

ЕНЕРГИЕН ФОРУМ 2020

ТЕРМОХИДРАВЛИЧНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПОДОБЛАСТ ОТ АКТИВНАТА ЗОНА НА ВВЕР-1000 ПРИ ХИПОТЕТИЧНО СКЪСВАНЕ НА ГЛАВЕН ПАРОПРОВОД С НЯКОЛКО ЗАСЕДНАЛИ ОРГАНИ ЗА РЕГУЛИРАНЕ

Иван Спасов

THERMAL-HYDRAULIC ANALYSIS OF A VVER CORE SUB-SET IN A HYPOTHETICAL MSLB TRANSIENT WITH SEVERAL STUCK CONTROL RODS

Ivan Spasov

A COBRA-TF (CTF) simulation of a VVER-1000 core subset of seven fuel assemblies is performed for the moment of maximum overcooling in a hypothetical main steam line break transient with several stuck rods. The assembly powers and boundary conditions are obtained from a coarse-mesh 3D neutronic/thermal-hydraulic core calculation. The objectives are to test a hybrid CTF subset model composed of sub-channel and coarse mesh cells and to evaluate the effect of cross-flow between the fuel assemblies in hot assembly thermal-hydraulic calculations.

Въведение

В предходно изследване [1] е разгледан хипотетичен аварийен процес във ВВЕР-1000 В320 предизвикан от изходно събитие “Скъсване на главен паропровод” в неотсекаемата част, съпроводено от отказ на осем регулиращи органа, попадащи в аварийния преохладен сектор. То е проведено на две нива, посредством свързано крупно-мрежово (нодално) неутронно-физично/термохидравлично пресмятане и чрез фино-мрежово (суб-канално) термохидравлично пресмятане на най-натоварената горивна касета. Получените резултати демонстрират подобрена резолюция на субканалното пресмятане в сравнение с широко използваните крупно мрежови модели. Пределите по безопасност не се превишават. Въпреки това, остава отворен въпросът за отчитане на влиянието на съседните горивни касети, както и за уточняване необходимото ниво на детайлизация.

Настоящата работа цели:

- Създаване на т.н. „хибриден” CTF термохидравличен модел на подобласт от активната зона на ВВЕР-1000 (със суб-канален модел на горещата касета и крупно-мрежов модел на заобикалящите я касети);
- Термохидравлично изследване на подобласт от активната зона на ВВЕР-1000 при хипотетично скъсване на главен паропровод придружено от отказ на 8 органи за регулиране в преохладения сектор.

Тестов случай

Тестовият случай е получен на базата на аварийен сценарий описан в [1], който е изведен от песимистичния сценарий на OECD/NEA VVER-1000 MSLB benchmark [2] с допълнително утежняващо допускане за засядане в горно крайно положение на осем органи за регулиране при сработване на аварийната защита. Разглежда се моментът на максимално

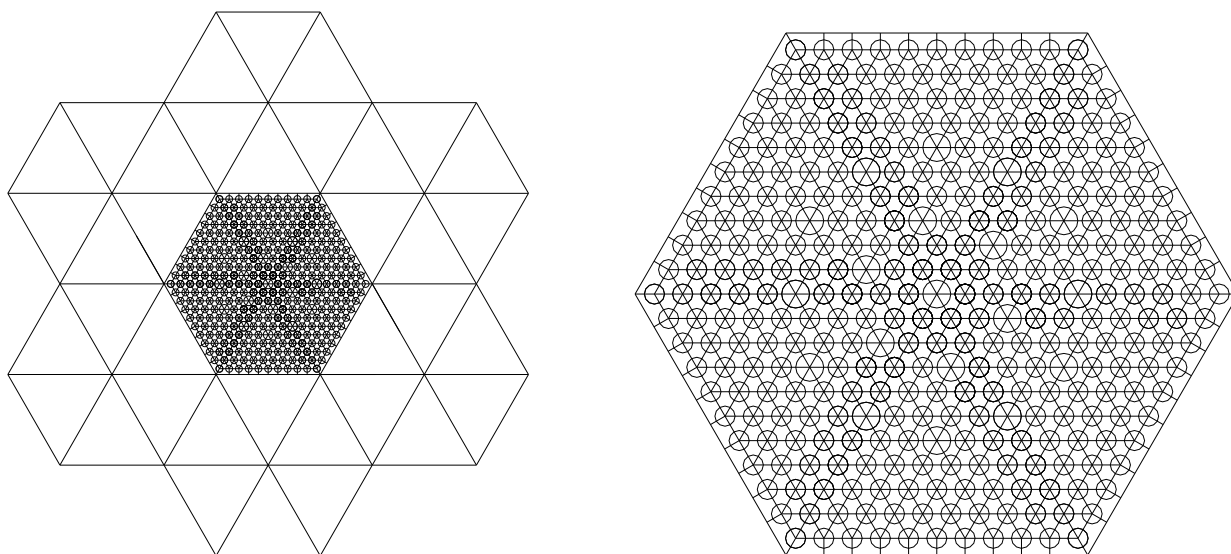
преохлаждане на топлоносителя в аварийния сектор на входа на активната зона. Енергоотделянето в 7 от най-натоварените горивни касети е получено от свързано 3-мерно неутронно-физично пресмятане с COBAYA4/CTF [1]. COBAYA4 [3,4] е тримерен реакторно-физичен код за много-групови дифузионни пресмятания на активните зони на PWR и ВВЕР с нодален или фино-мрежов (pin-by-pin) метод, разработен от UPM Madrid в колаборация с проектите NURESIM [5] NURISP [6] и NURESAFE [7] на ЕК-Евратом.

Компютърен код CTF

CTF [8, 9] е версия на тримерния термохидравличен код COBRA-TF, позволяващ различна степен на детайлизация на симулираните процеси от ниво крупна мрежа до елементарна клетка. COBRA-TF е разработен от Тихоокеанската Северозападна Лаборатория, САЩ през 1980, а по-късно е модифициран от няколко организации. Кодът е подобрен и в последствие преименуван на CTF в Държавния университет в Пенсилвания, САЩ [9]. Настоящата версия използва двуфазен модел с три полета (9 уравнения за съхранение). Използван е в Американския проект CASL [10] и Европейския проект NURESAFE [7].

Моделни допускания

Създаден е хибриден термохидравличен модел на подобласт от активната зона, състояща се от 7 горивни касети. Централната касета е представена посредством 660 елементарни клетки с топлоносител в центъра им. Всяка от шестте периферни касети е моделирана чрез 6 крупни триъгълни изчислителни възела (фигура 1). Използвана е аксиална мрежа с 30 изчислителни възела в обогреваемата част от активната зона. Дистанциониращите решетки не са моделирани явно. Те са отчетени чрез вертикални хидравлични съпротивления. Байпасът през горивните касети не е моделиран.



Фигура 1 Хибриден CTF модел: радиална дискретизация

Моделът на горивото се състои от 11 радиални пръстена: 9 в горивната таблетка, 1 за газовата междина и 1 за циркониевата обвивка. Моделиран е централният отвор в горивната таблетка. Отчетена е топлопроводността в радиално и аксиално направление. Зададен е постоянен коефициент на топлопроводност в газовата междина равен на $3070 \text{ W/m}^2\text{K}$, който е оценен за края на горивната кампания. Свойствата на материалите са зададени съгласно [11].

Приложени са термохидравлични гранични условия получени от пресмятане на изходно събитие „Скъсване на главен паропровод” с 24 секторен CATHARE2 модел на корпуса на ядрения реактор [12].

Зададена е покасетна мощност и аксиални профили на енергоотделянето, получени от свързано COBAYA4/CTF пресмятане [1]. Те са представени на фигура 2 и 3. Прието е еднакво радиално енергоотделяне на топлоотделящите елементи за горивна касета.

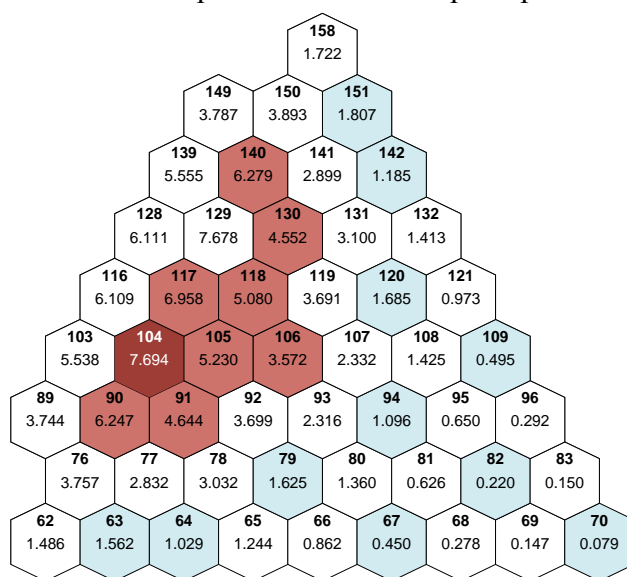
Приложен е модел на Thom за локално кипене. Използвана е корелацията на W3 за определяне на критичния топлинен поток.

Зададени са коефициенти на хидравлични съпротивления във вертикална и хоризонтална посока съответно равни на 0,0503789 и 0,5.

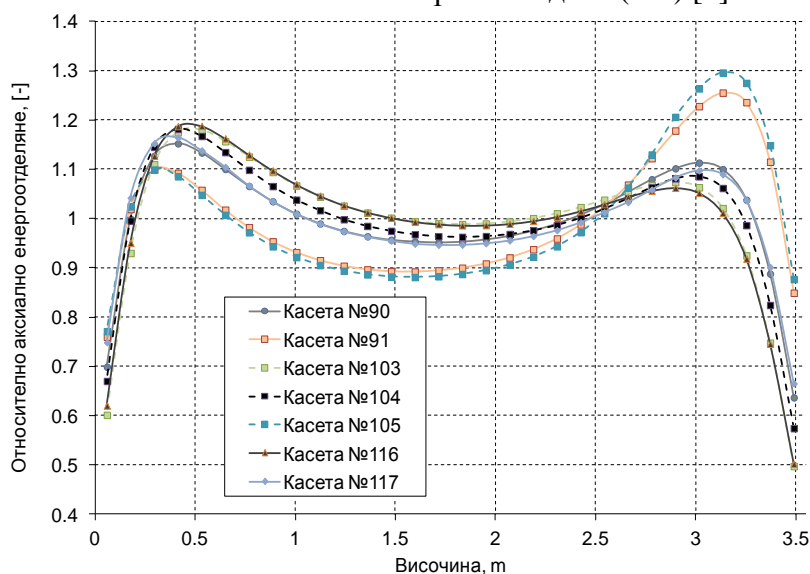
Коефициентът на хидравлично триене е определен съгласно зависимостта $\lambda = 0.204 * Re^{-0.2}$.

Приложен е еднофазен коефициент на смесване съгласно Rogers и Rosehart и двуфазен множител съгласно Veus. Не е използван модел за отнасяне и отлагане на водните капки.

Свойствата на водата и водната пара са отчетени според оригинална CTF таблица.



Фигура 2 Пресметнато с COBAYA4/CTF относително покасетно енергоотделяне в момента на максимално преохлаждане (67s) [1].



Фигура 3 Пресметнато с COBAYA4/CTF относително аксиално енергоотделяне в момента на максимално преохлаждане [1].

Резултати

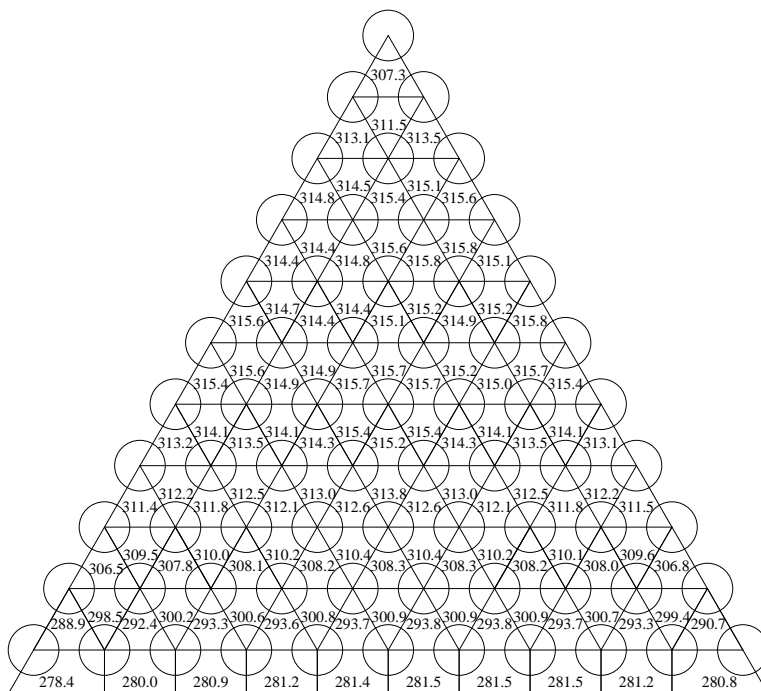
Моментът на максимално преохлаждане на активната зона при хипотетично скъсване на главен паропровод е симулиран в статика с компютърния код STF. На фигура 4 е представена 1/6 от радиалното разпределение на температурата на топлоносителя на изхода от най-горещата касета (№104). Сравнението на получените резултати с такива от симулация само на горещата касета показва предсказване на по-висока температура на топлоносителя в 43 от клетките, намиращи се на границата с касети №103, №105 и №116. В останалите 617 клетки температурата на топлоносителя е по-ниска, като максималната разлика достига до 4,9 °С.

На височина 2,544 метра от началото на обогреваемата част на активната зона възниква режим на недогрятото кипене, който не преминава в мехурчесто кипене до края ѝ. Обемното паросъдържание е равно на 0,001 в последните 25 cm от обогреваемата част на 104-та касета. Забелязва се в суб-каналите разположени след третия пръстен от топлоотделящи елементи, разглеждан в радиално направление от периферията на към центъра ѝ.

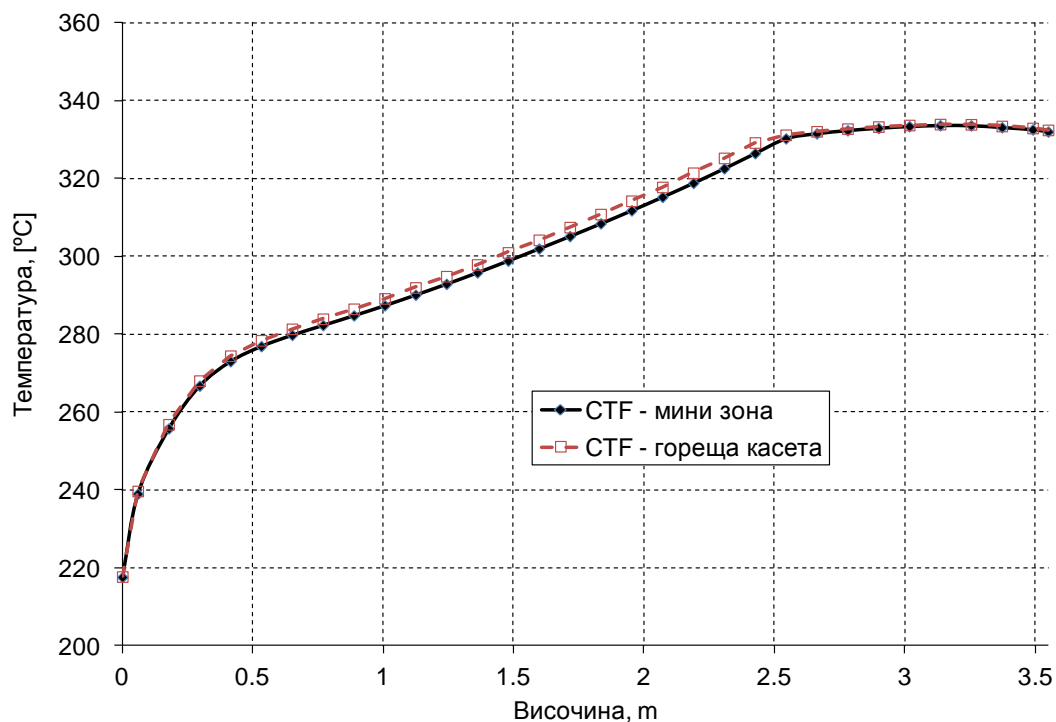
Предсказаната минимална стойност на запаса до възникване на кризис на топлообмена е 2,687.

Температурата на външната повърхност на циркониевата обвивка за най-натоварения топлоотделящ елемент е представена на фигура 5. Пресметнатата от хибридният модел максимална стойност е равна на 333,69 °С. Наблюдава се на височина равна на 3,136 m от началото на обогреваемата част на активната зона. При клетъчното пресмятане се забелязва по-бързо нарастване на температурата на външната повърхност на циркониевата обвивка до момента на възникване на режима на недогрятото кипене. Максималната разлика е от 2,76 °С. Тя се намира на височина 2,43 m от началото на активната зона.

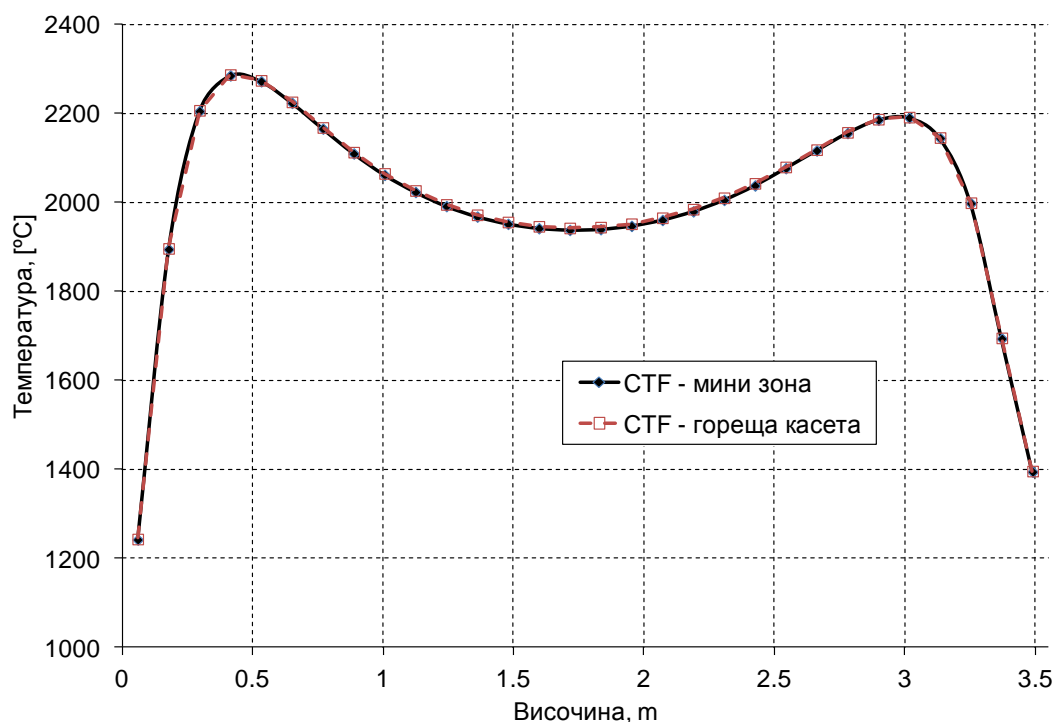
На фигура 6 е представена температурата в центъра на горивната таблетка на един от най-натоварените топлоотделящи елементи в момента на максимално преохлаждане. Максималната ѝ стойност е под температурата на топене на урановия диоксид и е равна на 2280 °С. Клетъчният модел на най-натоварената касета дава с до 5 °С по-висока температура на горивото.



Фигура 4 Касета №104: 1/6 от радиалното разпределение на температурата на топлоносителя на изхода на обогреваемата част



Фигура 5 Температура на повърхността на циркониевата обвивка в един от най-натоварените ТОЕ



Фигура 6 Температура в центъра на горивната таблетка в един от най-натоварените ТОЕ

Заклучение

Чрез хибриден STF модел на подобласт от активната зона на ВВЕР-1000 е симулирано стационарното състояние на момента на максимално преохлаждане на топлоносителя при хипотетичен аварийен процес предизвикан изходно събитие „Скъсване на главен паропровод” придружено от засядане на 8 регулиращи органа попадащи във формирания смутен сектор.

Получените резултати са сравнени с клетъчно STF пресмятане на най-натоварената горивна касета. Моделът на мини зона от 7 горивни касети предсказва по-малко паросъдържание и по-ниска температура на топлоносителя в най-натоварената горивна касета вследствие на отчетения напречен масообмен със съседните касети в сравнение с клетъчно пресмятане само на най-натоварената горивна касета.

Не се наблюдава превишаване на пределите по безопасност, въпреки изключителния консерватизъм на симулирания аварийен процес.

Изследването на ефекта от неравномерното радиално енергоотделяне на топлоотделящите елементи в горивните касети, както и ефекта от употребата на по-финна изчислителна мрежа в периферните касети на мини-зоната е обект на бъдеща работа.

Литература:

1. S. Mitkov, I. Spasov, N.P.Kolev "Simulation of a hypothetical MSLB core transient in VVER-1000 with several stuck rods" Kerntechnik 83 (2018) 4, Carl Hanser Verlag
2. N. P. Kolev; et al. "VVER-1000 Coolant transient benchmark Phase II (V1000CT2). Vol. 2: Final Specification of the VVER-1000 MSLB Problem" NEA/NSC/DOC 2006(6) OECD 2010
3. J-A.Lozano, J.Jimenez, N.G.Herranz, J-M.Aragones, J.C.Abascal, "Extensión of the analytic nodal diffusion solver ANDES to triangular-Z geometry and coupling with COBRA-IIIc for hexagonal core analysis", Annals of Nuclear Energy 37(3) March 2010, DOI: 10.1016/j.anucene.2009.12.001
4. COBAYA4 Input Manual, Universidad Politecnica de Madrid, 2015
5. C.Chauliac, J-M.Aragonés, D.Bestion, D.G.Cacuci, N.Crouzet, F-P.Weiss, M.A.Zimmermann, "NURESIM – A European simulation platform for nuclear reactor safety: Multi-scale and multi-physics calculations, sensitivity and uncertainty analysis", Nuclear Engineering and Design Vol. 241, Issue 9, September 2011, pp. 3416-3426
6. B. Chanaron, C. Ahnert, D. Bestion, M. Zimmermann, D. Cacuci, N. Crouzet, "The European Project NURISP for Nuclear Reactor Simulation", Transaction of the ANS, 2010
7. B. Chanaron "Overview of the NURESAFE European Project" Nuclear Engineering and Design, Elsevier, 2017, 321, pp.1-7. Doi: 10.1016/j.nucengdes.2017.09.001.
8. M. Avramova, et al. "CTF – A Thermal-Hydraulic Subchannel Code for LWRs Transient Analysis: User's Manual" Pennsylvania State University, 2014
9. R. K. Salko, M. Avramova "COBRA-TF Theory Manual" Pennsylvania State University, 2015
10. D. B. Kothe "CASL: The Consortium for advanced Simulation of Light Water Reactors – A DOE Energy Innovation Hub for Modeling and Simulations of Nuclear Reactors" Oak Ridge National Laboratory, 2016
11. N. P. Kolev, et al. "VVER MSLB Specification Vessel mixing tests and N/TH simulations at nodal level" NURESAFE D14.11.1 Report, 2014
12. I. Spasov, et al. "CATHARE Multi-1D Modeling of Coolant Mixing in VVER-1000 for RIA Analysis" Science and Technology of Nuclear Installations, 2010, Article ID 457094, Hindawi

Благодарности:

Изследването е проведено с компютърния код STF, поддържан от North Carolina State University.

Авторът изказва своите благодарности на доц. д-р Николай Колев от ИЯИЯЕ-БАН за оказаните съвети и съдействие.

Автор:

гл. ас. д-р Иван Георгиев Спасов^{1,2},

¹ Технически Университет – София, катедра „Топлоенергетика и ядрена енергетика”, 02/965 2301, spasov@tu-sofia.bg;

² Институт за ядрени изследвания и ядрена енергетика към БАН, лаборатория „Реакторна физика”, spasov@inrne.bas.bg.