

РАСЧЕТ ТЕПЛООТДАЧИ В СЕМИСТЕРЖНЕВОМ ПУЧКЕ ТВЭЛОВ ПРИ СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

И.А. Чусов, А.С. Шелегов, В.И. Слободчук, В.Ф. Украинцев

Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ г. Обнинск



Приведены результаты численного расчета теплогидравлики семистержневой тепловыделяющей сборки при сверхкритических параметрах теплоносителя. Расчет проведен в соответствии с данными эксперимента ГНЦ РФ-ФЭИ на модельном теплоносителе – фреон-12. Приводится сравнение результатов расчета и данными эксперимента.

Ключевые слова: сборка стержней, сверхкритические параметры, экспериментальная установка, экспериментальные данные, расчетная модель, линии тока, распределение давления, дистанционирующая решетка, распределение температур.

Key words: electroheated rod assembly, supercritical parameters, experimental installation, experimental data, calculation model, stream line, pressure distribution, spacer grid, temperature distribution.

ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени расчет интенсивности теплообмена при сверхкритических параметрах теплоносителя исчерпывается геометрией круглых труб [1, 2], что, несмотря на неплохое совпадение данных расчета и эксперимента, не позволяет сделать однозначного вывода о пригодности современных CFD-кодов к расчету течений в пучках стержней. Вместе с тем, именно эта задача является одной из первоочередных в связи с началом исследовательских работ над новой концепцией ядерных реакторов со сверхкритическими параметрами.

Сложность, трудоемкость и высокая стоимость проведения экспериментов с пучками стержней на сверхкритике являются, видимо, главными сдерживающими факторами при проведении опытных работ. Однако экспериментальные работы [3, 4], выполненные в ГНЦ РФ-ФЭИ под руководством П.Л. Кириллова и являющиеся пионерскими в этой области, позволяют провести верификацию одного из расчетных кодов – ANSYS-CFX.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальное исследование проводилось на модельной сборке, конструкция которой приведена на рис. 1. Основной целью эксперимента являлось ис-

© И.А. Чусов, А.С. Шелегов, В.И. Слободчук, В.Ф. Украинцев, 2012

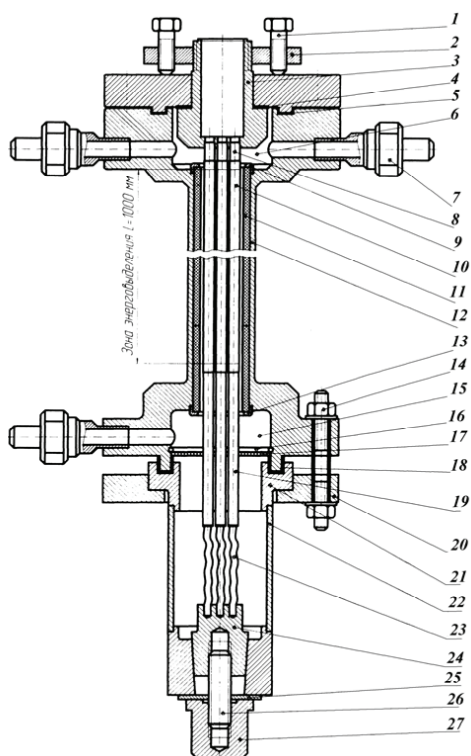


Рис. 1. Общий вид экспериментального канала для опытов на фреоне-12: 1 – прижимной болт; 2 – прижимная гайка; 3 – верхний токоподвод; 4 – медная прокладка; 5; 18 – изоляторы; 6 – верхняя камера; 7 – штуцер; 8 – медная трубка-вставка; 9, 13 – прижимные кольца; 10 – имитаторы твэлов; 11 – керамические втулки; 12 – корпус экспериментального канала; 14 – шпилька; 15 – нижняя камера; 16 – стопорное кольцо; 17 – тефлоновый дистанционер; 19 – медные стержни; 20 – нижний фланец; 21 – проставка; 22 – стакан; 23 – гибкие токоподводы; 24 – конус; 25 – прокладка; 26 – шпилька; 27 – гайка

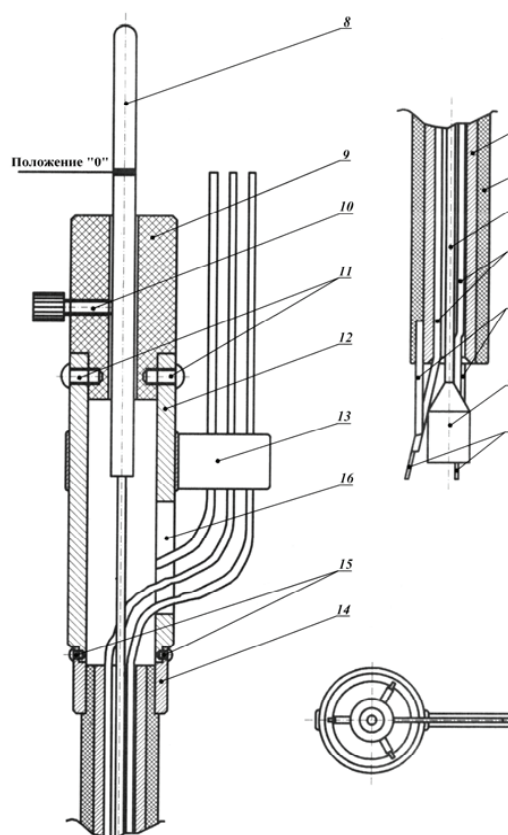


Рис. 2. Конструкция термометрического подвижного зонда для измерения температуры оболочки модели твэла. 1 – трубка термозонда; 2 – изолятор; 3 – тяга; 4 – капилляры термомпар; 5 – лепестки; 6 – конус; 7 – термомпары; 8 – шток; 9 – фиксатор; 10 – стопорный болт; 11, 15 – соединительные болты; 12 – корпус термозонда; 13 – флажок; 14 – переходник; 16 – прорезь для вывода термомпар

следование теплообмена при сверхкритических параметрах теплоносителя на семистержевой сборке с диаметром трубок (имитаторы твэлов) $\varnothing 9,5 \times 0,6$ мм, шагом решетки 11,29 мм и длиной обогреваемой части 1000,0 мм. Модельная сборка выполнена из нержавеющей стали 1Х9Н10Т.

В качестве рабочего тела использовался фреон-12 ($T_{кр} = 112^\circ\text{C}$, $P_{кр} = 4,1$ МПа), что позволило значительно снизить рабочие давление и температуру по сравнению с водой. Методика проведения экспериментов на фреоне-12 при СКД основана на теории подобия и рассмотрена в работе [5]. Дистанционирование имитаторов твэлов осуществлено тремя дистанционирующими решетками. Первая и третья решетки устанавливались в начале и конце твэльного пучка, а вторая – в его середине (на расстоянии ≈ 500 мм от входа). Конструкция центральной трубки, являющейся измерительным каналом, с установленными в ней тремя термомпарами представлена на рис. 2. Подвод и отвод теплоносителя производился через штуцеры с внутренним диаметром 20 мм. Наружная труба рабочего участка $\varnothing 48 \times 4$ мм – нержа-

вещающая сталь 1X9H10T. Эквивалентный гидравлический диаметр модельной сборки равен 4,69 мм.

Измерение температуры теплоносителя проводилось на выходе из зоны обогрева по центрам межканальных ячеек (рис. 4г) в которых были установлены кабельные ТХК микротермопары. Индивидуальная градуировка термопар позволила обеспечить погрешность $\pm 0,3-0,5^\circ\text{C}$ в диапазоне температур от 0 до 300°C . С целью уменьшения показателя тепловой инерции (до 0,1 с) толщина рабочего участка термопары была уменьшена до 0,5 мм.

Давление на входе и выходе из рабочего участка измерялось с использованием преобразователей типа «Сапфир 22ДИ» с классом точности 0,25. Общий перепад давления на имитаторе сборки измерялся аналогичными преобразователями. Для всех датчиков давления проводилась индивидуальная градуировка с погрешностью не хуже 0,5–1,0%.

Расход теплоносителя измерялся расходомерными шайбами в комплекте с преобразователем разности давлений типа «Сапфир-22 ДД». Расходомер градуировался на воде объемно-временным методом с погрешностью измерения 0,11%. Аппроксимационные зависимости для расхода имели относительную погрешность 0,4%.

Всего было выполнено 19 серий экспериментов. На рисунке 3 представлены в графическом виде экспериментальные данные всех выполненных измерений. Серии №8 и №12 на рисунке не показаны, поскольку часть точек входящих в них выходит за пределы погрешности эксперимента – 3σ . Эксперименты проводились с разными расходами рабочего тела ($\approx 600-1650$ кг/ч) и на различных уровнях подводимой мощности (2,0–25 кВт).

Из рисунка хорошо видно, что в области установки третьей дистанционирующей решетки наблюдается значительное увеличение безразмерной температуры. Выяснение причины такого «нефизичного» ее поведения заняло достаточно много времени и, по мнению авторов, сводится к двум основным причинам:

1) локальные загрязнения поверхностей имитаторов твэлов (разборка выходной камеры рабочего участка показала наличие отложений именно в области тре-

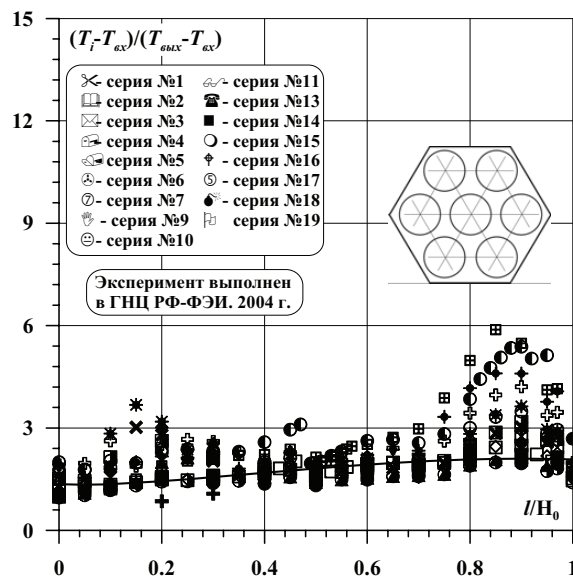


Рис. 3. Распределение температуры на внутренней поверхности твэл при докритических и сверхкритических параметрах теплоносителя для всех режимных параметров

тью дистанционирующей решетки; судя по всему, в силу конструктивного исполнения являлась своеобразным фильтром-ловушкой);

2) сильная затесненность выходной камеры рабочего участка (рис. 9а–г хорошо иллюстрируют это соображение – в области выходной камеры наблюдается вихреобразование не только на входе в камеру, но и в ней самой, что локально значительно ухудшает процесс теплообмена).

ПОСТРОЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ И МЕТОДОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТОВ

Расчетная модель строилась в соответствии с геометрическими параметрами модельной сборки, использованной при проведении эксперимента (рис. 4а, б). Моделировались входная и выходная камеры, проточная часть сборки и трубки токоподводов (рис. 5а, б). Трехмерная векторная твердотельная расчетная модель строилась стандартными средствами ANSYS-CFX [6]. Общее число расчетных элементов (октайдеров) было равно » 800000. Построение расчетной сетки велось со сгущением узлов в окрестности имитаторов твэлов (рис. 5в, г). При моделировании входной камеры входящий в нее трубопровод брался достаточно протяженным с целью обеспечения на входе в нее развитого турбулентного течения. Аналогичным образом моделировалась выходная часть рабочего участка.

Расчет проводился на основании решения уравнений Рейнольдса с использованием k - ε -модели турбулентности со стандартным набором констант без применения пристенных функций. Расчеты были проведены для трех режимов с докритическими параметрами теплоносителя и двенадцати режимов со сверхкритическими параметрами. Ускоряющие коэффициенты Либмана для трех составляющих скорости, давления и температуры брались заданными по умолчанию. Расчет считался законченным, если относительная ошибка в оценке величины давления не превосходила $5 \cdot 10^{-6}$.

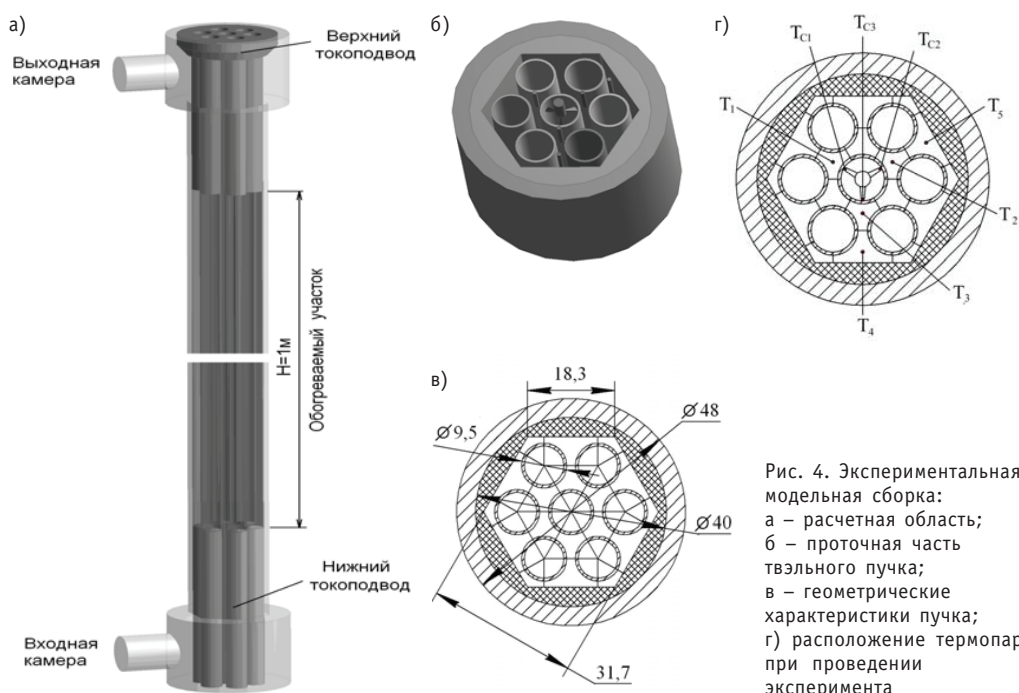


Рис. 4. Экспериментальная модельная сборка:
 а – расчетная область;
 б – проточная часть твэльного пучка;
 в – геометрические характеристики пучка;
 г) расположение термопар при проведении эксперимента

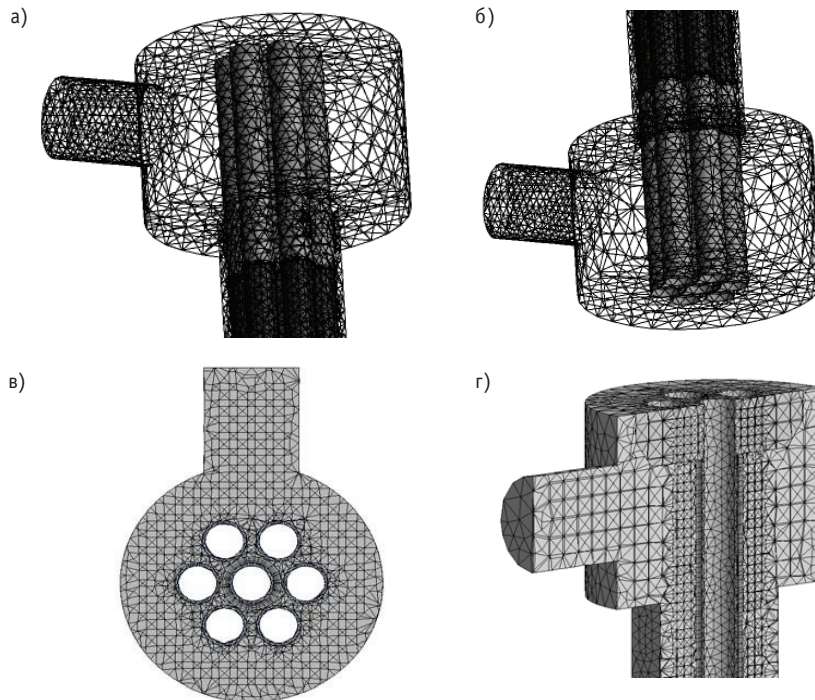


Рис. 5. Расчетная модель и расчетная сетка: а) – выходная камера рабочего участка; б) – входная камера рабочего участка; в) – поперечный разрез входной камеры; г) – продольный разрез выходной камеры

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

На рисунке б показано распределение температуры на внутренней поверхности центрального твэла (измерительного зонда) при обтекании сборки теплоносителем с докритическими параметрами.

Из рисунка хорошо видно, что в области течения от первой до второй дистанционирующих решеток расчетный код дает заниженное значение температуры стенки.

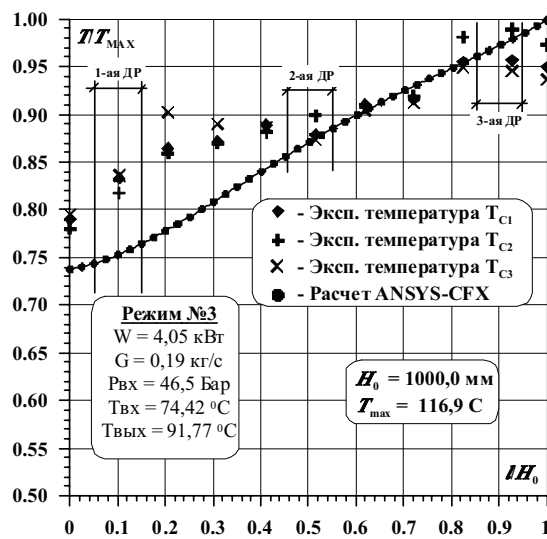


Рис. 6. Распределение температуры на внутренней поверхности твэла при докритических параметрах теплоносителя

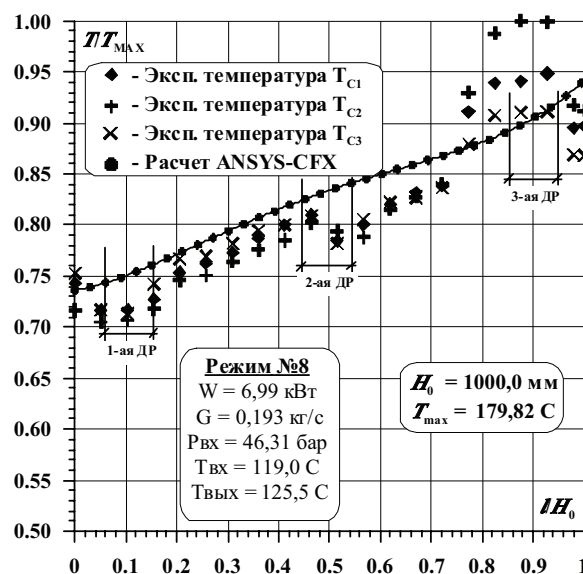


Рис. 7. Распределение температуры на внутренней поверхности твэла при сверхкритических параметрах теплоносителя

На рисунке 7 приведено распределение температуры на внутренней поверхности центрального твэла (измерительного зонда) при движении теплоносителя со сверхкритическими параметрами. Из рисунка хорошо видно, что в области расположения дистанционирующих решеток №1 и №2 наблюдается значительное снижение температуры оболочки центрального твэла, что является вполне «физичным», поскольку дистанционирующая решетка, в общем случае, улучшает теплообмен в твэльном пучке, способствуя более интенсивному перемешиванию потока и увеличивая поверхность теплоотдачи. Однако в области расположения дистанционирующей решетки №3 такого эффекта не наблюдается, более того, средняя температура в этой области значительно увеличивается. Объяснить этот эффект можно, видимо, только влиянием на поток теплоносителя сильно затесненной проточной части выходной камеры.

Отметим, что отсутствие «реакции» численного решения на наличие в потоке дистанционирующих решеток объясняется тем, что при построении векторной модели полагалось их отсутствие.

Сравнение результатов численного расчета с экспериментальными данными при дальнейшем увеличении мощности показано на рис. 8. Как и следовало ожидать, увеличение мощности приводит к более значительному влиянию дистанционирующих решеток на структуру потока, увеличивая градиент температуры в местах их расположения. Особенно сильно это заметно в областях расположения решеток №2 и №3.

Отметим также, что увеличение мощности приводит к расширению «зоны влияния» решеток. В целом следует отметить хорошее согласие результатов расчета и данных эксперимента.

На рисунке 9 показана полученная расчетным путем картина линий тока во входной и выходной камерах рабочего участка. Из рисунков 9а и б видно, что вход в рабочий участок и выход из него сопровождается закруткой потока и вихреобразованием, что объясняется их конструкцией. Как хорошо видно из рис. 9а, поток теплоносителя, попадая во входную камеру, разделяется на две части, огибает твэльный пучок и образует два вихря в ее задней части. Это обстоятельство приводит к увеличению длины начального участка и закрутке потока в целом.

were compared with the experimental ones. The best approach for simulation of the two-phase flow drag with the tube bundle based on the empirical two-phase flow hydraulic resistance correlations was identified.

УДК 621.039.51

Experimental Determination of Power-Release in the Lead and Uranium Samples Irradiated by High-Energy Protons \A.A. Goverdovskiy, B.V. Keadze, D.M. Kovalev, R.R. Chernov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 8 pages, 3 tables, 9 illustrations. – References, 2 titles.

The paper describes the development, laboratory tests, and accelerator experiments of a measurement procedure of power-release in lead and uranium samples. The measurement procedure involved provides a reliable measurement of temperature of the sample at its rate of the change of 0,1 K per minute. The power-release data received in the lead and uranium sample are very important for tackling the problems of optimization of heat-removal from the irradiated target sample. The results obtained contributes to the development of ADS.

УДК 621.039.5

Hydrodynamics and Heat Transfer in Reactor Installation «MASTER» \S.L. Dorohovich, Yu.A. Kazanskiy, A.A. Kazantsev, S.V. Kovalchuk, A.V. Levchenko, V.A. Levchenko, Yu.S. Yurev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 13 pages, 2 tables, 10 illustrations. – References, 6 titles.

The paper is concerned with results of calculation investigations of heat and hydrodynamic processes in reactor installation «MASTER». Designing and testing calculations using CFD-code «KANAL» were performed.

УДК 621.039.58: 536.423

Verification of TECH-M and KORSAR/GP Computer Codes on the Basis of Experimental Results Obtained on Large-scale Test Facility GE2M-PG \A.V. Morozov, O.V. Remizov, D.S. Kalyakin, V.I. Asyunin, V.I. Schekoldin, S.I. Zaitsev, M.O. Zakutaev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 11 pages, 1 table, 8 illustrations. – References, 8 titles.

The paper presents the results of calculations of the experiments conducted at the GE2M-PG test facility in SSC RF-IPPE. These experiments simulate the operation of steam generator during the cooling of the core of the “NPP-2006” VVER reactor by the joint action of passive safety systems HA-2 and PHRS in case of accidents with loss of primary coolant. The purpose of the work was to conduct a post test calculations and verification of computer codes TECH-M and KORSAR/GP in terms of modeling of heat transfer processes in a steam generator model at low heat fluxes in the presence of noncondensable gases, and without them. As a result of verification it is possible to conclude about the ability of computer codes to reproduce the phenomenon of non-condensable gases distribution, accumulation and their effects on heat transfer in a steam generator tube bundle.

УДК 621.039.534

Calculation of Heat Transfer at the Seven Heated Rod Assembly upon Supercritical Fluid Parameters \I.A. Chusov, A.S. Shelegov, V.I. Slobodchuk, V.F. Ukraintsev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 8 pages, 9 illustrations. – References, 6 titles.

The results of calculation analysis of experiments on thermal hydraulic of the seven fuel pin assembly under supercritical coolant parameters are presented. Calculations were done in accordance with experimental condition and results of SSC RF IPPE on modeling coolant freon-12. Comparison between experimental and calculation results was carried out. Possible ways of improvement of calculation technique were discussed.