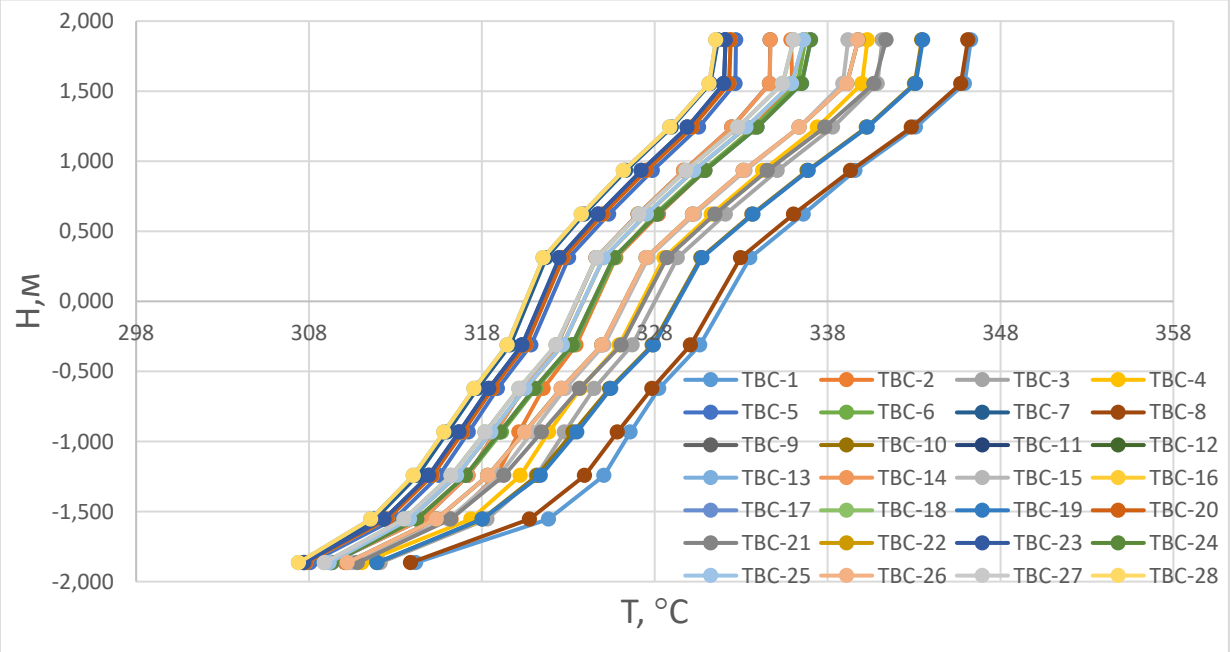
Источник: собственная разработка

Рисунок 19 – Распределение энерговыделения по высоте ТВС (конец кампании)



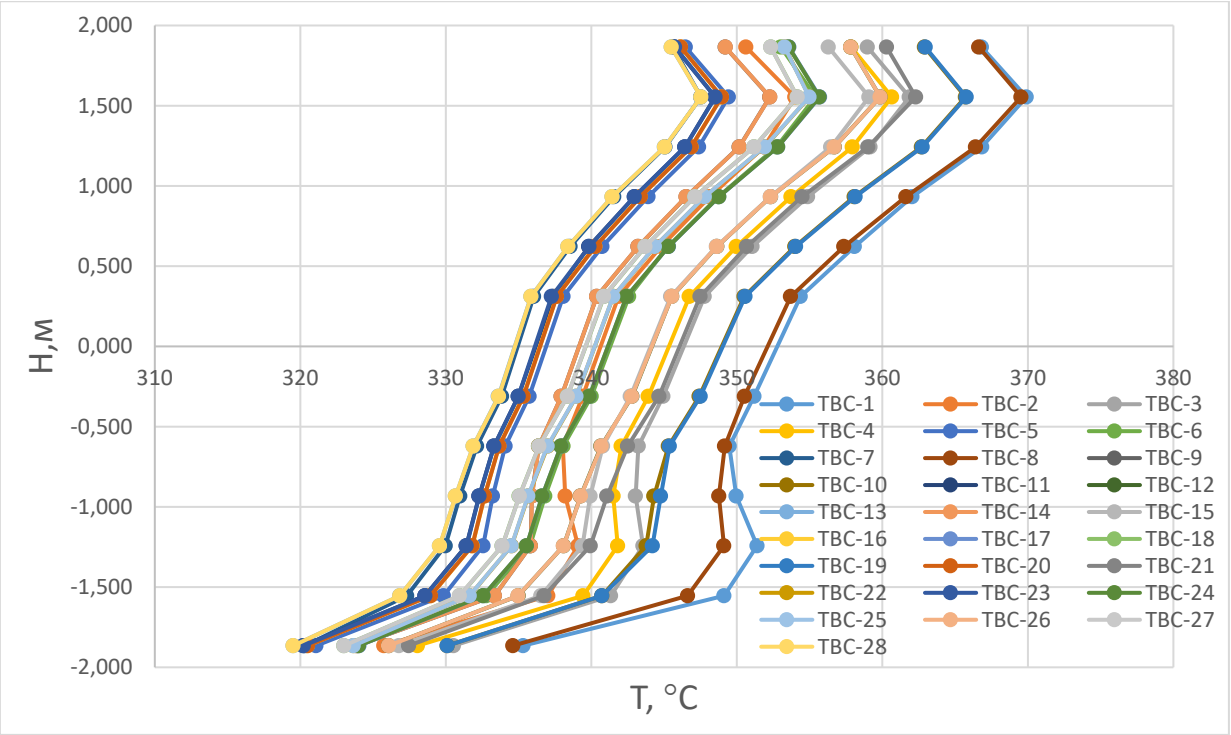
Источник: собственная разработка

Рисунок 20 – Температуры воды по высоте ТВС (конец кампании)



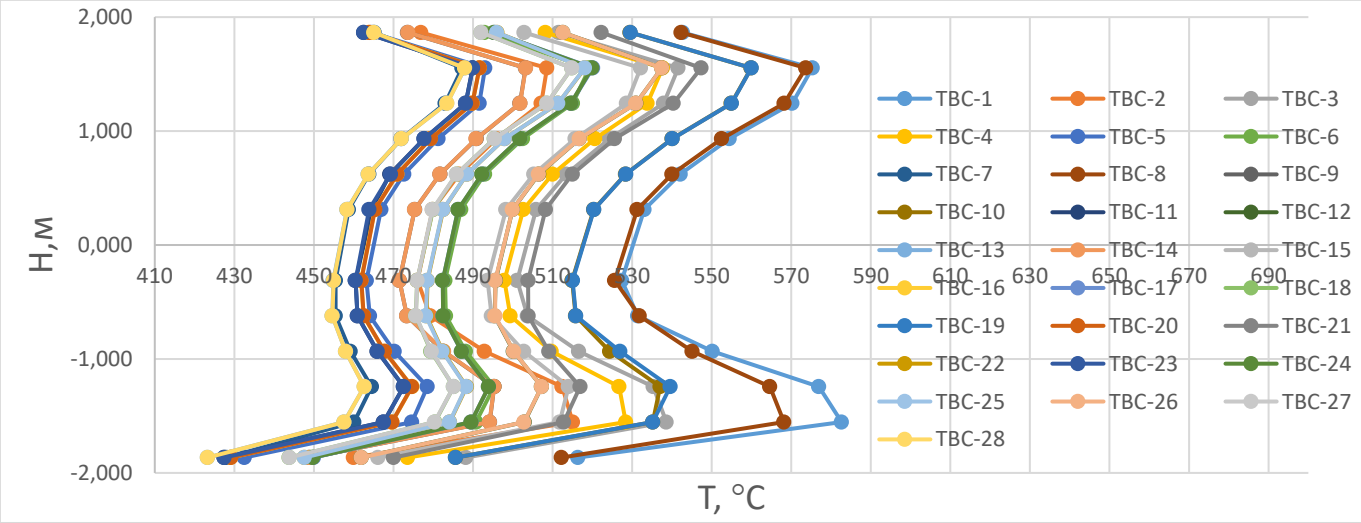
Источник: собственная разработка

Рисунок 21 – Температура наружной поверхности оболочки по высоте твэла (конец кампании)



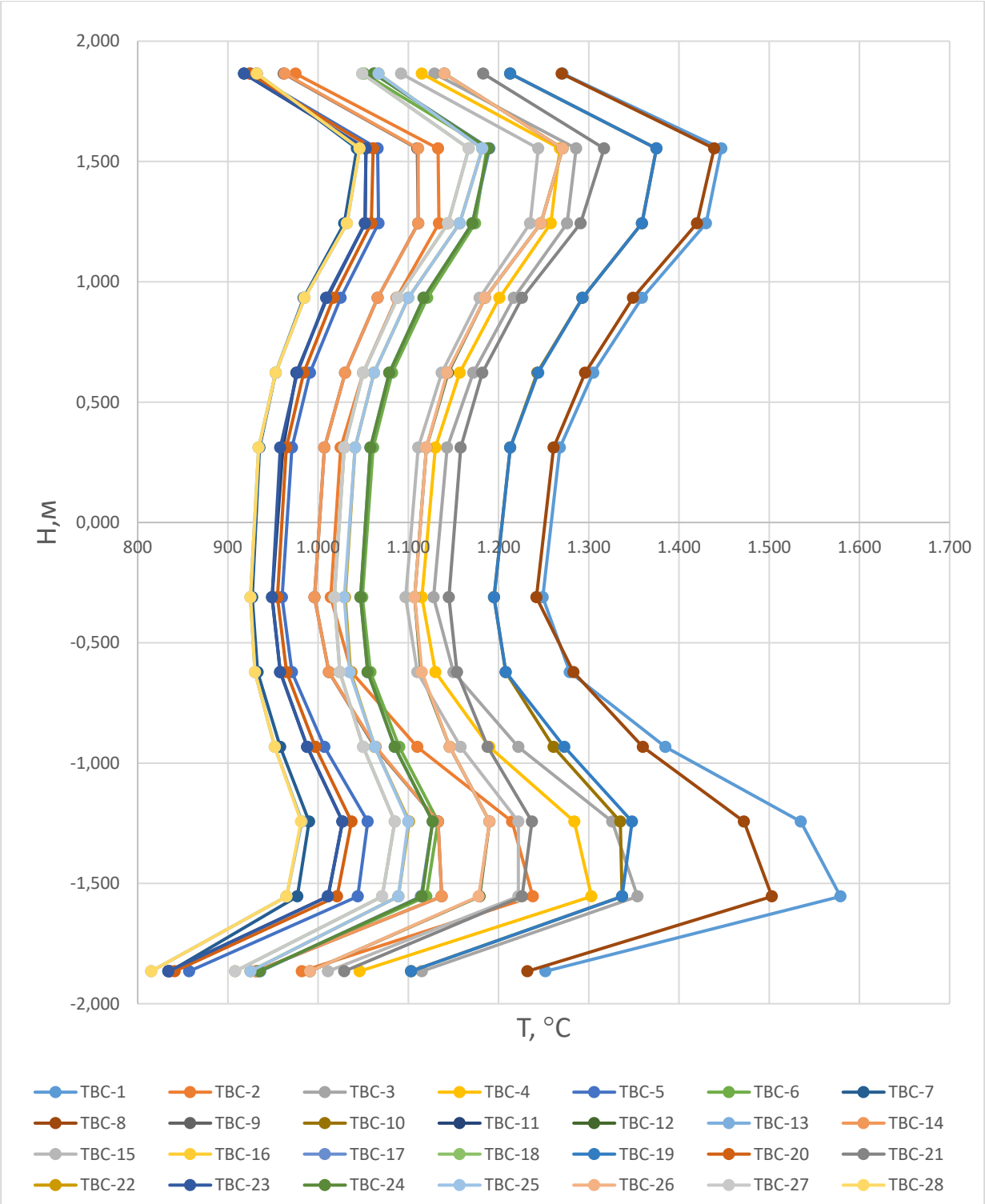
Источник: собственная разработка

Рисунок 22 – Температура внутренней поверхности оболочки по высоте твэла (конец кампании)



Источник: собственная разработка

Рисунок 23 – Температура наружной поверхности топлива по высоте твэла (конец кампании)



Источник: собственная разработка

Рисунок 24 – Температура внутренней поверхности топлива по высоте твэла (конец кампании)

ГЛАВА 2. РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ПОНИЖЕННОМ РАСХОДЕ ЧЕРЕЗ ТВС

2.1 Расчет температуры при пониженных расходах через ТВС на начало кампании

$\Omega = 0{,}8 -$ задаем понижение расхода.

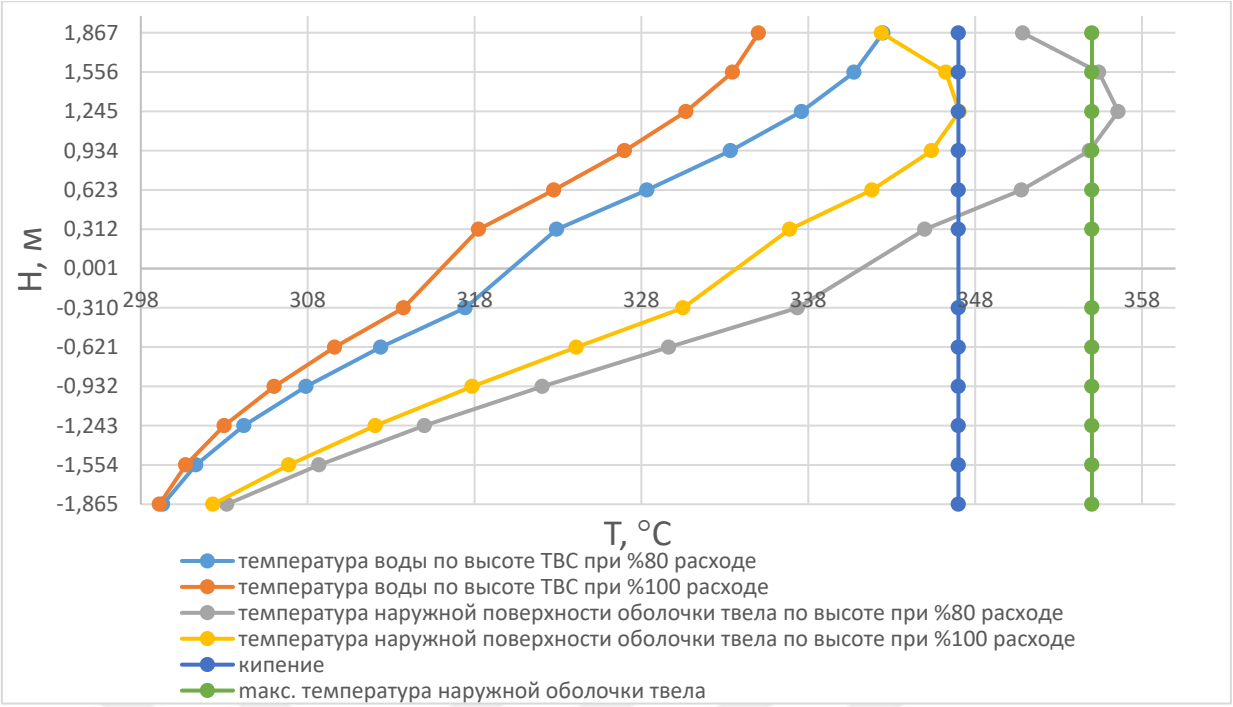
При сниженном расходе энтальпия на выходах из всех участков возрастает

$$h_{i,j} = h_{i-1,j} + \frac{q_{i,j}}{G_j \cdot \Omega}.$$

Расчеты параметров при снижении расхода теплоносителя проведены для ТВС 12,17,21,24,26 (рис.3).

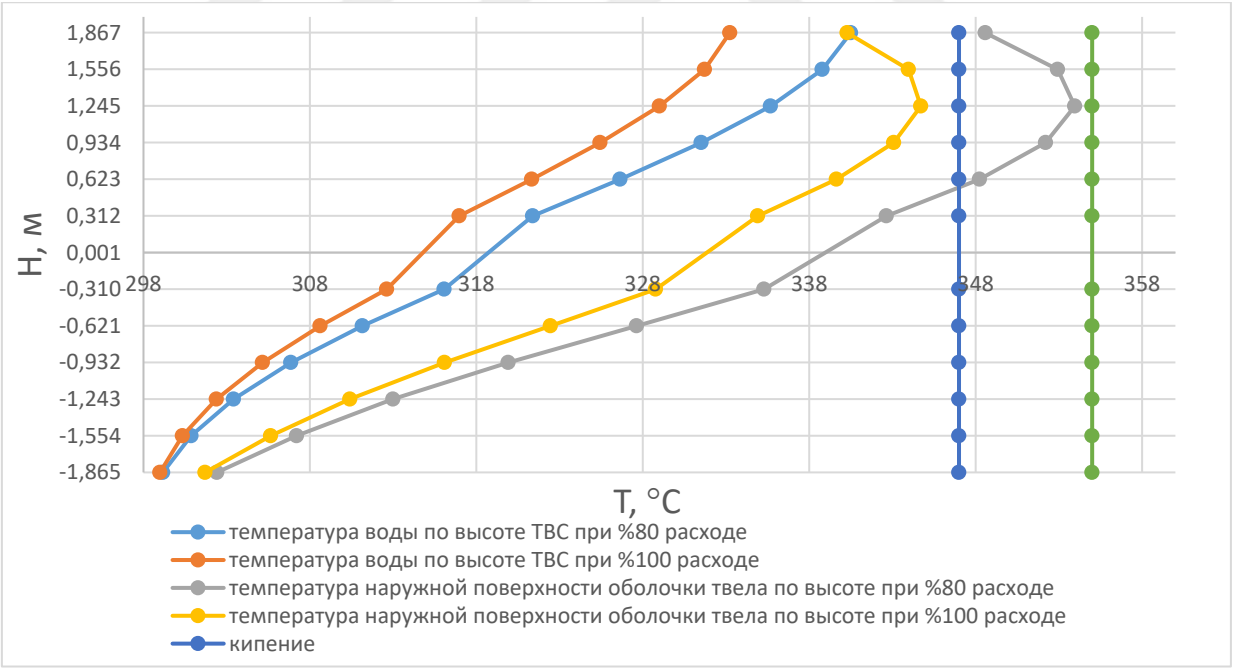
Распределение температуры воды и температуры наружной оболочки твэлов по высоте ТВС представлено на рис.25-29.

Температуры воды и оболочки твэлов при 100% и 80% расходе.



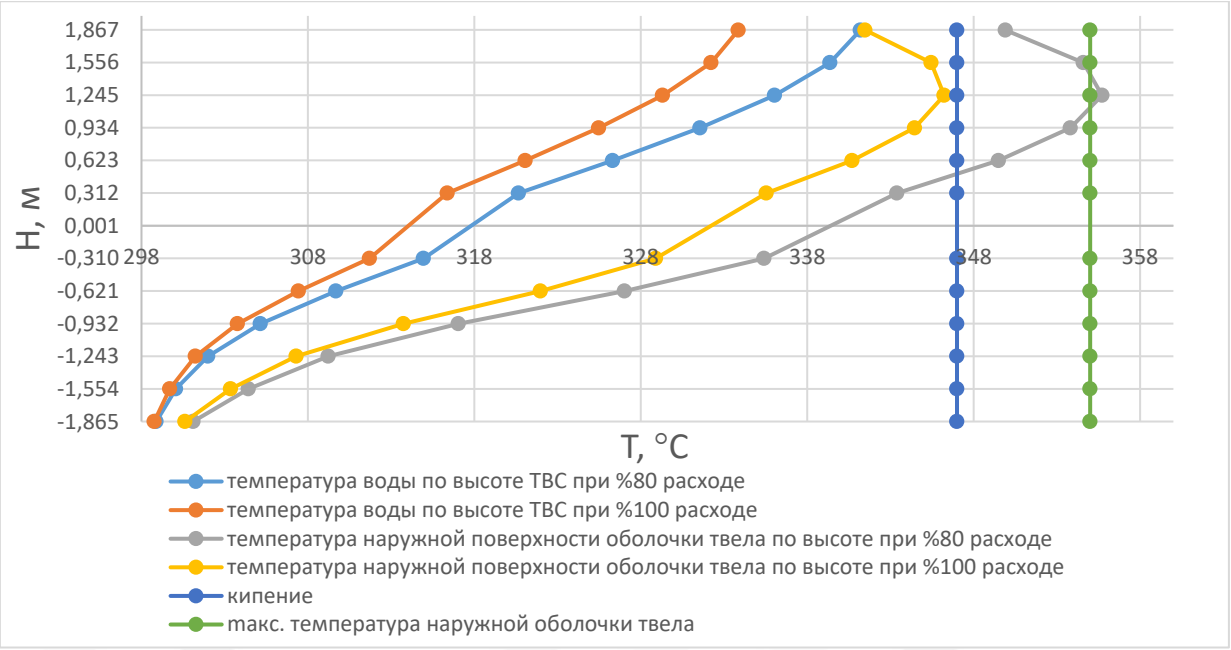
Источник: собственная разработка

Рисунок 25 – Температура воды и температура наружной оболочки твэлов по высоте ТВС-12



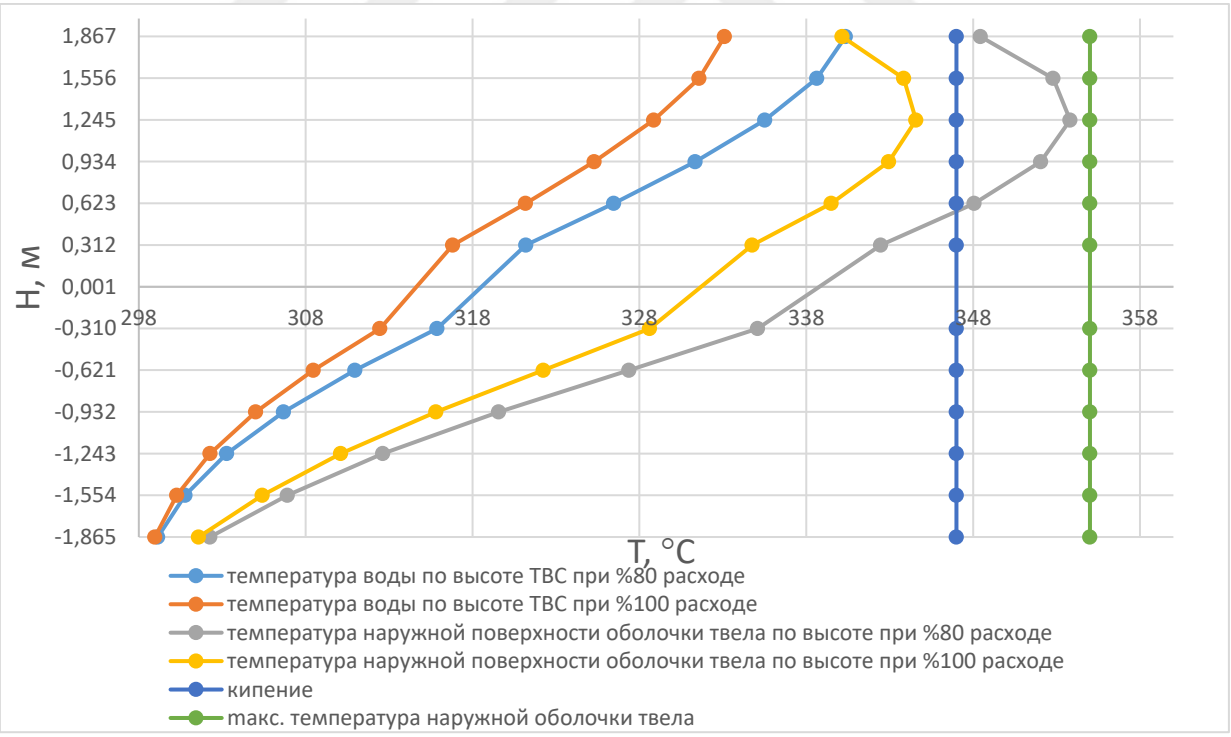
Источник: собственная разработка

Рисунок 26 – Температура воды и температура наружной оболочки твэлов по высоте ТВС-17



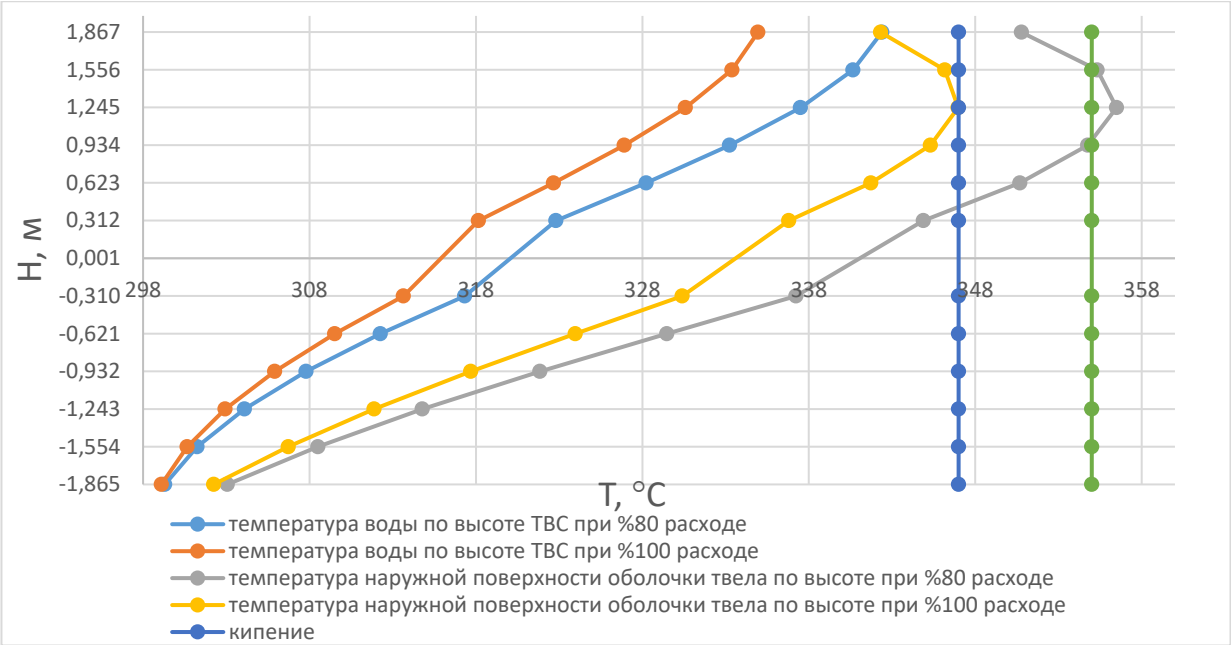
Источник: собственная разработка

Рисунок 27 – Температура воды и температура наружной оболочки твэлов по высоте ТВС-21



Источник: собственная разработка

Рисунок 28 – Температура воды и температура наружной оболочки твэлов по высоте ТВС-24

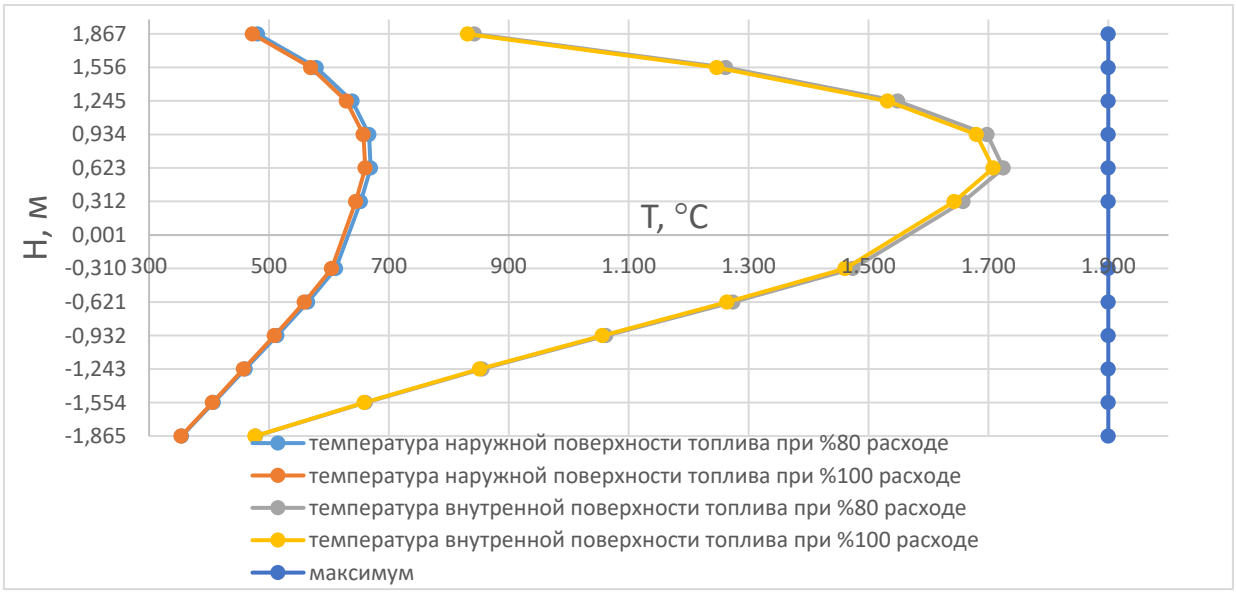


Источник: собственная разработка

Рисунок 29 – Температура воды и температура наружной оболочки твэлов по высоте ТВС-26

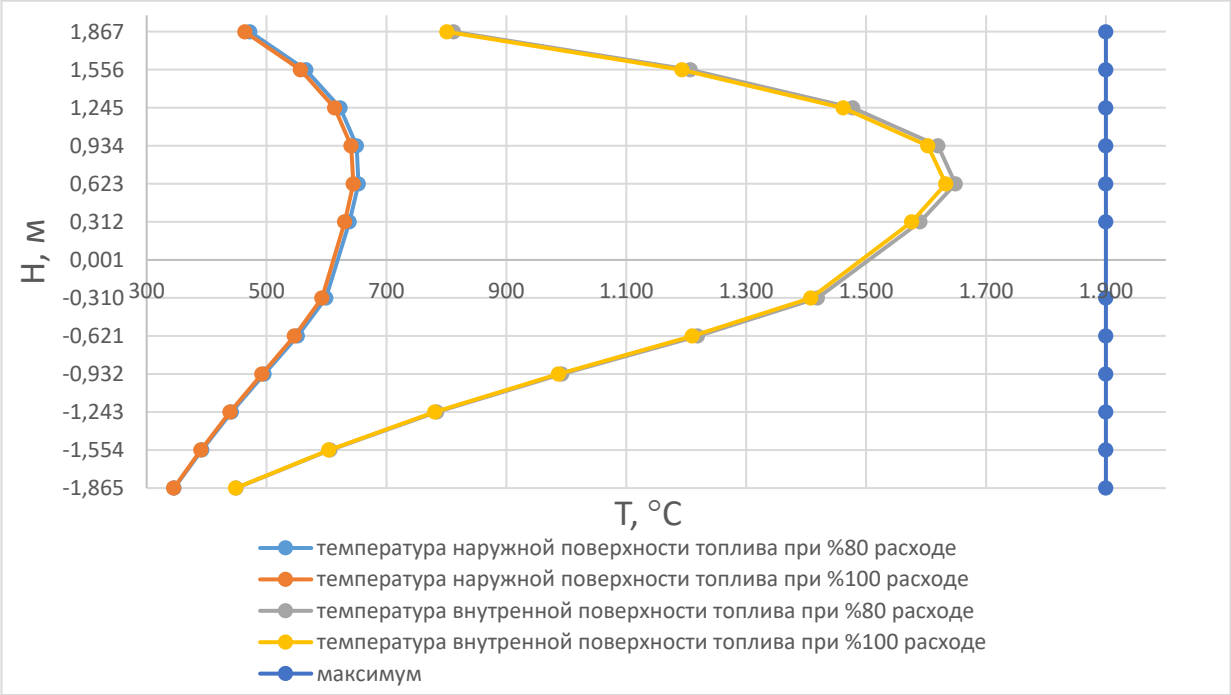
Расчеты параметров при снижении расхода теплоносителя проведены для ТВС 12,17,21,24,26 (рис.3).

Распределение температуры воды и температуры наружной оболочки твэлов по высоте ТВС представлено на рис.30-34.



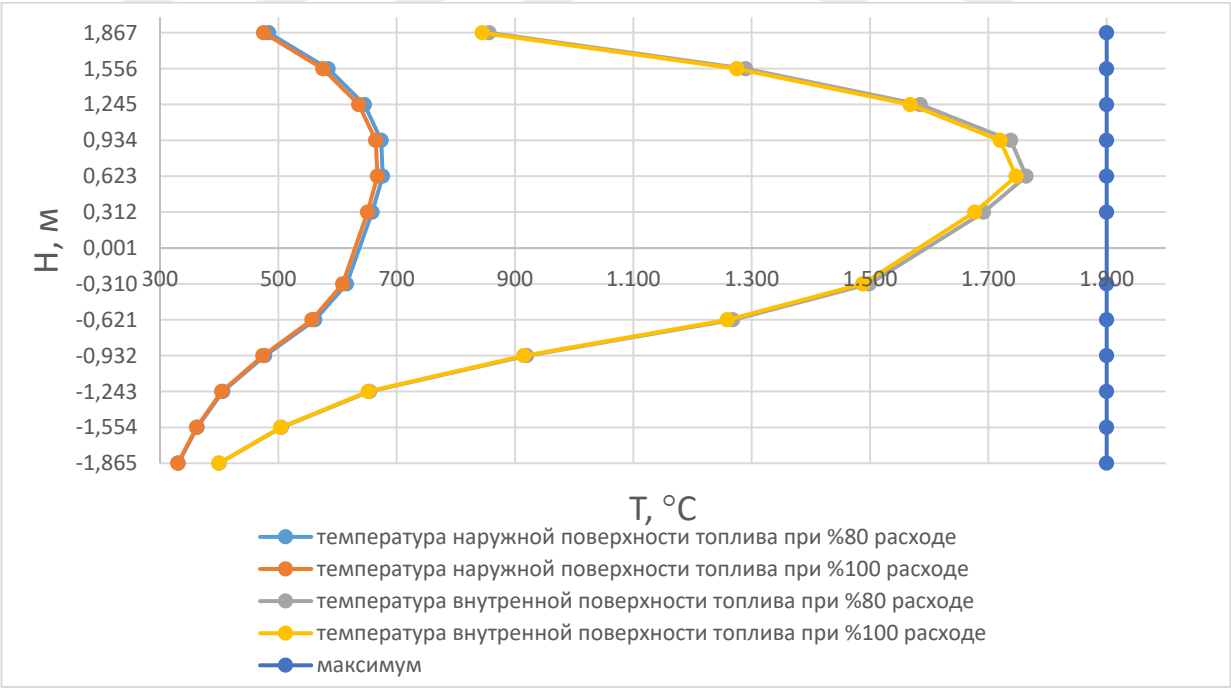
Источник: собственная разработка

Рисунок 30 – Температуры наружной и внутренней поверхности топлива при пониженном расходе теплоносителя по высоте ТВС-12



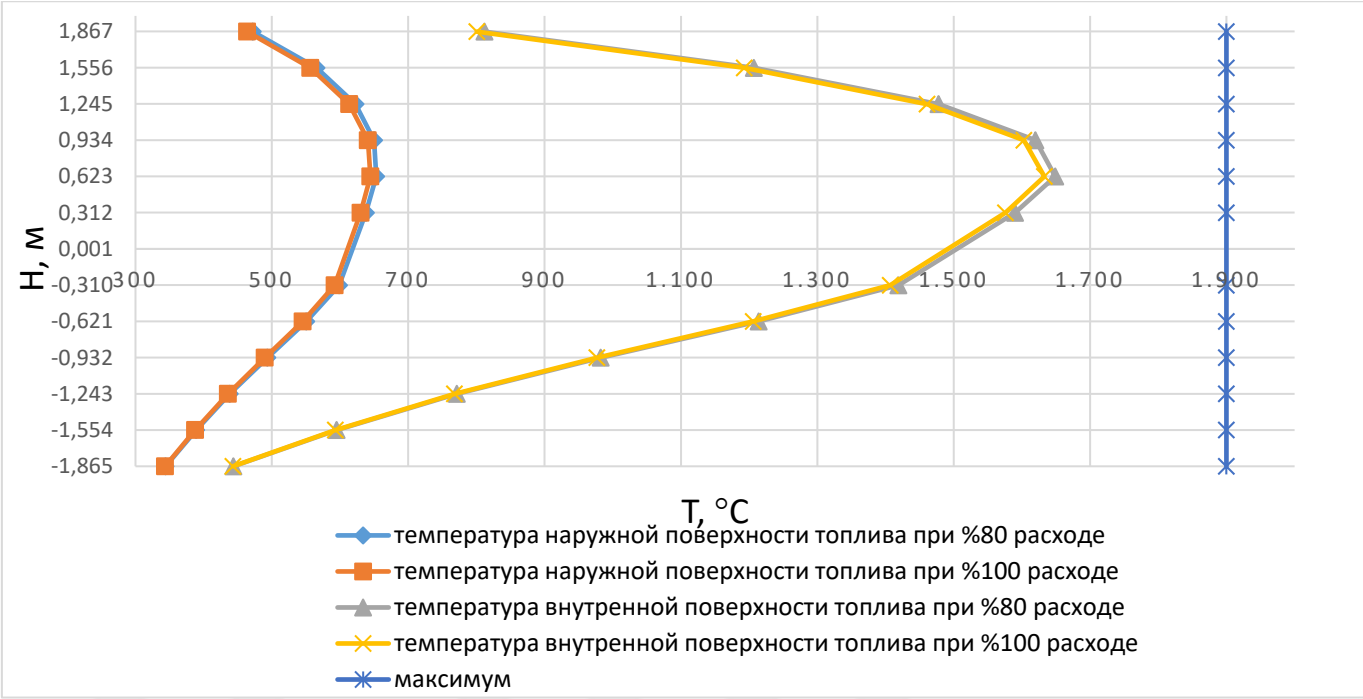
Источник: собственная разработка

Рисунок 31 – Температуры наружной и внутренней поверхности топлива при пониженном расходе теплоносителя по высоте ТВС-17



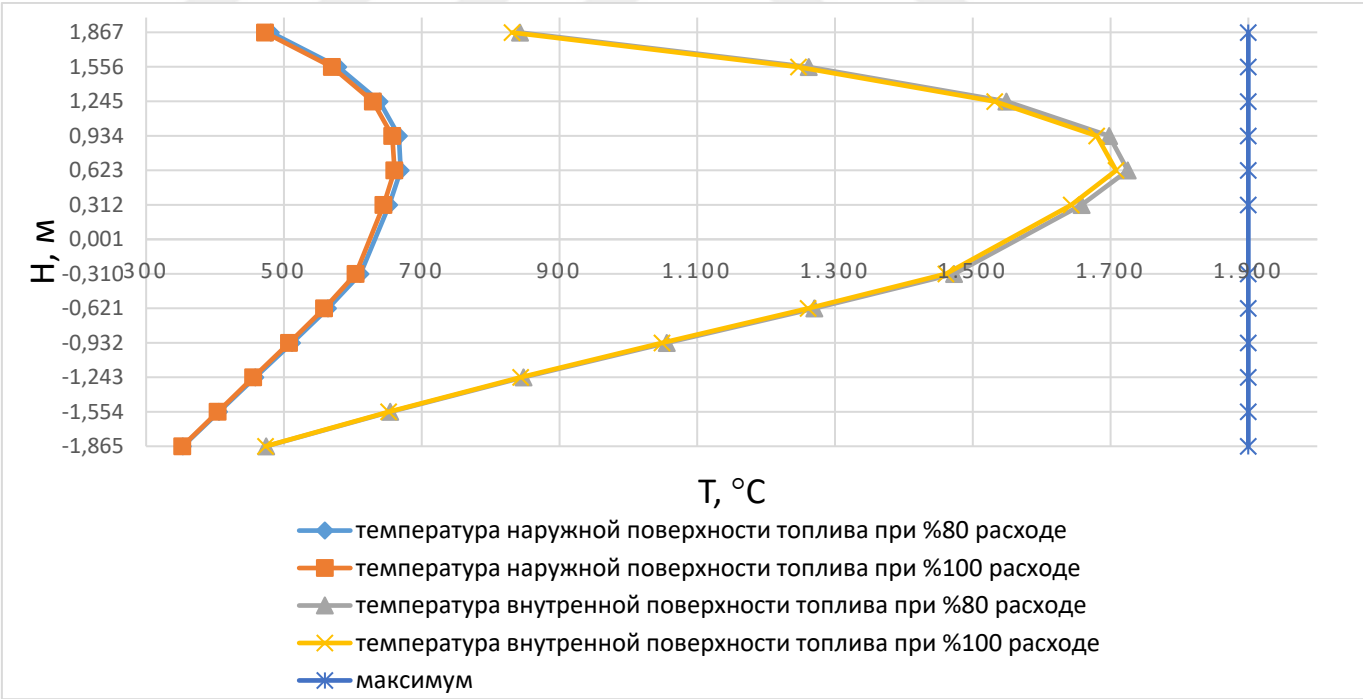
Источник: собственная разработка

Рисунок 32 – Температуры наружной и внутренней поверхности топлива при пониженном расходе теплоносителя по высоте ТВС-21



Источник: собственная разработка

Рисунок 33 – Температуры наружной и внутренней поверхности топлива при пониженном расходе теплоносителя по высоте ТВС-24



Источник: собственная разработка

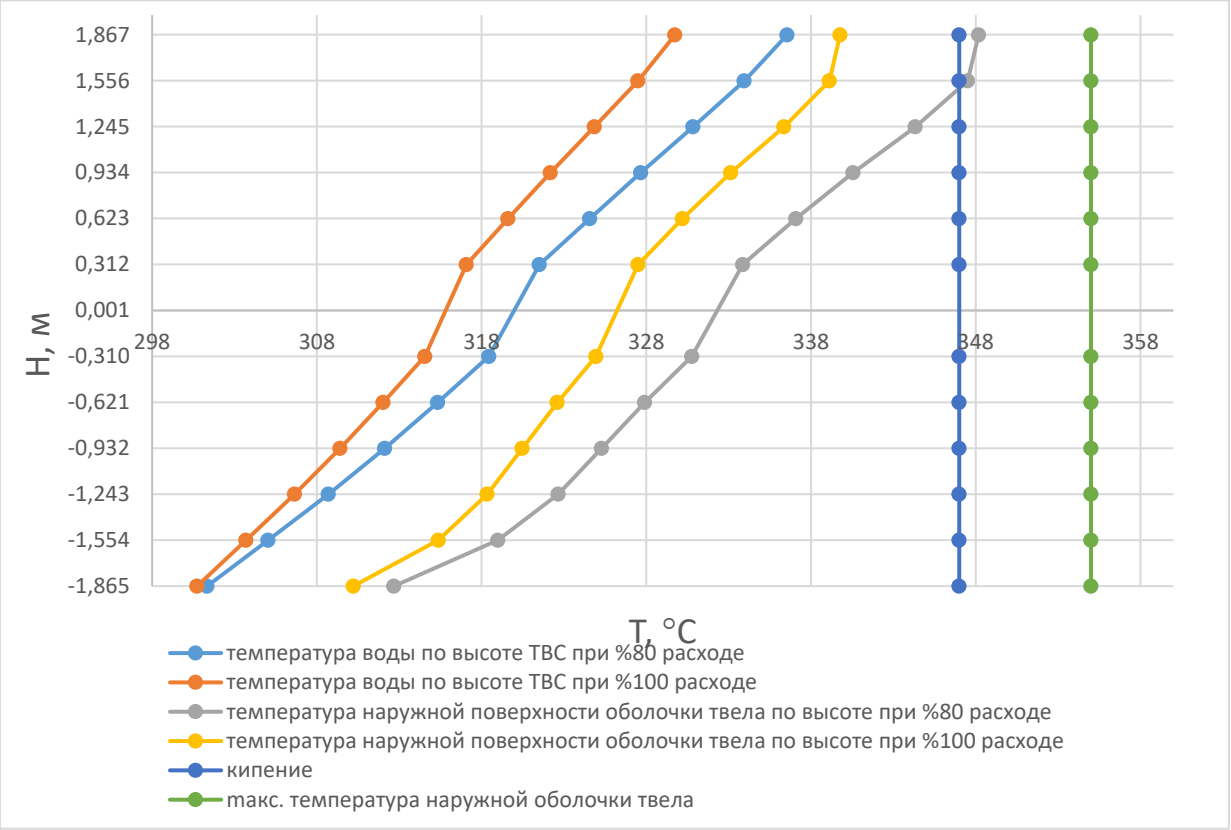
Рисунок 34 – Температуры наружной и внутренней поверхности топлива при пониженном расходе теплоносителя по высоте ТВС-26

2.1 Расчет температуры при пониженных расходах через ТВС на конец кампании

Расчеты параметров при снижении расхода теплоносителя в конце кампании проведены для ТВС 12,17,21,24,26 (рис.3).

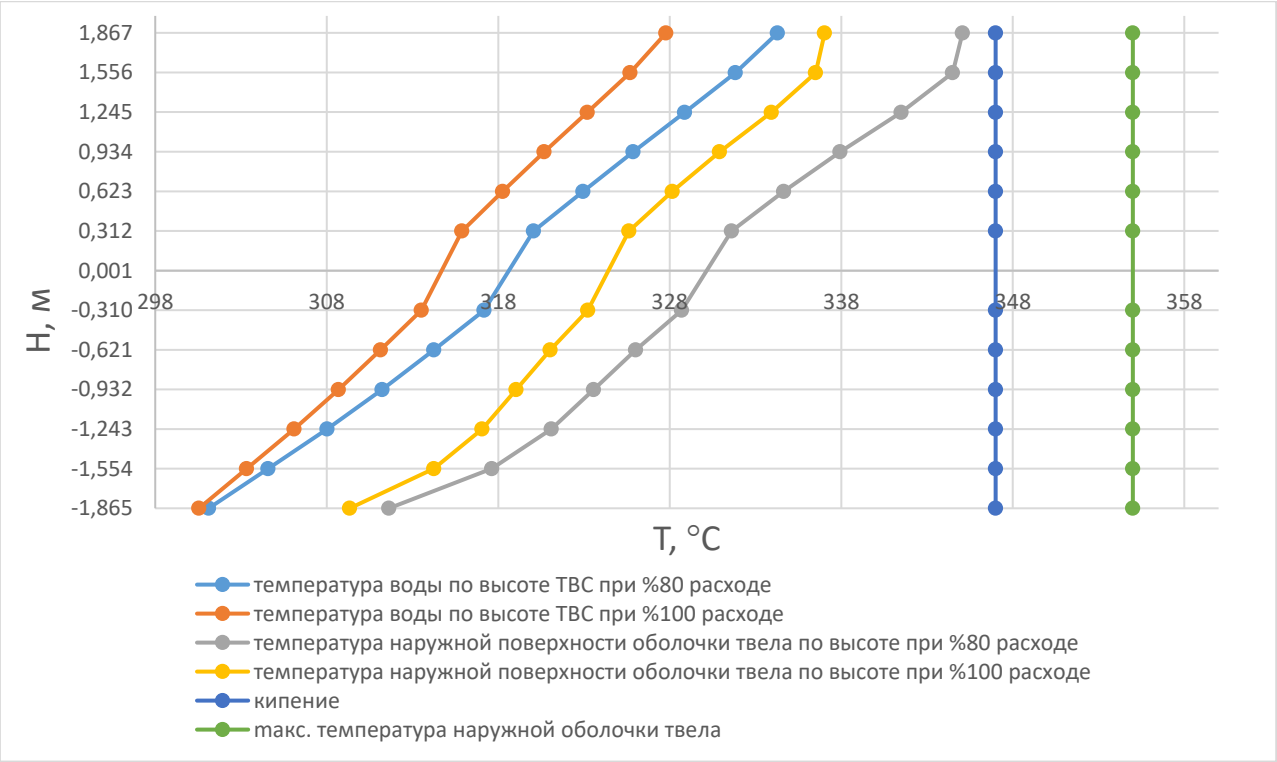
Распределение температуры воды и температуры наружной оболочки твэлов в конце кампании по высоте ТВС представлено на рис.35-39.

Температуры воды и оболочки твэлов при 100% и 80% расходе.



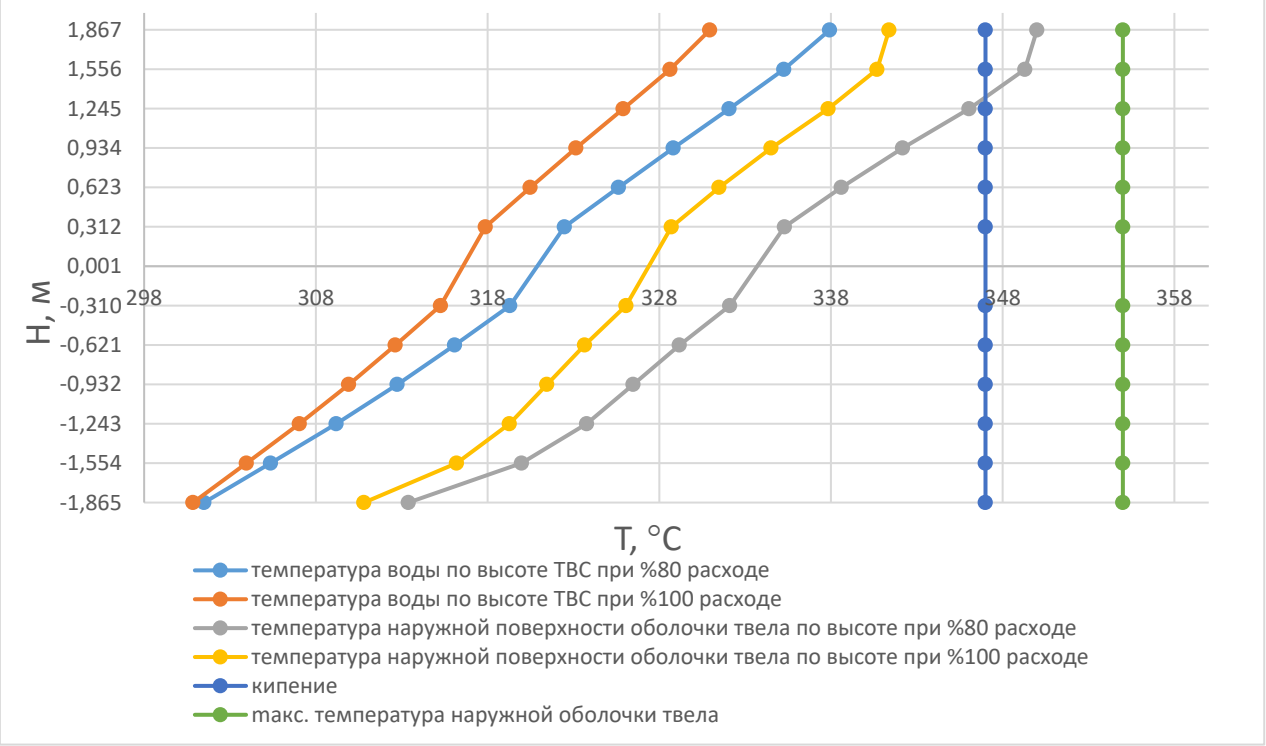
Источник: собственная разработка

Рисунок 35 – Температура воды и температура наружной оболочки твэлов по высоте ТВС-12 при снижении расхода теплоносителя на 20% (конец кампании)



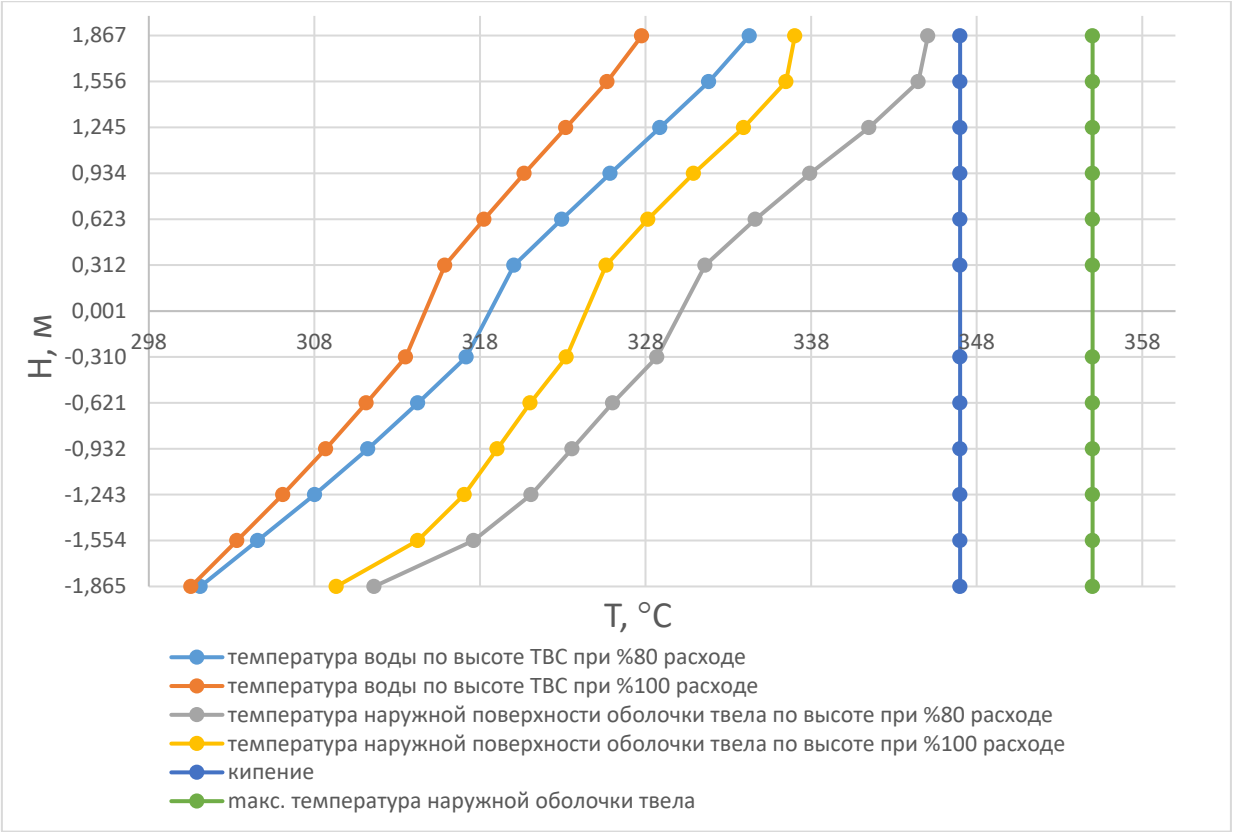
Источник: собственная разработка

Рисунок 36 – Температура воды и температура наружной оболочки твэлов по высоте ТВС-17 (конец кампании)



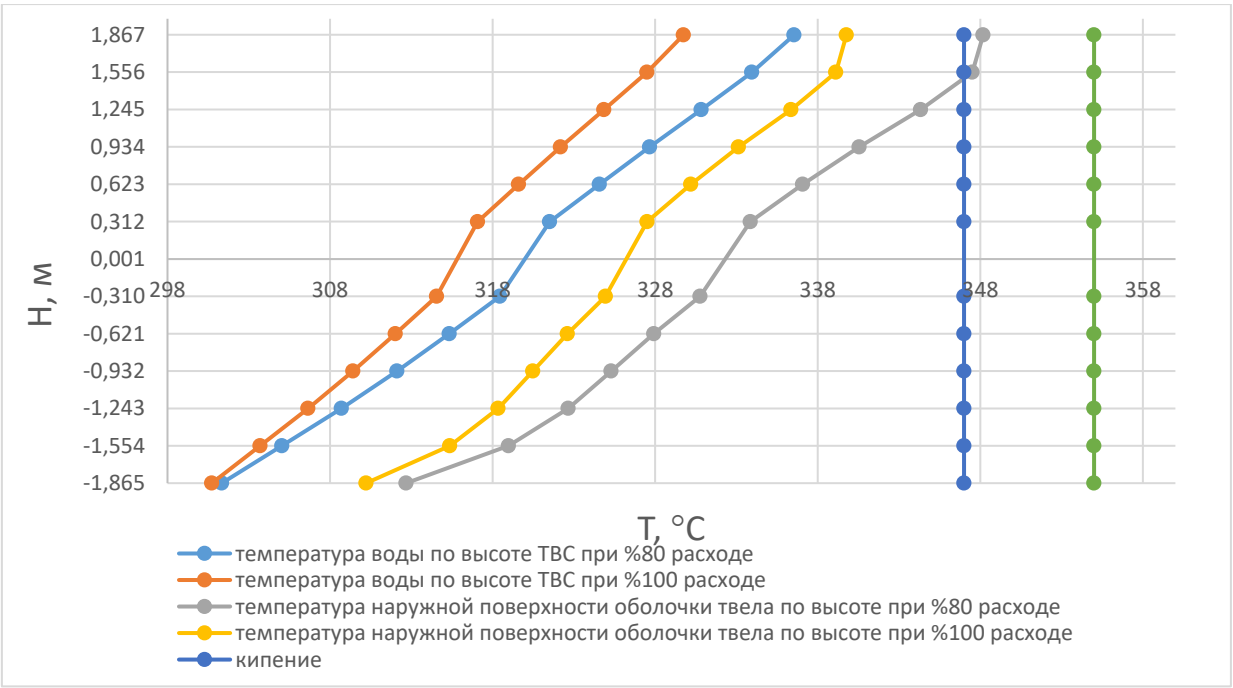
Источник: собственная разработка

Рисунок 37 – Температура воды и температура наружной оболочки твэлов по высоте ТВС-21 (конец кампании)



Источник: собственная разработка

Рисунок 38 – Температура воды и температура наружной оболочки твэлов по высоте ТВС-24 (конец кампании)



Источник: собственная разработка

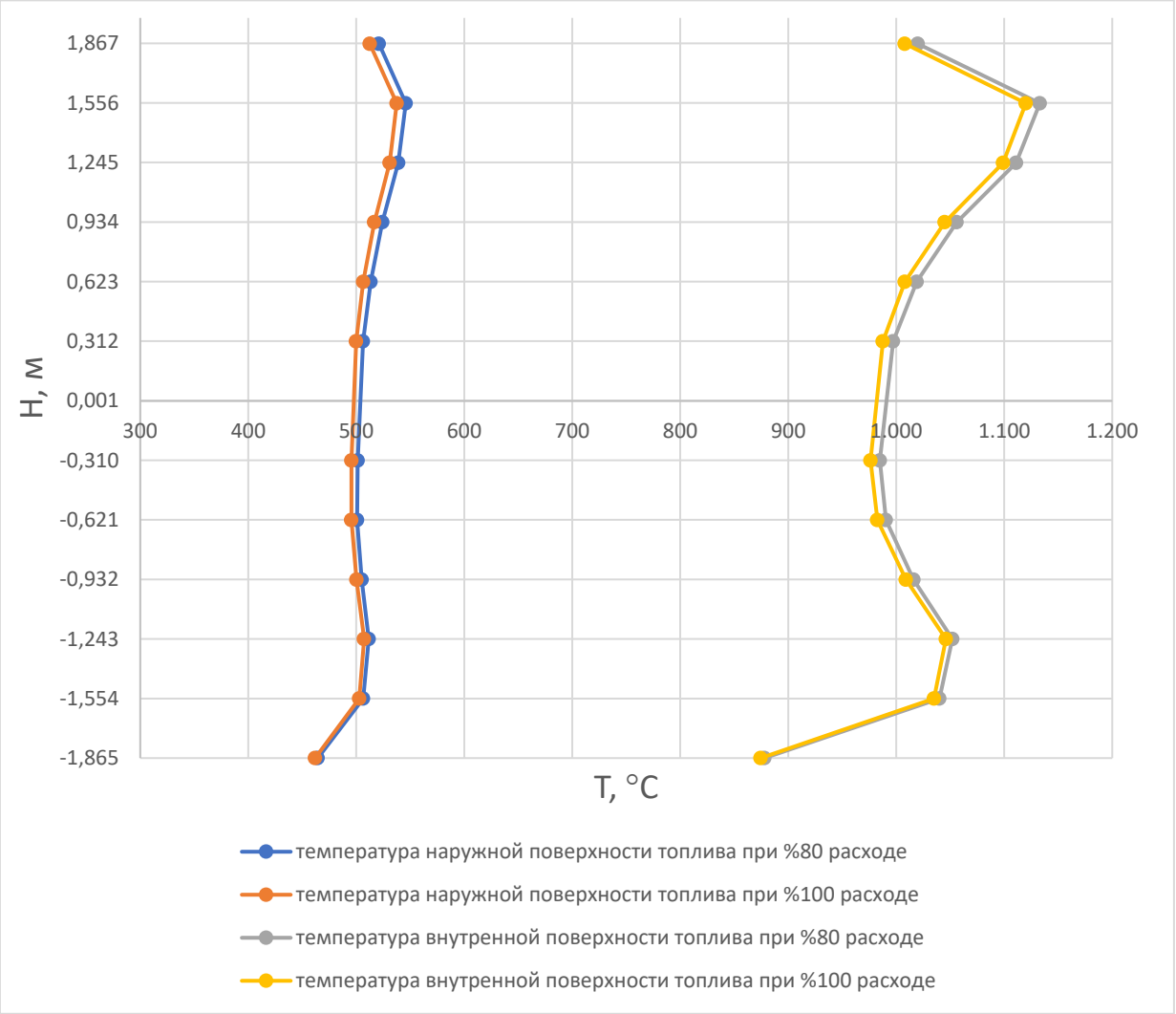
Рисунок 39 – Температура воды и температура наружной оболочки твэлов по высоте ТВС-26 (конец кампании)

Расчеты параметров при снижении расхода теплоносителя проведены для ТВС 12,17,21,24,26 (рис.3).

Распределение температуры воды и температуры наружной оболочки твэлов по высоте ТВС представлено на рис.40-44.

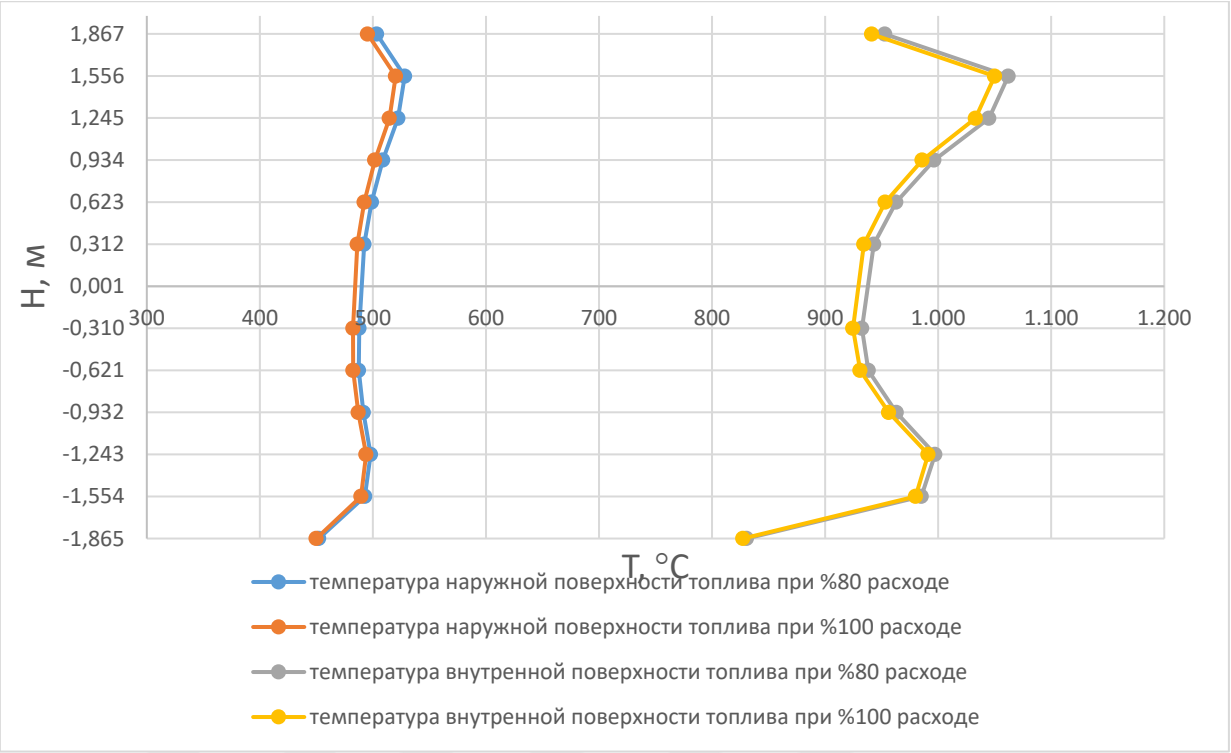
Температуры воды и оболочки твэлов при 100% и 80% расходе.

Изменение температуры для ТВС 12,17,21,24,26



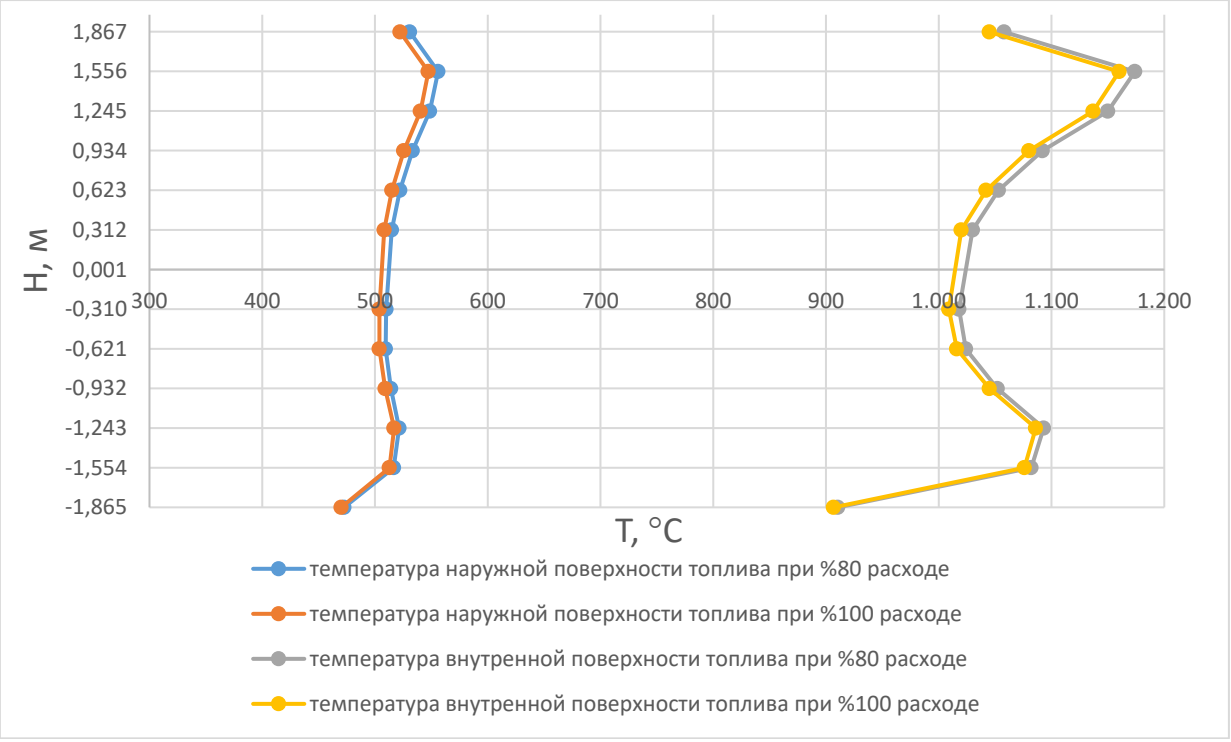
Источник: собственная разработка

Рисунок 40 – Температуры наружной и внутренней поверхности топлива при пониженном расходе теплоносителя по высоте ТВС-12 (конец кампании)



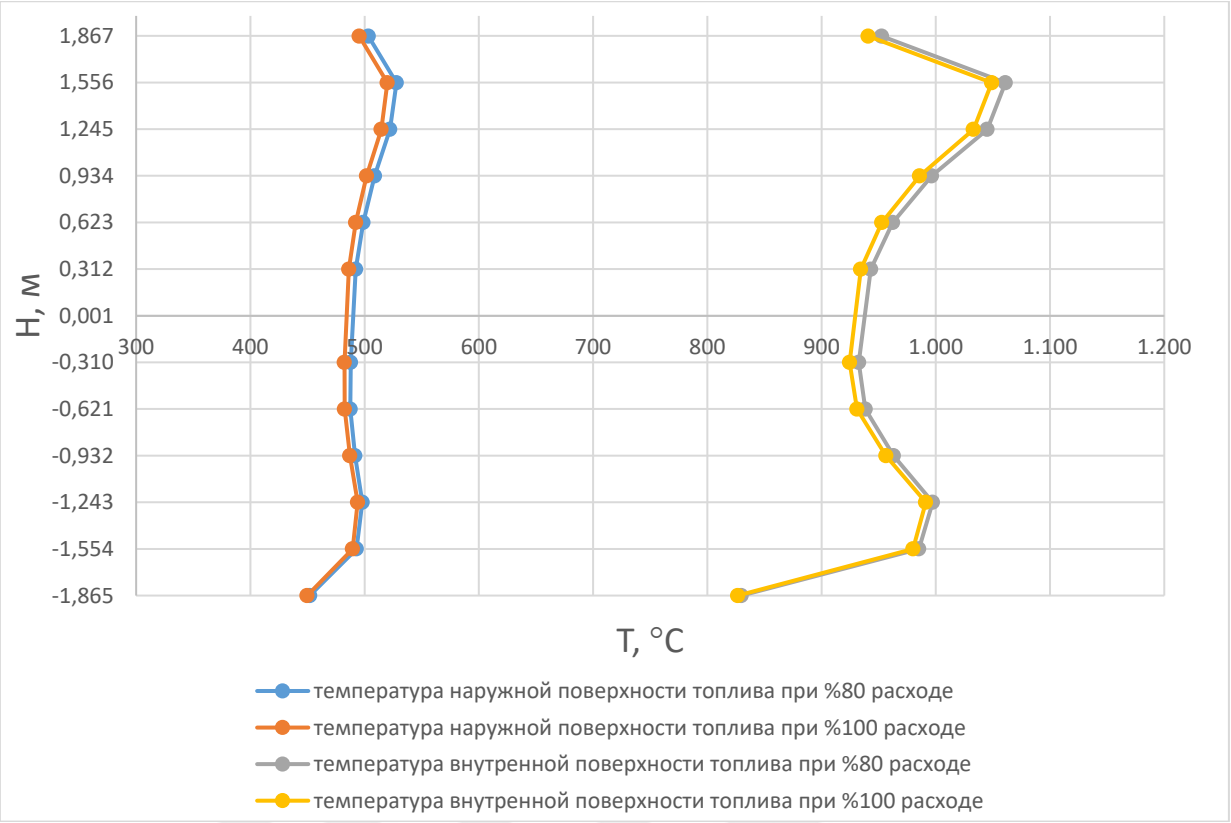
Источник: собственная разработка

Рисунок 41 – Температуры наружной и внутренней поверхности топлива при пониженном расходе теплоносителя по высоте ТВС-17 (конец кампании)



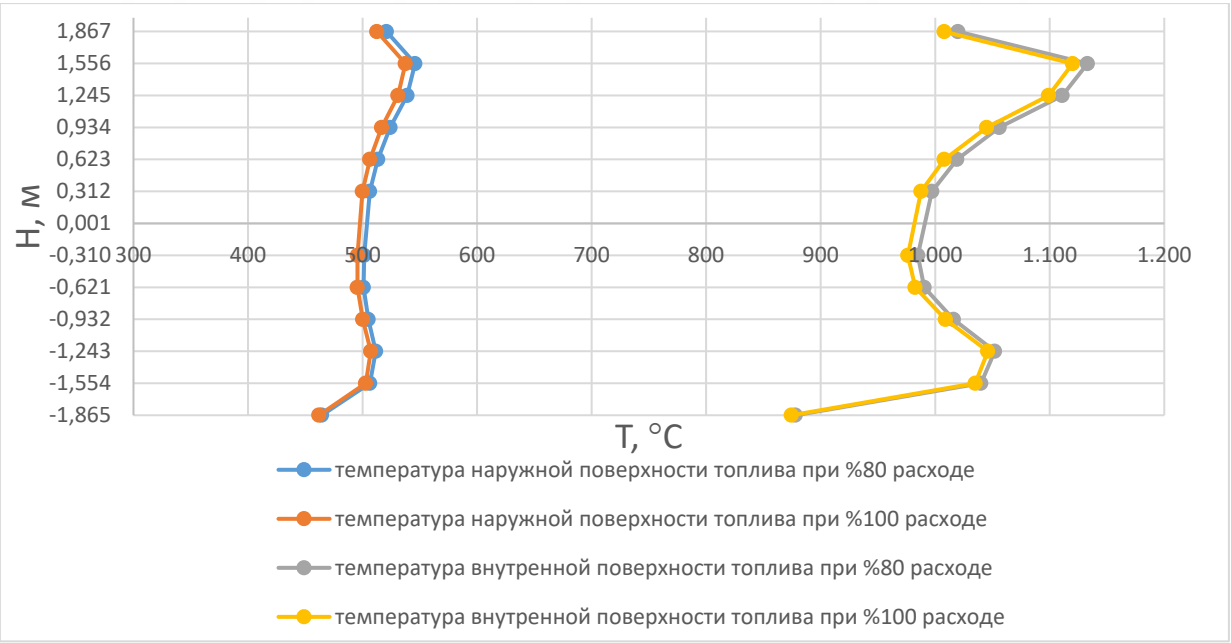
Источник: собственная разработка

Рисунок 42 – Температуры наружной и внутренней поверхности топлива при пониженном расходе теплоносителя по высоте ТВС-21 (конец кампании)



Источник: собственная разработка

Рисунок 43 – Температуры наружной и внутренней поверхности топлива при пониженном расходе теплоносителя по высоте ТВС-24 (конец кампании)



Источник: собственная разработка

Рисунок 44 – Температуры наружной и внутренней поверхности топлива при пониженном расходе теплоносителя по высоте ТВС-26 (конец кампании)

2.2 Сравнение максимальных температур по высоте ТВС

Для Сравнения максимальных температур по высоте ТВС-12, ТВС-17, ТВС-21, ТВС-24, ТВС-26 на начало и конце кампании при пониженном и номинальном расходе, представлены на таблице 3-7.

Таблица 3. Сравнение максимальных температур по высоте ТВС-12 на начало и конце кампании при пониженном и номинальном расходе (номера ТВС соответствуют рис. 3)

	На начало кампании		**На конце кампании**	
Расход теплоносителя	%100 (107,9 кг/с)	%80 (86 кг/с)	%100	%80
Температура теплоносителя (°C)	335	342	329	336
Температура наружной повехности оболочки твэла (°C)	347	356 (превышает)	339	348
Температура внутренней повехности оболочки твэла (°C)	378	387	359	368
Температура наружной повехности топлива (°C)	660	669	537	545
Температура внутренней повехности топлива (°C)	1708	1725	1008	1020

Источник: собственная разработка

Таблица 4. Сравнение максимальных температур по высоте ТВС-17 на начало и конце кампании при пониженном и номинальном расходе (номера ТВС соответствуют рис. 3)

	На начало кампании		На конце кампании	
Расход теплоносителя	%100 (107,9 кг/с)	%80 (86 кг/с)	%100	%80
Температура теплоносителя (°C)	333	341	324	334
Температура наружной повехности оболочки твэла (°C)	341	349	337	345
Температура внутренней повехности оболочки твэла (°C)	374	383	355	363
Температура наружной повехности топлива (°C)	644	653	495	503
Температура внутренней повехности топлива (°C)	1633	1649	941	953

Источник: собственная разработка

Таблица 5. Сравнение максимальных температур по высоте ТВС-21 на начало и конце кампании при пониженном и номинальном расходе (номера ТВС соответствуют рис. 3)

	На начало кампании		На конце кампании	
Расход теплоносителя	%100 (107,9 кг/с)	%80 (86 кг/с)	%100	%80
Температура теплоносителя *(°C)*	333	341	330	337
Температура наружной повехности оболочки твэла *(°C)*	346	355,7	341	349
Температура внутренней повехности оболочки твэла *(°C)*	377	387	362	370
Температура наружной повехности топлива *(°C)*	667	676	547	555
Температура внутренней повехности топлива *(°C)*	1747	1764	1160	1170

Источник: собственная разработка

Таблица 6. Сравнение максимальных температур по высоте ТВС-24 на начало и конце кампании при пониженном и номинальном расходе (номера ТВС соответствуют рис. 3)

	На начало кампании		На конце кампании	
Расход теплоносителя	%100 (107,9 кг/с)	%80 (86 кг/с)	%100	%80
Температура теплоносителя *(°C)*	333	340	327	334
Температура наружной повехности оболочки твэла *(°C)*	340	348	337	345
Температура внутренней повехности оболочки твэла *(°C)*	374	383	355	363
Температура наружной повехности топлива *(°C)*	644	653	519	527
Температура внутренней повехности топлива *(°C)*	1633	1649	1050	1060

Источник: собственная разработка

Таблица 7. Сравнение максимальных температур по высоте ТВС-26 на начало и конце кампании при пониженном и номинальном расходе (номера ТВС соответствуют рис. 3)

	На начало кампании		На конце кампании	
Расход теплоносителя	%100 (107,9 кг/с)	%80 (86 кг/с)	%100	%80
Температура теплоносителя *(°C)*	334	342	329	326
Температура наружной повехности оболочки твэла *(°C)*	346	356 (превышает)	339	348
Температура внутренней повехности оболочки твэла *(°C)*	373	387	359	368
Температура наружной повехности топлива *(°C)*	660	669	537	545
Температура внутренней повехности топлива *(°C)*	1708	1725	1120	1130

Источник: собственная разработка

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведен поверочный теплогидравлический расчет активной зоны реактора ВВЭР-1200 с начальной загрузкой для начала и конца кампании.

Расчетная модель реализована в программном комплексе MathCAD. Модель учитывает изменение энерговыделения по высоте ТВС, неравномерное распределение расходов по ТВС, зависимость теплопроводности топлива от температуры. Исходные данные по распределениям энерговыделения получены с помощью моделирования работы реактора ВВЭР-1200 в виртуальной лаборатории.

В расчете рассматривался как режим с номинальным расходом теплоносителя через ТВС, так и режим с уменьшенным расходом теплоносителя. Результаты расчета показали, что уменьшение расхода теплоносителя на 20% не приводит к кипению воды. Однако для некоторых ТВС температура наружной поверхности оболочек твэл превышает значение 355^0C.

При этом температура топливного сердечника не превышает максимальную температуру внутренней и наружной поверхности топлива достигает соответственно 1940 ℃ и 900 °C, что температуры плавления (2860 ± 20 ℃).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственный научный центр РФ - Физико-энергетическим институтом имени А.И. Лейпунского (ГНЦ РФ - ФЭИ)., «Первая в мире атомная электростанция: Документы, статьи, воспоминания, фотографии» - 20 декабря 2019 г.
2. Учебная лаборатория «Реакторная физика, конструкция, управление и безопасная эксплуатация ЯЭУ» Том 4. Книга 1. Описание лабораторного практикума. Методические указания к выполнению лабораторных работ. 4-е изд. Кафедра Автоматики НИЯУ МИФИ. – М.: НИЯУ МИФИ, 2012.
3. Кузина Ю.А. Лекции по курсу «Теплогидравлический расчет ядерных реакторов». – Обнинск: ИАТЭ, 2018.
4. Кузеванов В.С., Баклушин Р.П. Тепловой и гидравлический расчет активных зон реакторов./Учебное пособие по курсу «Теплогидравлический расчет реакторов». – Обнинск, ИАТЭ, 1988.
5. Кириллов П.Л., Терентьева М.И., Денискина Н.Б. Теплофизические свойства материалов ядерной техники – М.: ИздАТ, 2007. 41с

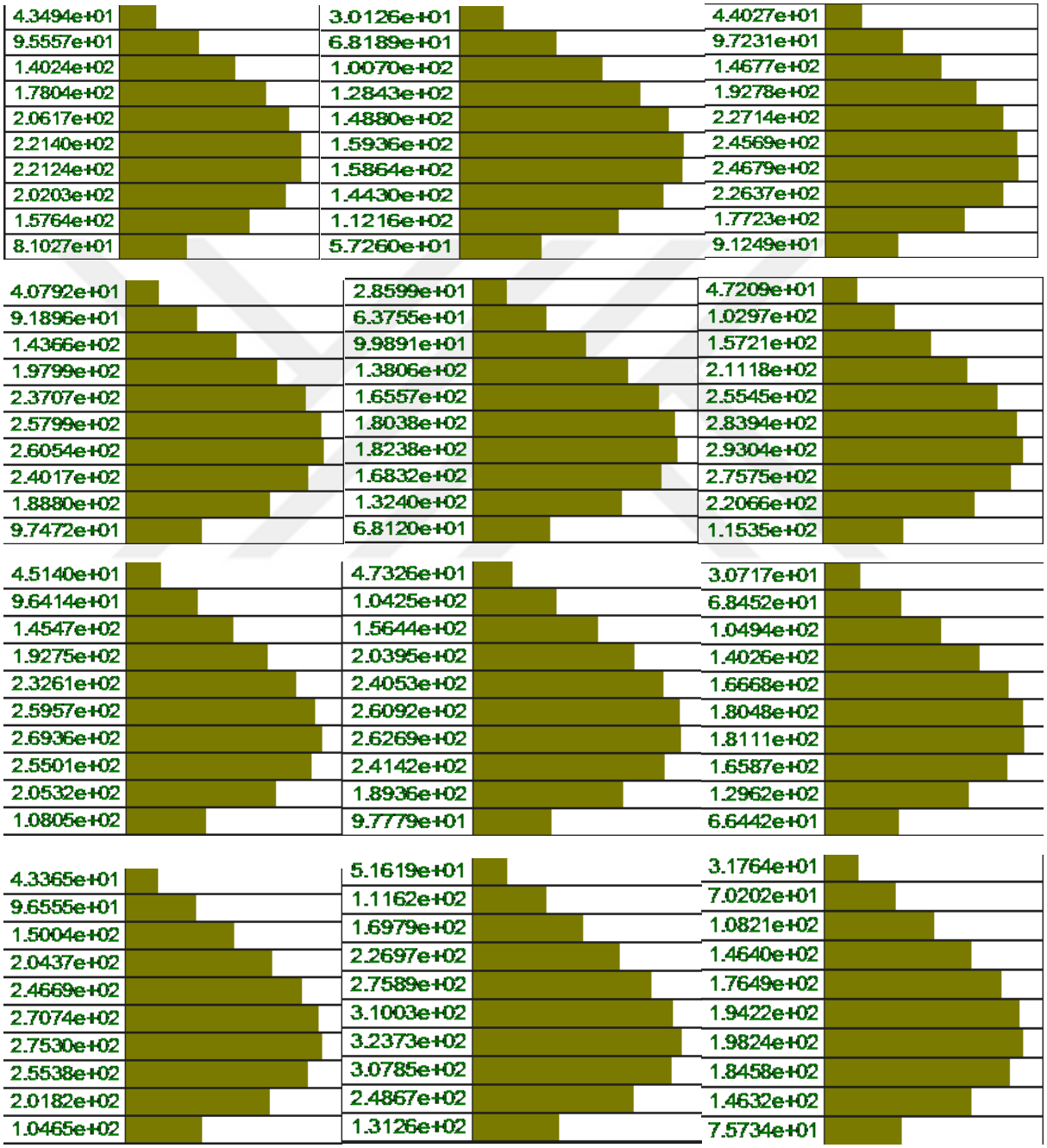
Электронные ресурсы

6. https://ru.wikipedia.org/wiki/Атомная_энергетика_России
7. http://dvoika.net/vvr/
8. https://ppt-online.org/418652

ПРИЛОЖЕНИЕ

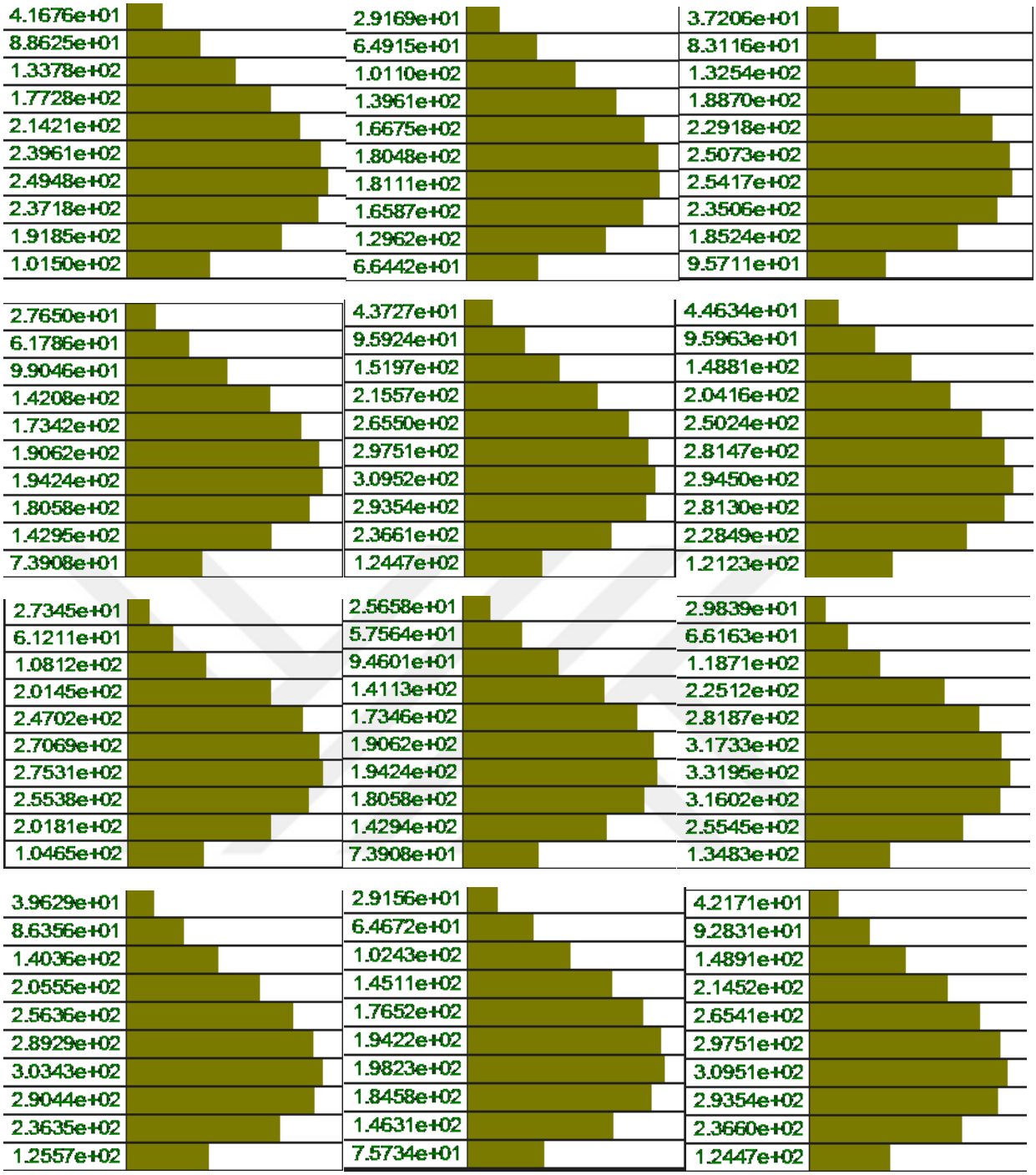
Приложение 1. Исходные данные по распределениям энерговыделения

Ниже приведены расчетные распределения линейного энерговыделения по высоте ТВС для сектора симметрии, предстевлены на рис. 1.1-1.6



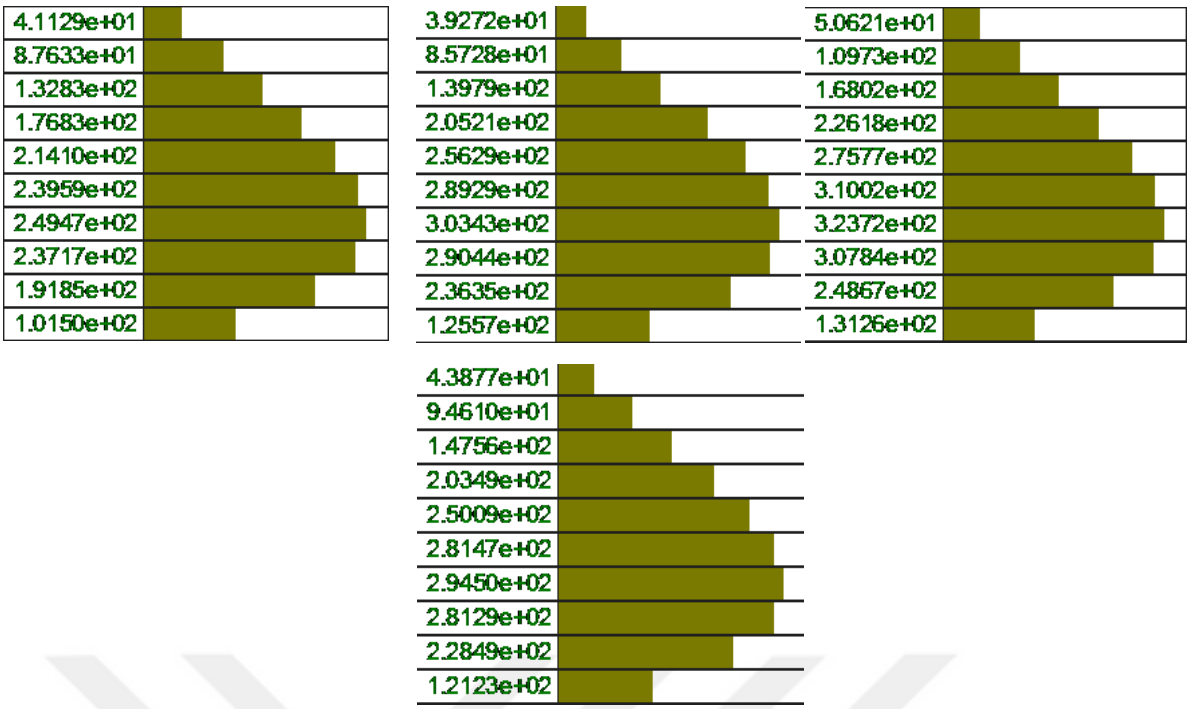
Источник: [2].

Рис. 1.1 – Линейное энерговыделение в начале кампании. Кассеты 1- 12, соответственно



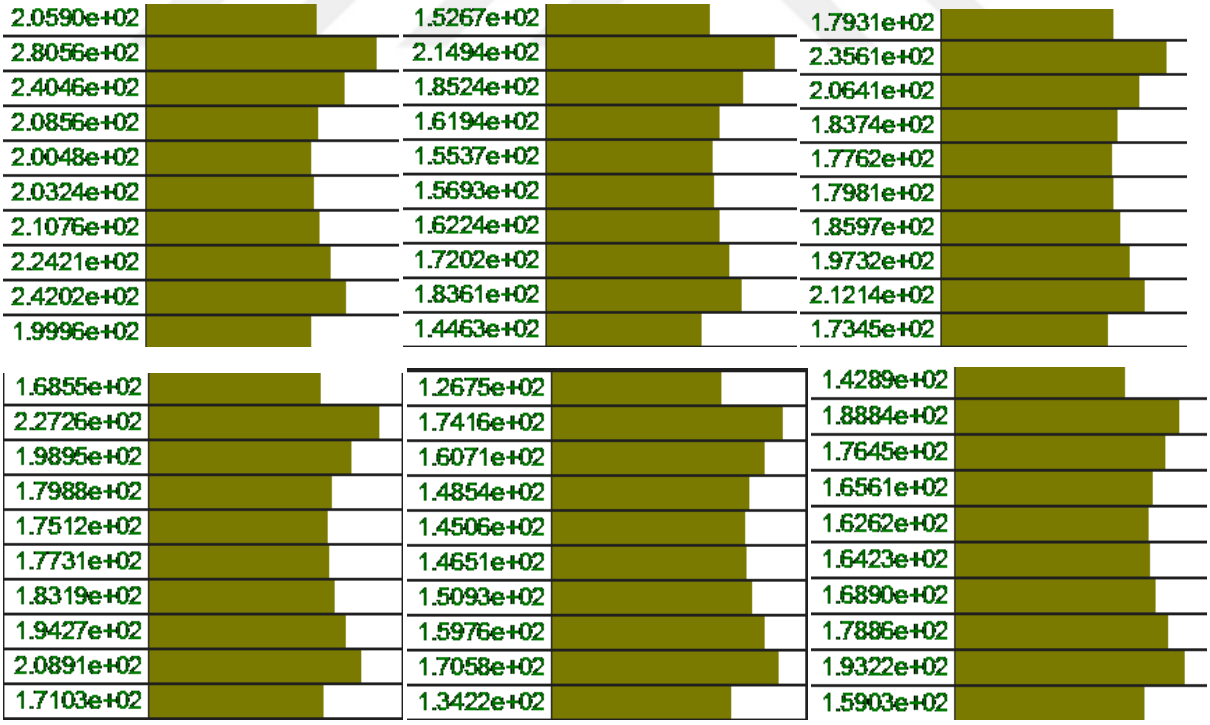
Источник: [2].

Рис. 1.2 – Линейное энерговыделение в начале кампании. Кассеты 13- 24, соответственно



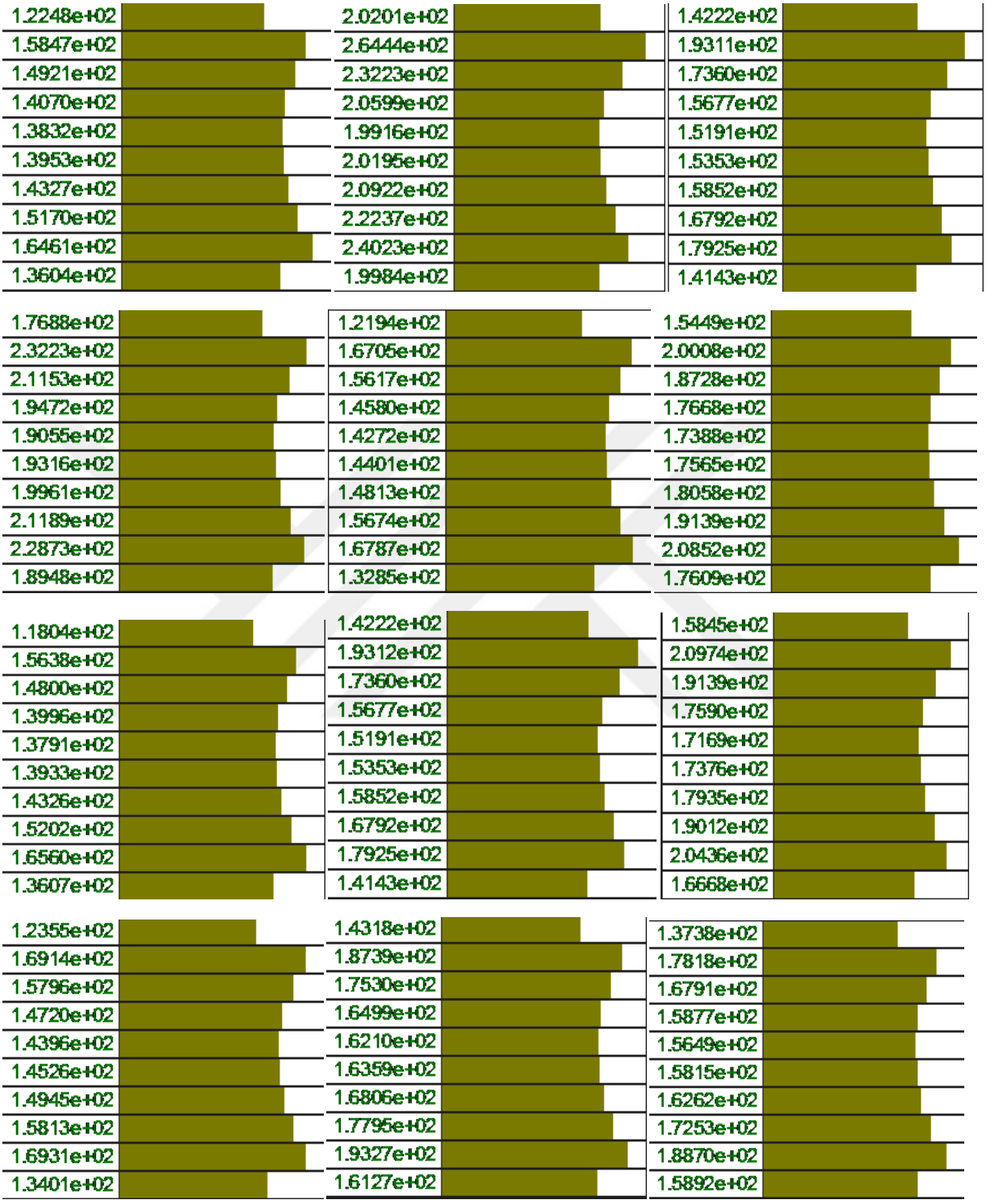
Источник: [2].

Рис. 1.3 – Линейное энерговыделение в начале кампании. Кассеты 25- 28, соответственно



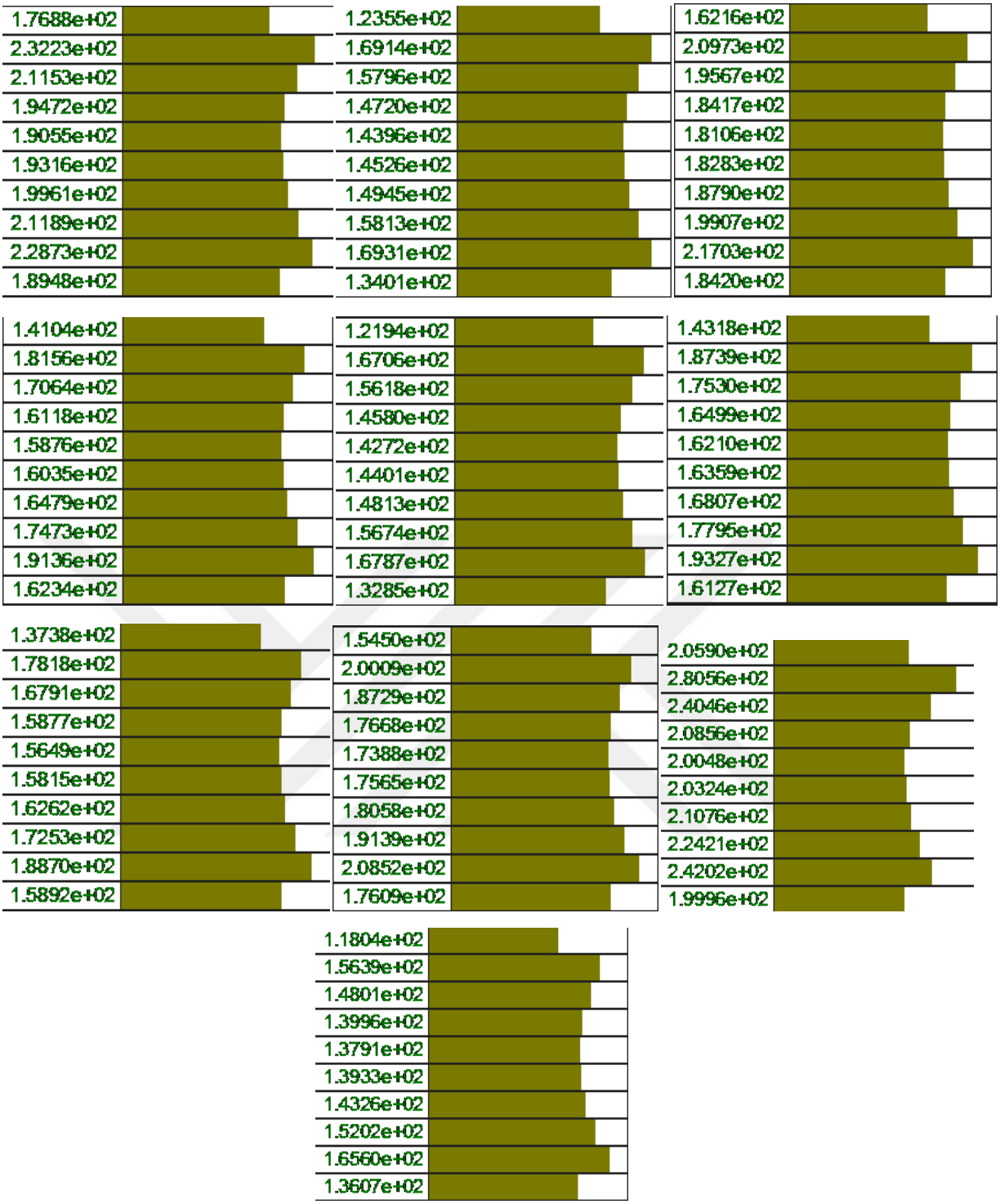
Источник: [2].

Рис. 1.4 – Линейное энерговыделение в конце кампании. Кассеты 1-6, соответственно



Источник: [2].

Рис. 1.5 – Линейное энерговыделение в конце кампании. Кассеты 7-18, соответственно



Источник: [2].

Рис. 1.6 – Линейное энерговыделение в конце кампании. Кассеты 19-28, соответственн