

ОБОСНОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПАНЕЛИ ПЕРВОЙ СТЕНКИ В ИНДУКТИВНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ ИТЭР

Томилов С.Н., Свириденко М.Н., Лешуков А.Ю., Стребков Ю.С.

(АО «НИКИЭТ», Москва, Россия),

Сафронов В.М. (ЧУ «Проектный Центр ИТЭР», Москва, Россия),

Герваш А.А., Окунева Е. В.(АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия)

Введение

Для обеспечения защиты внутрикамерных компонентов от радиационного и теплового воздействия плазмы на внутренней поверхности вакуумной камеры установлены 440 модулей blankets (МБ).

МБ является сборочной единицей, в состав которой входят панель первой стенки (ППС) и защитный блок (ЗБ), при этом ППС закреплена на ЗБ посредством системы механического крепления (СК). Наиболее энергонапряженным является ряд № 14, расположенный в экваториальном сечении, вследствие чего основные стандартные компоновочные решения разработаны для ППС 14 тип А совместно специалистами АО «НИКИЭТ» и АО «НИИЭФА».

Одновременно в состав 14-го ряда также входят ППС №14 тип NC, NE, NDL, AND, ADL, имеющие сложную геометрическую конфигурацию. Специалистами АО «НИКИЭТ» на базе ППС №14 тип А разработана конструкция ППС №14 тип NC, которая располагается в зоне размещения портов инжекторов нейтральных частиц, что обуславливает существенные отличия по геометрической форме и габаритам от стандартной ППС, что требует адаптации стандартных технических решений с целью обеспечения требуемого уровня температур и обеспечения технологичности конструкции. Специалистами АО «НИКИЭТ» проведено расчетное обоснование разработанной конструкции, включающее тепловой и гидравлический расчет ППС.

Данная работа содержит описание разработанной конструкции ППС №14 тип NC, а также результаты проведенных теплового и гидравлического расчетов.

1. Описание конструкции

В рамках Соглашения о Поставке специалистами АО «НИКИЭТ» и АО «НИИЭФА» для квалификации процессов изготовления разработана конструкция полномасштабного квалификационного макета ППС (рис. 1). ППС представляет собой сборочную единицу в состав которой входят: несущая конструкция первой стенки (НКПС), энергонапряженные компоненты (пальцы ПС), система крепления ППС к ЗБ (СК), включающая центральный болт и восемь контактных электроизолирующих накладок (КЭИН), и система электрической связи (ЭС). Пальцы ПС закреплены на НКПС с помощью болтового соединения в периферической части и клинового соединения в центральной части ППС. Гидравлическое соединение осуществляется с помощью фрезерованных переходников [1].

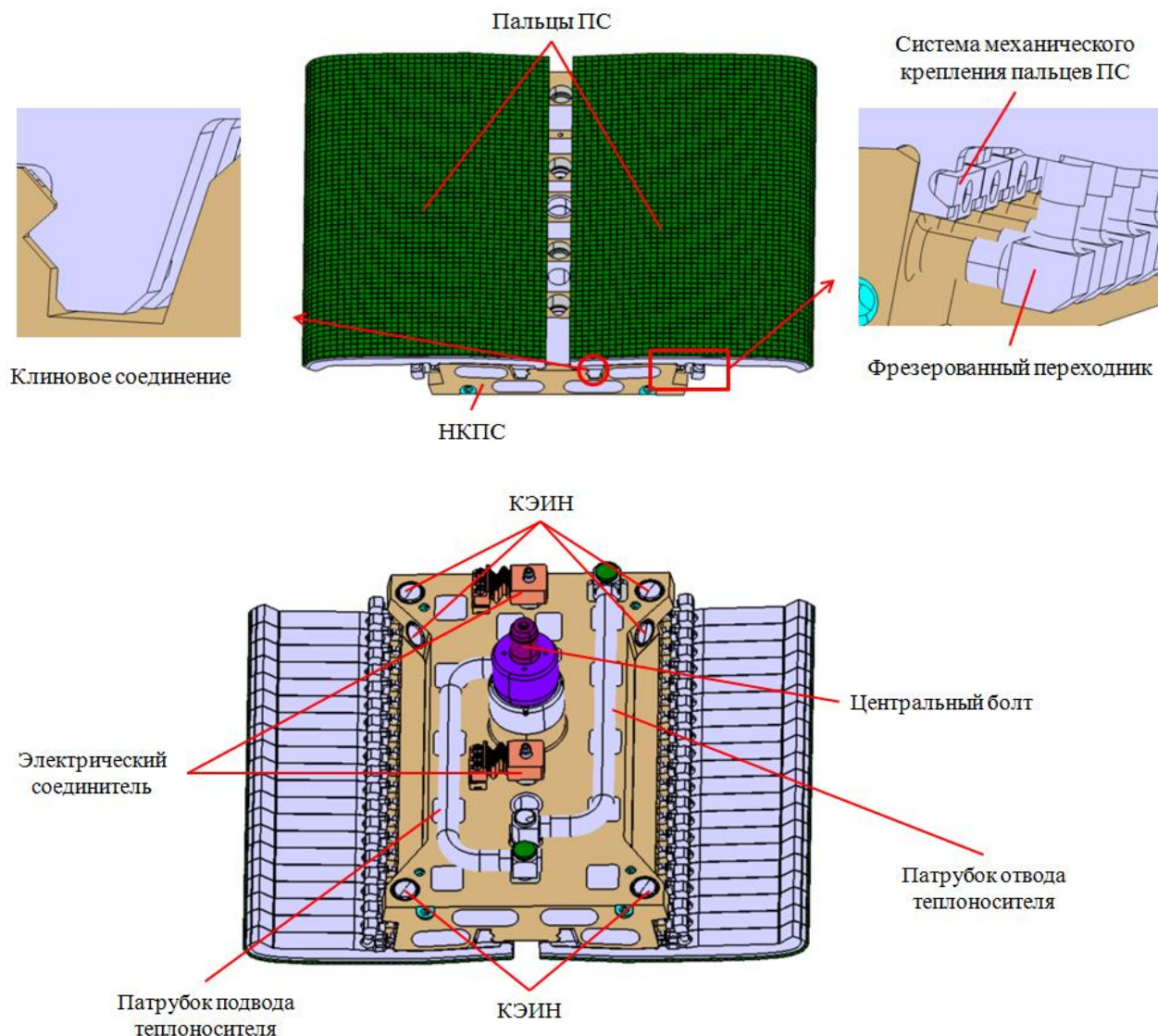


Рис. 1. Полномасштабный квалификационный макет ППС

На основе конструкторских решений квалификационного макета, специалистами АО «НИКИЭТ» разработана конструкция ППС №14 тип NC (рис. 2). Ввиду отличия формы (несимметричность) и габаритов (толщина нестандартной НКПС в центральной части составляет 99 мм против 102 мм у стандартной) ППС №14 тип NC от квалификационного макета, ее система охлаждения была изменена. Одним из ключевых отличий в системе охлаждения нестандартной ППС является расположение коллекторов пальцев ПС. В отличие от стандартной ППС, теплоноситель из пальцев ПС подается не напрямую в выходную магистраль, а через сборные выходные коллекторы. При этом входные и выходные коллекторы размещаются на фронтальной, а не задней, части НКПС (см. рис. 2). Также на основе проведенных ранее работ по адаптации конструкторских решений макета к нестандартной ППС №14 тип NE [2], в конструкцию системы охлаждения НКПС были добавлены каналы охлаждения в зоне расположения пазов КЭИН с целью снижения уровня температур угловых зон НКПС.

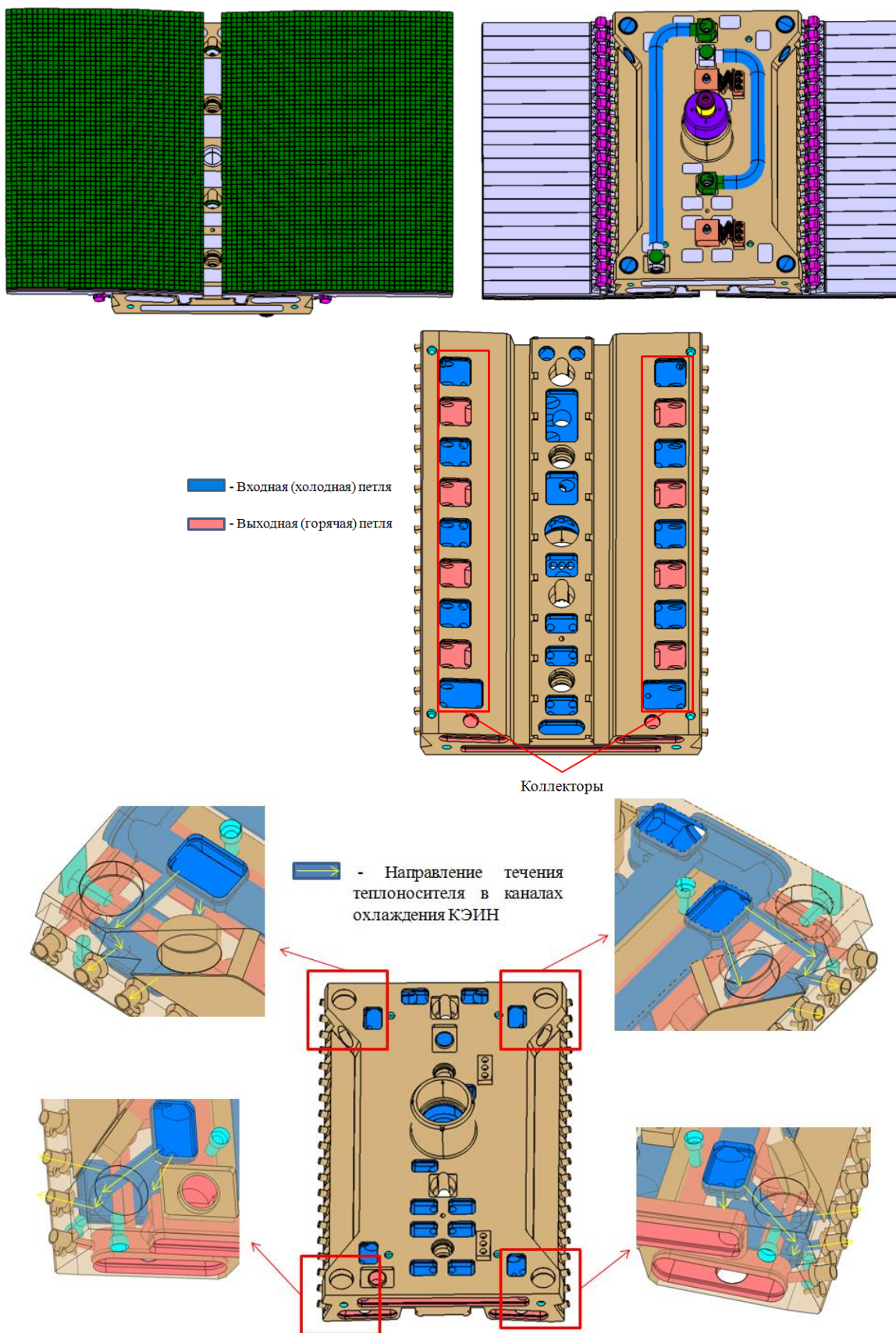


Рис. 2. ППС №14 mun NC

2. Гидравлический расчет

Расчет тракта охлаждения ППС проведен в два этапа: расчет трактов охлаждения пальцев ПС и расчет тракта охлаждения ППС.

Поскольку в состав ППС №14 тип NC входят два типоразмера пальцев ПС – короткий и длинный (см рис. 3), то оценка гидравлических параметров выполнена для трактов охлаждения каждого типоразмера.

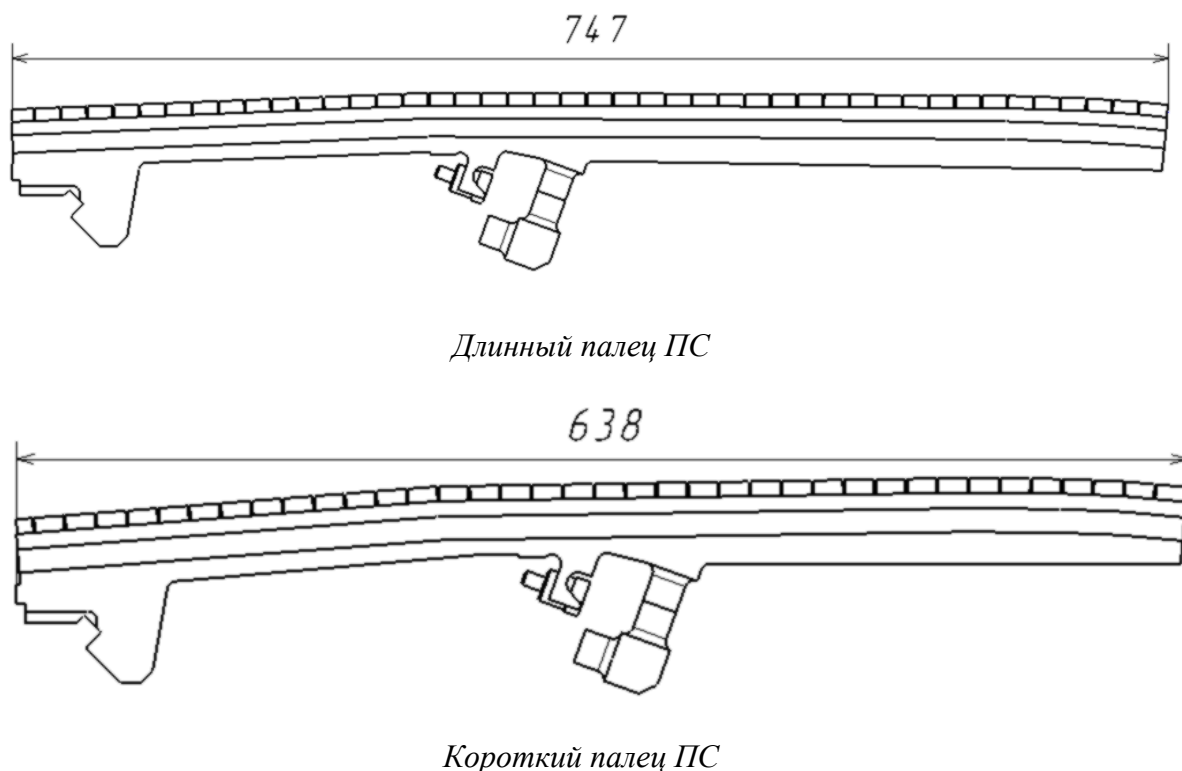


Рис. 3. пальцы ПС

При расчете пар пальцев ПС использовались следующие граничные условия (ГУ) и допущения [3]:

- номинальный расход теплоносителя – 0,4563 кг/с;
- давление теплоносителя – 4 МПа;
- температура теплоносителя на входе в пару пальцев – 70 °С;
- шероховатость стенки тракта охлаждения – Ra 6,3.

Для гидравлического расчета в ПК ANSYS CFX разработаны конечно-элементные модели тракта охлаждения пальцев ПС. Общий вид расчетной модели представлен на рис. 4.

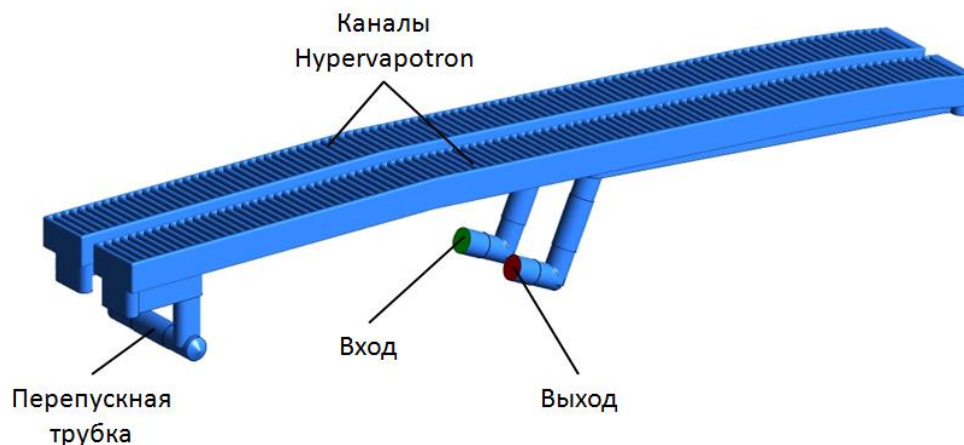


Рис. 4. Расчетная модель тракта теплоносителя пары пальцев ПС

На рисунке 5 представлено распределение скоростей в тракте охлаждения пальцев ПС, полученное при гидравлическом расчете.

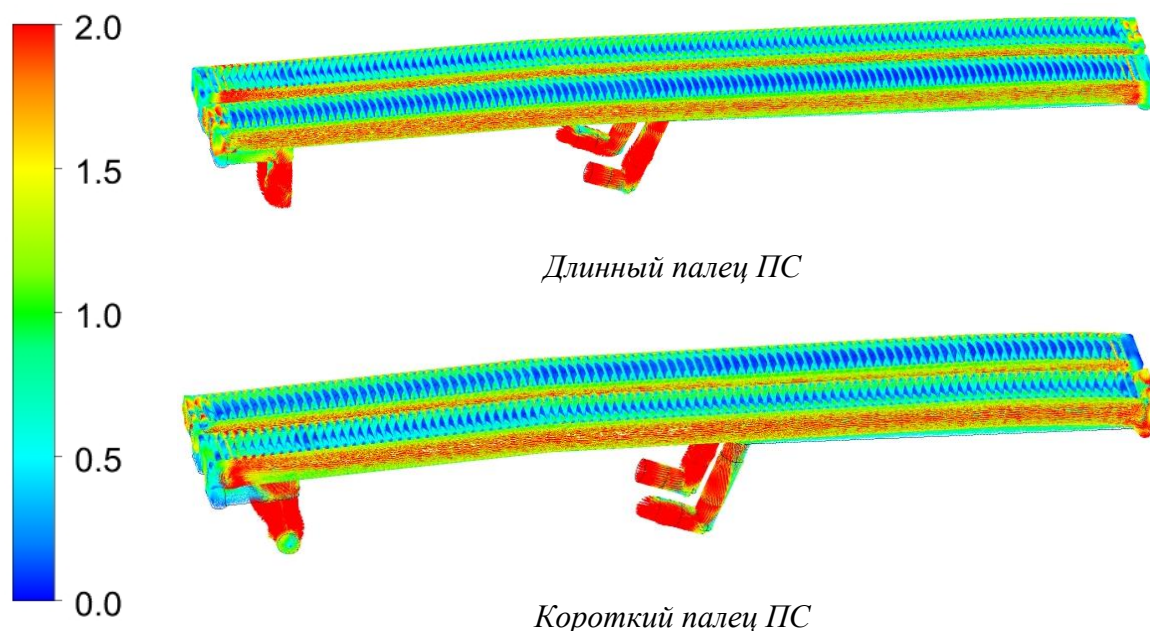


Рис. 5. Распределение скоростей течения теплоносителя в тракте охлаждения пары пальцев ПС (ограничено 2 м/с), м/с

Потери давления в тракте охлаждения длинной и короткой пары пальцев составили 65,3 кПа и 65,1 кПа соответственно. Такое небольшое различие в потерях давления объясняется тем, что основной вклад в гидравлическое сопротивление оказывают местные сопротивления, обусловленные изменением направления течения теплоносителя внутри тракта. В свою очередь конструкция трактов охлаждения у разных типоразмеров пальцев отличается только длиной отдельных прямолинейных участков.

Следует отметить, что средняя скорость теплоносителя в канале hypervapotron'a больше 2 м/с, что удовлетворяет условиям обеспечения необходимого запаса до кризиса теплообмена I рода [4].

На втором этапе гидравлического анализа проведен расчет тракта охлаждения ППС. Для упрощения расчетной модели и, как следствие, снижения требовательности к

вычислительным мощностям, тракт охлаждения пальцев ПС замещен имитаторами, общий вид которых представлен на рис. 6. Ввиду малого различия гидравлических сопротивлений у разных типоразмеров пальцев ПС, используются одинаковые имитаторы со значением потерь давления 65 кПа при номинальном расходе теплоносителя 0,4563 кг/с.

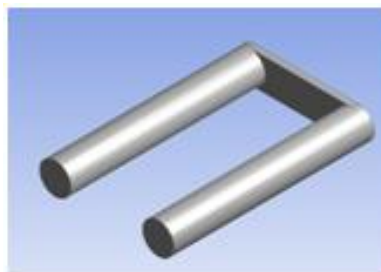


Рис. 6. Гидравлический имитатор пары пальцев ПС

При расчете использовались следующие ГУ [3]:

- расход теплоносителя – 9,125 кг/с;
- давление в тракте охлаждения – 4 МПа;
- температура теплоносителя – 70 °С;
- шероховатость стенки тракта охлаждения – Ra 6,3.

На рисунке 7 представлена схема течения теплоносителя в тракте охлаждения ППС.

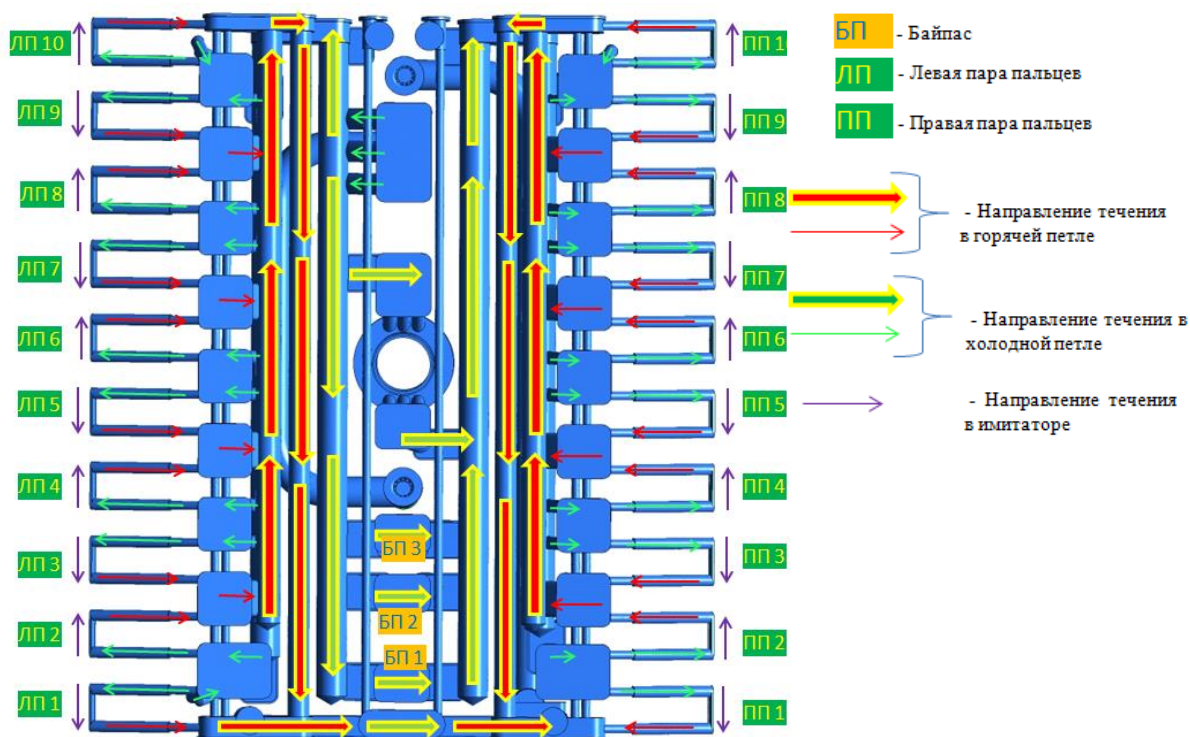
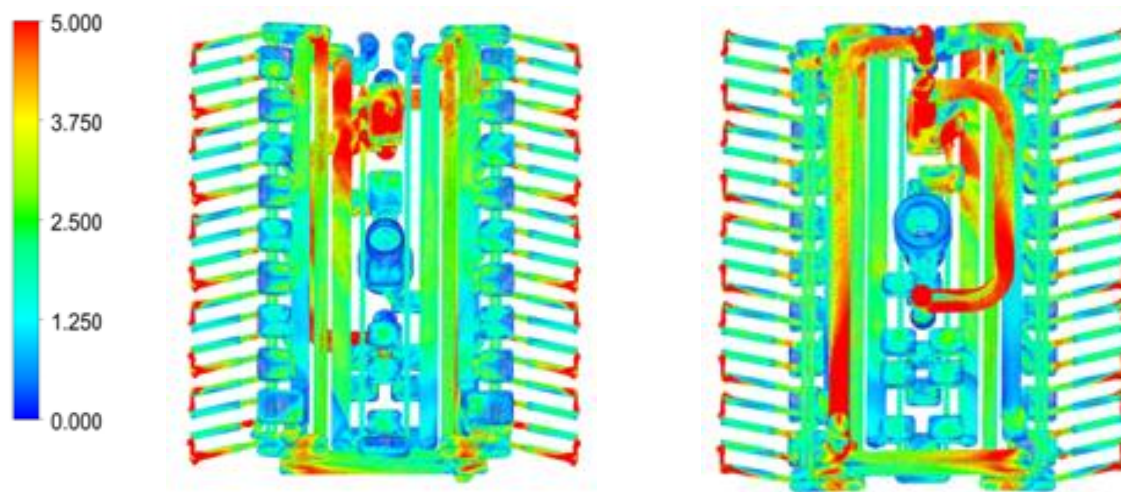


Рис. 7. Схема течения теплоносителя в тракте ППС

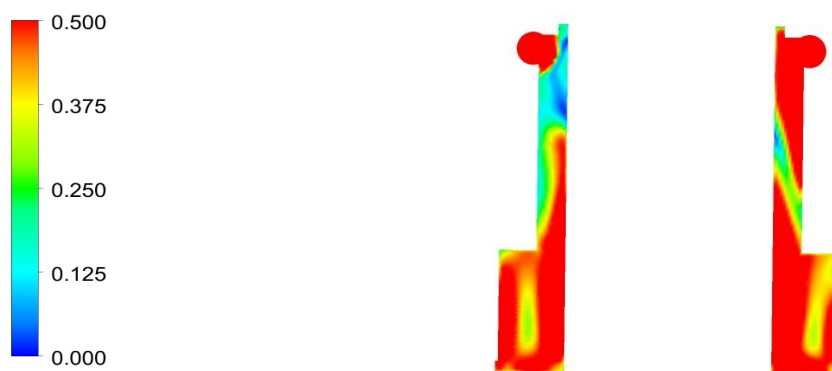
Система охлаждения НКПС включает в себя горячую и холодную петли, соединенные друг с другом трактами охлаждения пальцев ПС. В состав обеих петель

входят: магистральные каналы, полоидальные каналы, система перепускных камер (байпасов), торцевые камеры и коллекторы для подачи теплоносителя в пальцы ПС. Также во входной петле предусмотрен входной коллектор, обеспечивающий охлаждение центральной части НКПС и подачу теплоносителя в магистральный канал. Система перепускных камер призвана обеспечить равномерность распределения расходов теплоносителя в левых и правых пальцах ПС, а также охлаждение центральной части НКПС. Особое внимание при проектировании байпасов уделено зоне размещения центрального болта: центральная перепускная камера сформирована с помощью специальной ввариваемой втулки, что обеспечивает как охлаждение узла центрального болта, так и доступ к центральному болту для проведения монтажных работ.

В результате проведенного гидравлического расчета получено распределение скоростей теплоносителя в тракте охлаждения ППС, представленное на рис. 8. Максимальное значение скорости теплоносителя достигается в магистральных каналах, а наименьшее – в центральной перепускной камере. Однако следует отметить, что как в перепускных камерах, так и во всем тракте охлаждения застойных зон не обнаружено.



Тракт охлаждения ППС (ограничено 5 м/с)



Торoidalное сечение по центральной камере (ограничено 0,5 м/с)

Рис. 8. Распределение скоростей теплоносителя в тракте охлаждения ППС, м/с

Особый интерес представляет распределение расходов теплоносителя по трактам охлаждения пальцев ПС, представленное на рис. 9. Следует отметить, что минимальный расход достигается во второй левой паре пальцев, причем отклонение расхода от

номинального составило 7,4% в меньшую сторону, что допустимо с точки зрения обеспечения запаса до кризиса теплообмена I-го рода [5].

Потери давления в тракте охлаждения составили 398 кПа, что не превышает предельного значения 400 кПа, специфицированного МО ИТЭР [5].

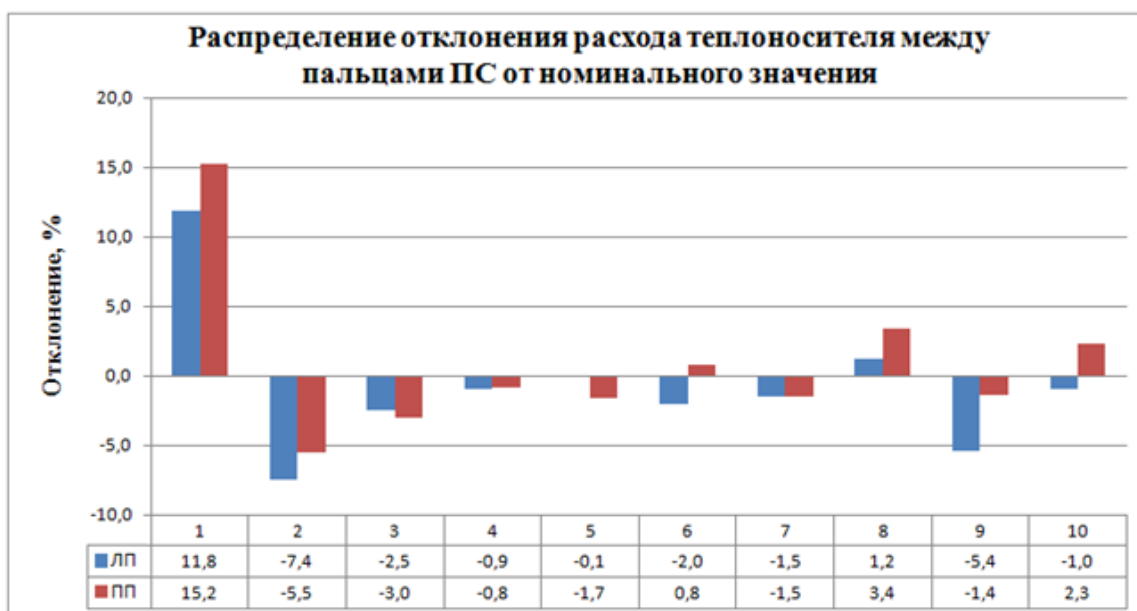
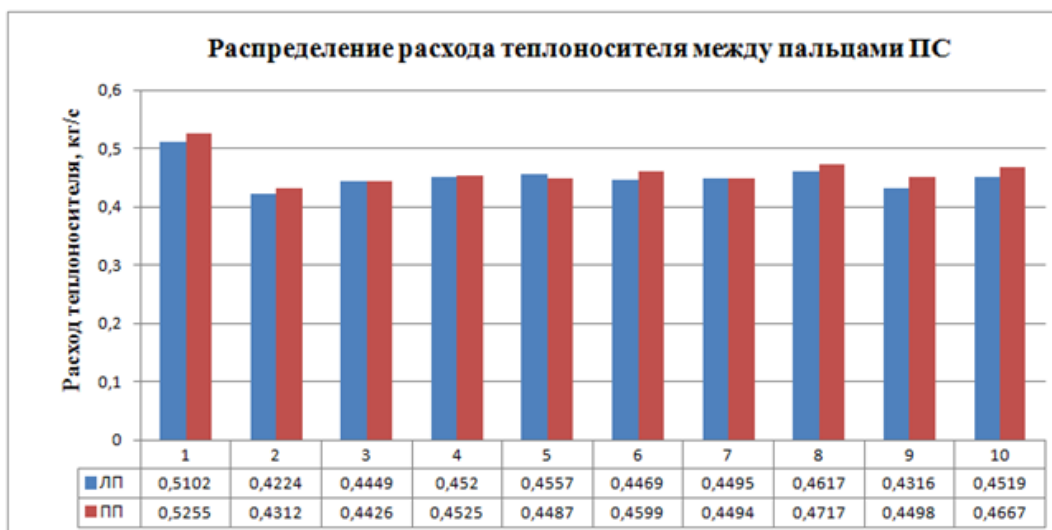


Рис. 9. Распределение расходов по трактам охлаждения пальцев ПС

3. Тепловой расчет

Для обеспечения большей точности теплового расчета в расчетную модель, показанную на рис. 10, помимо непосредственно ППС был включен ЗБ с элементами крепления МБ к вакуумной камере. В то же время на центральной части НКПС выполнен слой призматических элементов, что позволило повысить точность оценки воздействия теплового потока, падающего на ППС со стороны плазмы.

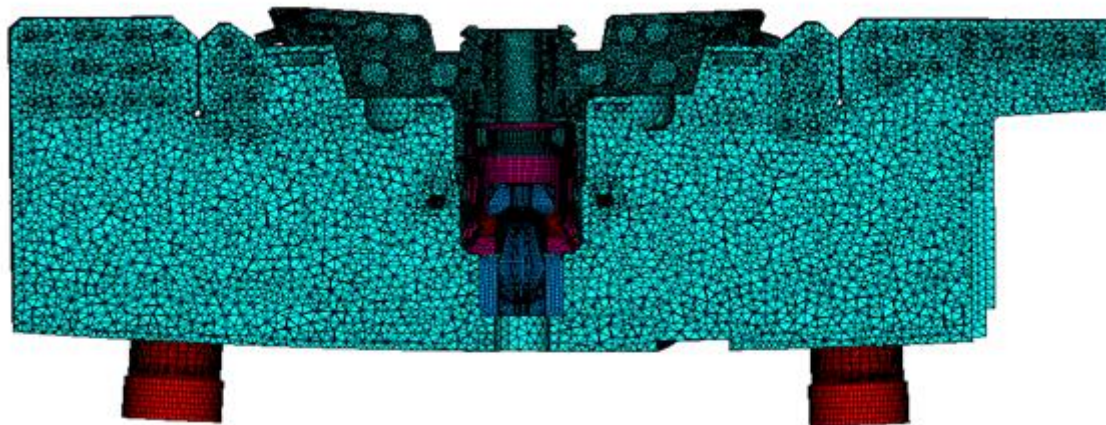
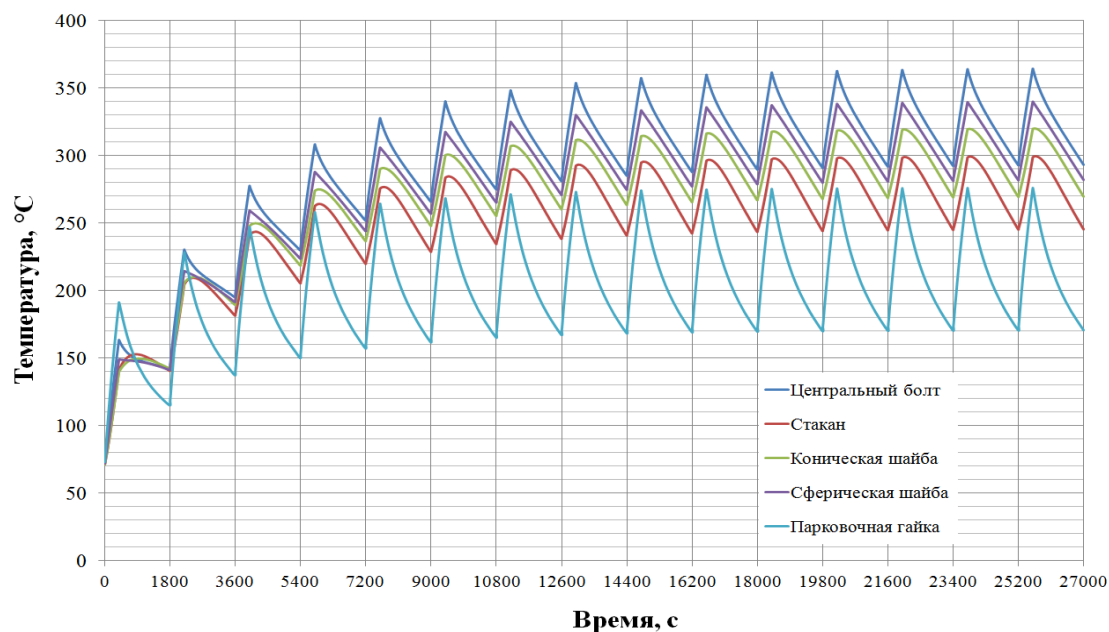


Рис. 10. Расчетная модель для теплового расчета ППС

Расчет проведен в нестационарной постановке, использовались следующие ГУ:

- длительность импульса – 1800 с (400 с – «горение», 1400 с – «пауза») [1];
- температура теплоносителя в холодной петле – 70 °С;
- температура теплоносителя в горячей петле – 100 °С;
- энерговыделение в конструкции приложено согласно [6];
- распределение теплового потока, падающего на центральную часть НКПС, принято в соответствии с работой [7], с учетом глубины паза 55 мм;
- коэффициент теплообмена рассчитан на основе полученного на предыдущем этапе распределения скоростей течения теплоносителя;
- коэффициент теплообмена в тракте охлаждения ЗБ принят равным 5000 Вт/(м²·К);
- значения коэффициента теплопередачи в контактных парах приняты аналогично работе [8].

На рисунке 11 представлено изменение температуры основных элементов МБ во времени. Следует отметить, что МБ выходит на квазистационарный режим работы после 10–11 импульсов, поэтому, анализ температурных полей следует проводить для импульсов, следующих после 11-го импульса.



Узел центрального болта

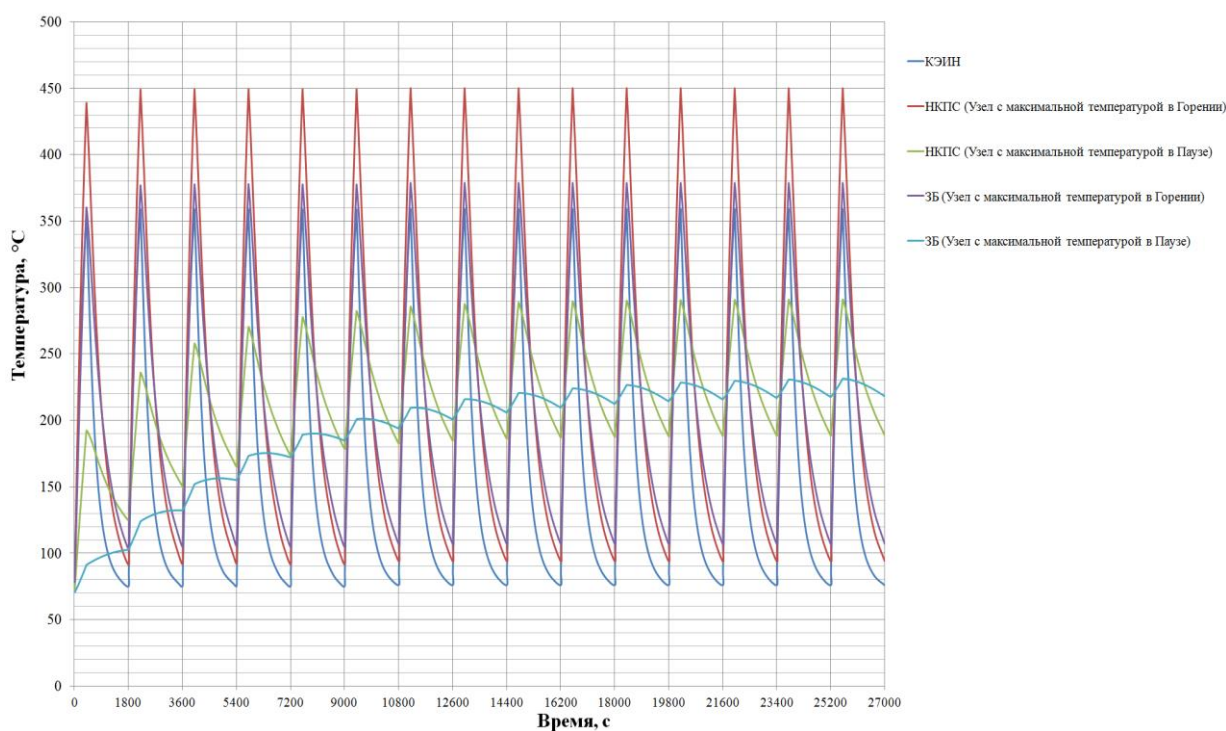


Рис. 11. Изменение температуры элементов МБ во времени

На рисунке 12 представлено распределение температуры в НКПС в «Горении» для 15-го импульса. Следует отметить, что максимальное значение температуры составляет 449,8 °C и достигается в углах НКПС в зоне размещения КЭИН. Полученное значение не превышает допустимой температуры 450 °C, специфицированной МО ИТЭР для стали марки 316L(N)-IG [9]. В центральной части НКПС наблюдается уровень температур ниже 300 °C. Следовательно, разработанная система перепускных камер

обеспечивает требуемый уровень охлаждения НКПС в условиях воздействия теплового потока, падающего на центральную часть.

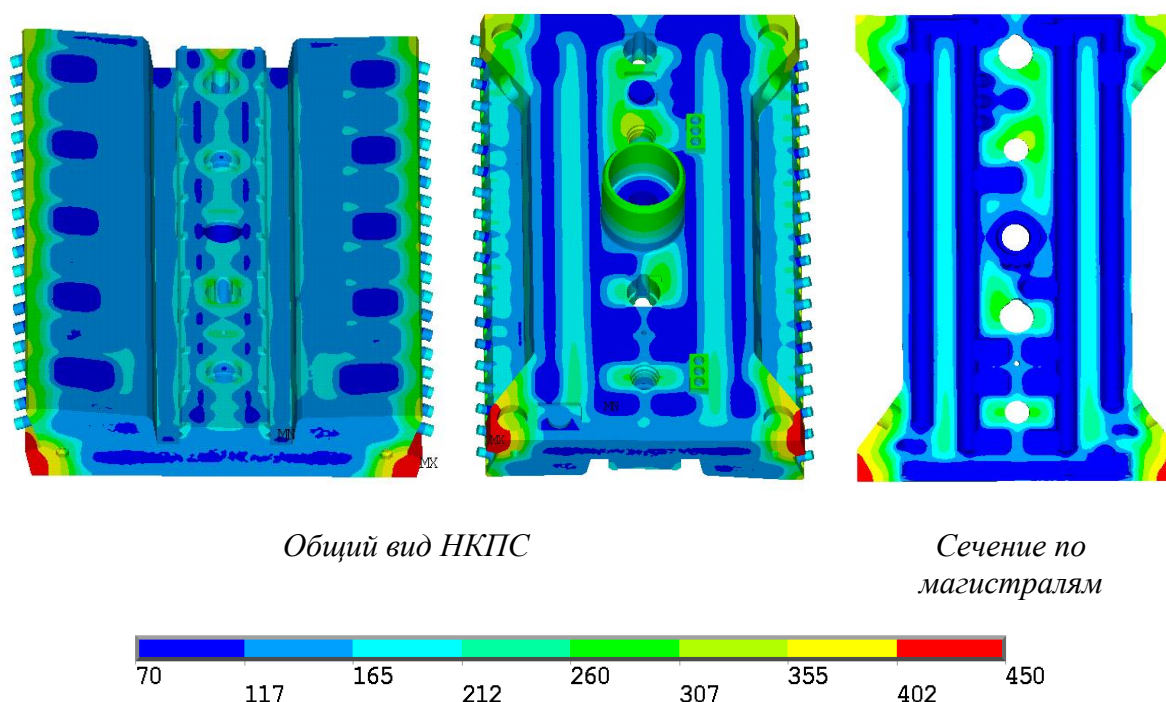


Рис. 12. Распределение температуры в НКПС (Горение), °C

Максимальная температура в КЭИН (рис. 13) достигается в полоидальной накладке, расположенной на противоположной стороне ППС. Это объясняется менее интенсивным охлаждением этой зоны НКПС – канал охлаждения в левой части НКПС расположен дальше от паза, чем в правой.

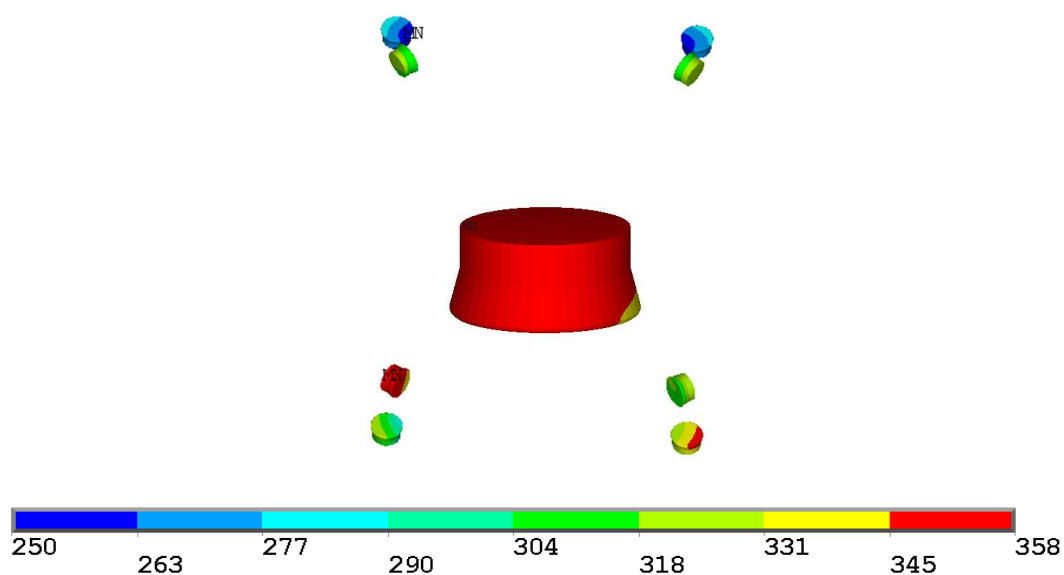


Рис. 13. Распределение температуры в КЭИН, °C

Заключение

1. Разработана конструкция нестандартной ППС №14 тип NC, с использованием конструкторских решений полномасштабного квалификационного макета ППС.
2. Проведенный гидравлический расчет показал, что разработанная система охлаждения НКПС удовлетворяет требованиям МО ИТЭР с точки зрения обеспечения допустимого уровня потерь давления (398 кПа) и распределения расходов по трактам пальцев ПС – максимальное отклонение расхода от номинального значения составило 7,4 %.
3. Анализ температурных полей показал, что максимальная температура в НКПС составила 449,8 °С и не превышает допустимого значения 450 °С.
4. Температура НКПС в центральной части не превышает 300 °С, следовательно, система перепускных камер обеспечивает эффективное охлаждение центральной части НКПС в условиях воздействия теплового потока.
5. Проведенные расчеты показали работоспособность разработанной конструкции ППС, однако в дальнейшем систему охлаждения предлагается модифицировать для снижения потерь давления в тракте НКПС и снижения температуры в зоне размещения КЭИН.

Работа выполнена частично в рамках договора № 35-18до от 27апреля 2018 г. между «ИТЭР-Центр» (Заказчик) и АО «НИКИЭТ» (Исполнитель).

Список литературы

1. R. Mitteau *at al*, Heat loads and shape design of the ITER first wall, Fusion Engineering and Design 85 (2010) 2049–2053.
2. Томилов С.Н., Свириденко М.Н., Лешуков А.Ю. Козлов С.А., Окунева Е.В., Сафронов В.М. Адаптация конструкторских решений полномасштабного макета панели первой стенки // Конференция молодых специалистов «Инновации в атомной энергетике» Сборник докладов 1–3 октября 2019 г., Москва, Издательство АО «НИКИЭТ», с. 744–751.
3. Germán Pérez *at al*, Optimized mass flow rate distribution analysis for cooling the ITERBlanket System, Fusion Engineering and Design 89 (2014) 1324–1329.
4. I. Mazul *at al*, Russian development of enhanced heat flux technology for ITER first wall, Fusion Engineering and Design 87 (2012) 437–442.
5. A.R. Raffray, B. Calcagno, P. Chappuis, Zhang Fu, Chen Jiming, D-H. Kim, *et al.*, The ITER blanket system design challenge, Nucl. Fusion 54 (2014) 033004.
6. T.D. Bohm, M.E. Sawan, E.P. Marriott, P.P. H. Wilson, M. Ulrickson, J. Bullock, Detailed 3-D nuclear analysis of ITER blanket modules, Fusion Engineering and Design 89 (2014) 1954 – 1958.
7. S. Tomilov *at al*, Analysis results of the enhanced heat flux first wall panel elements, FED 124 (2017) 380–384.
8. M.N. Sviridenko, Analysis results of the EHF FW Panel with welded fingers, Fusion Engineering and Design 89 (2014) 948–937.
9. V. Barabash, Materials challenges for ITER – Current status and future activities, Journal of Nuclear Materials 367–370 (2007) 21–3.