

МОДЕЛ НА ЯДРЕН РЕАКТОР ТИП ВВЕР-1000/В-320 С КОМПЮТЪРНИЯ КОД ATHLET-CD

Йото Георгиев, Калин Филипов, Владимир Велев

Представен е модел на ядрен реактор тип ВВЕР-1000/В-320, разработен за компютърният код ATHLET-CD2.1A. Направена е валидация на модела при анализ на авария със теч на студената част на четвърти циркуляционен кръг и пълно обезточване на блока. След извършване на изчисленията резултатите са сравнени с тези, получени от компютърните кодове ATHLET-2.1A, ASTEC-2.1 и RELAP5mod3.2.

Ключови думи: Симуляционно моделиране, термохидравлика, ATHLET, ВВЕР-1000

MODEL OF NUCLEAR REACTOR TYPE VVER-1000/V-320 BUILT BY COMPUTER CODE ATHLET-CD

Yoto Georgiev, Kalin Filipov, Vladimir Velev

A model is presented of nuclear reactor type VVER-1000 V-320 developed for computer code ATHLET-CD2.1A. Validation of the has been made, in the analysis of the station blackout scenario with LOCA on fourth cold leg is shown. As the calculation has been completed, the results are checked through comparison with the results from the computer codes ATHLET-2.1A, ASTEC-2.1 and RELAP5mod3.2.

Въведение

Ядрената енергетика има четири вродени недостатъка, които съпровождат нейното развитие: радиацията, рискът от аварии, ядрените отпадъци и опасността от разпространение на ядреното оръжие. Една от главните задачи на изследванията в областта на ядрената безопасност е по-доброто разбиране на процесите при надпроектни аварии в ядрените електроцентрали. Анализите на различни аварийни сценарии могат да се използват както за разработване на мерки за управление на аварийните ситуации, така и за разработване на нови конструкции и системи за безопасност. За целта се използват различни компютърни кодове, подобно на кода ATHLET-CD, за симулиране на широк кръг от експлоатационни и аварийни събития, включително и надпроектни и тежки аварии в ядрените инсталации.

Въпреки малката вероятност за възникване на тежки аварии, тяхното изследване е важна част от ядрената безопасност. Интерес представляват възможностите и методите за запазване на целостта на активната зона на реактора за възможно най-голям период от време чрез прилагането на конструктивни мерки и разработване на процедури за управление на тежки аварии. За провеждането на подобно изследване е разработен входен дек за кода ATHLET-CD2.1A, който моделира структурата на активната зона при реакторите тип ВВЕР-1000/В-320. За да се провери адекватността на съставения входен дек и на компютърния код ATHLET-CD2.1A е направено сравнение между резултатите получени от компютърните кодове ATHLET-CD2.1A, ATHLET-2.1A, RELAP5mod3.2 и ASTEC-2.1.

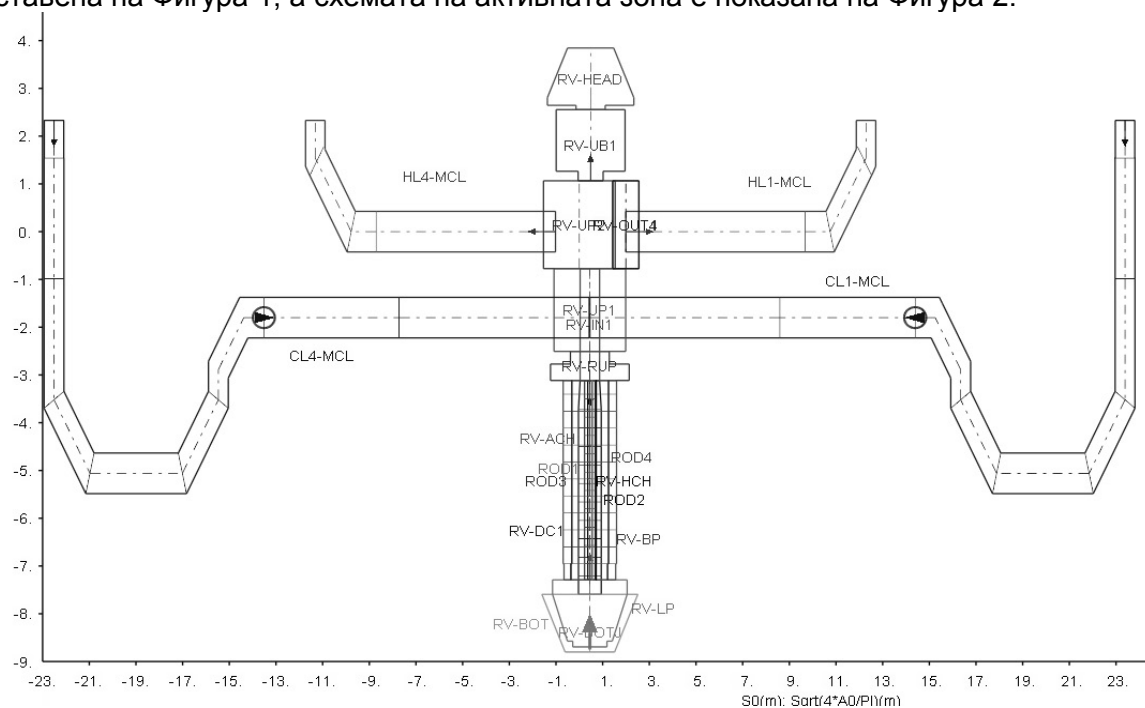
Компютърен код ATHLET-CD

Компютърният код ATHLET-CD се състои от две главни части: ATHLET и CD (Core Degradation). ATHLET-частта симулира термохидравликата, топлинните структури, неутронната кинетика и системите за контрол и управление на реакторната инсталация.

Процесите, които се симулират в CD-частта са разгриване на структурите, окисляване на циркониевите сплави и стопилката, генерирането на водород, раздуването на обвивките на топлоотделящите елементи, разрушаването и разтопяването на топлоотделящите елементи, и освобождаването и разпространяването на продуктите на делене [4]. Компютърният код ATHLET-CD се използва за симулиране на аварии с разрушаване на активната зона на реакторите с топлоносител вода, а в последната версия и на реакторите с газови топлоносители и течни метали. Той симулира активната зона на реактора, нейното разрушаване и поведението на продуктите на делене. Явява се аналог на френския код ICARE, американския SCDAP/RELAP5 и руския СОКПАТ. Разработва се от 1990 от научната организация GRS в Германия в сътрудничество с Института по ядрена енергетика и енергийни системи (Institut für Kernenergetik und Energiesysteme) в Щутгарт и френския институт Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) в Кадараш [3]. ATHLET-CD може да се свърже с френския код за симулиране на разпространението на аерозоли и продукти на делене SOPHAEROS.

Модел на реактора

Моделът на реактора за ATHLET-CD е съставен на основата на разработен модел за термохидравличния код ATHLET, представен в [1]. Нодализацията на реактора е представена на Фигура 1, а схемата на активната зона е показана на Фигура 2.

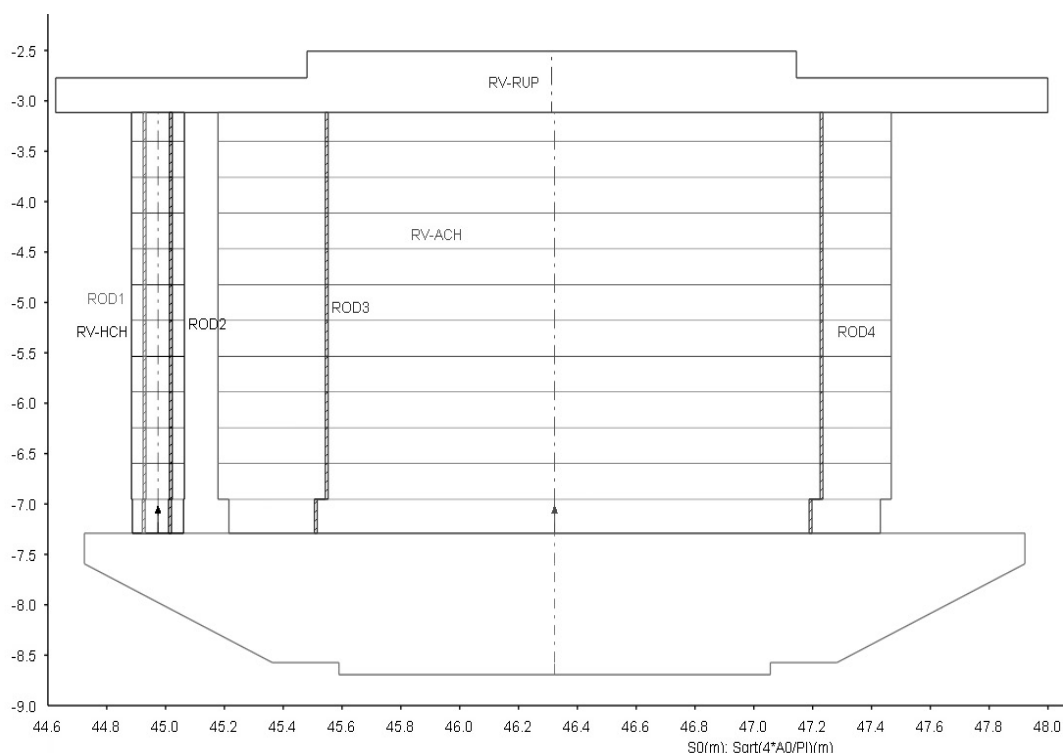


Фигура 1. Нодализацията на реактора

Моделът на активната зона е създаден за конфигурация с касети тип ТВС-А. Теплоотделящите елементи на активната зона са разделени на четири групи: *ROD1*, *ROD2*, *ROD3* и *ROD4*. Симулирането на топлоотделящите елементи е извършено чрез обекти тип *HEAT*. Четирите групи топлоотделящи елементи са с еднаква геометрия, като разликата е в техния брой и стойността на енергоотделянето в тях. Първата група се състои от един обект и симулира най-енергонатоварения топлоотделящ елемент от най-енергонатоварената касета. Втората група е съставена от 311 обекти, които представляват усреднените топлоотделящи елементи на най-натоварената касета без най-натоварения. Третата група се състои от 162 обекта и симулира най-натоварения топлоотделящ елемент на усреднените 162 касети. Четвъртата група включва усреднените топлоотделящи елементи на усреднените касети, като броят им е 50382.

Стъпката на топлоотделящите елементи в касетата е 12.75 mm. Дължината на всеки от тях е 3.837 m (активната част е 3.55 m), външният диаметър е 9.1 mm, външният диаметър на горивната таблетка е 7.57 mm, газовата хлабина е с дебелина 0.075 mm, а вътрешният диаметър на обвивката на топлоотделящия елемент е 7.73 mm. Теплоотделящите елементи от първата и втората група са свързани със термофлуидния обект *RV-HCH*, който симулира потока от топлоносител, преминаващ през централната касета на активната зона. Теплоотделящите елементи от третата и четвъртата група са свързани със термофлуидния обект *RV-ACH*. В аксиално направление топлоотделящите елементи са разделени на дванадесет топлопроводящи обеми. Те се нодализират автоматично в съответствие с броя на контролните обеми на свързаните с тях термо-флуид динамични обекти.

Към топлоотделящите елементи е приложен моделът за окисляване на циркониевата обвивка, който пресмята размера (дебелината) на окисляването и съответстващото освобождаване на енергия за всички топлопроводящи обеми в топлопроводящите обекти, към които е приложен. Тъй като се симулира водород в термо-флуид динамичната система, се изчислява отделянето му и загубата на пара (при окислението на циркониевата сплав). От наличните 19 корелации в ATHLET-CD е избрана тази на Соколов ($MODOXI = 18$), която се отнася за сплав E-110, използвана при реактори от типа ВВЕР. В кодовете ATHLET и ATHLET-CD прехода от параболична към линейна кинетика на процеса на окисление на циркониевите сплави се извършва след достигане на предварително зададена стойност за дебелината на окисления слой. Тъй като в действителност преходът от параболична към линейна кинетика зависи не само от дебелината на окисления слой, но и от температурата на сплавта, е невъзможно да бъде избрана еднозначно точната стойност на дебелината на окисления слой, при която да се осъществява преходът към ускорено окисляване на циркония.



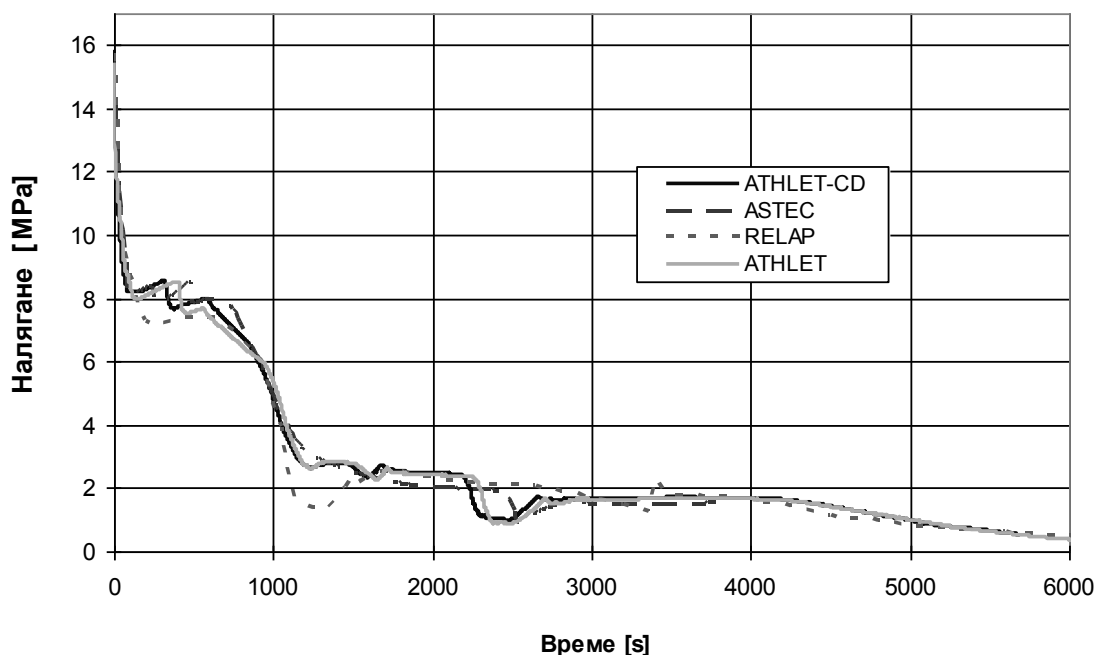
Фигура 2. Нодализационна схема на активната зона

Резултати от изчисленията

Началните условия на модела съответстват на номиналните параметри на блока. Симулирана е авария с теч на студената част на четвърти циркуляционен кръг с условен диаметър 100 mm, съпроводена с пълна загуба на електрозахранване. В резултат на инициращото събитие системите, които осигуряват втора категория на електрозахранване, не са разполагаеми. В анализите с четирите кода е приет отказ на БРУ-А на парогенераторите. Неутронно-физичните характеристики на активната зона отговарят на края на горивната кампания на реактора. При провеждане на пресмятанията не са отчитани операторски действия.

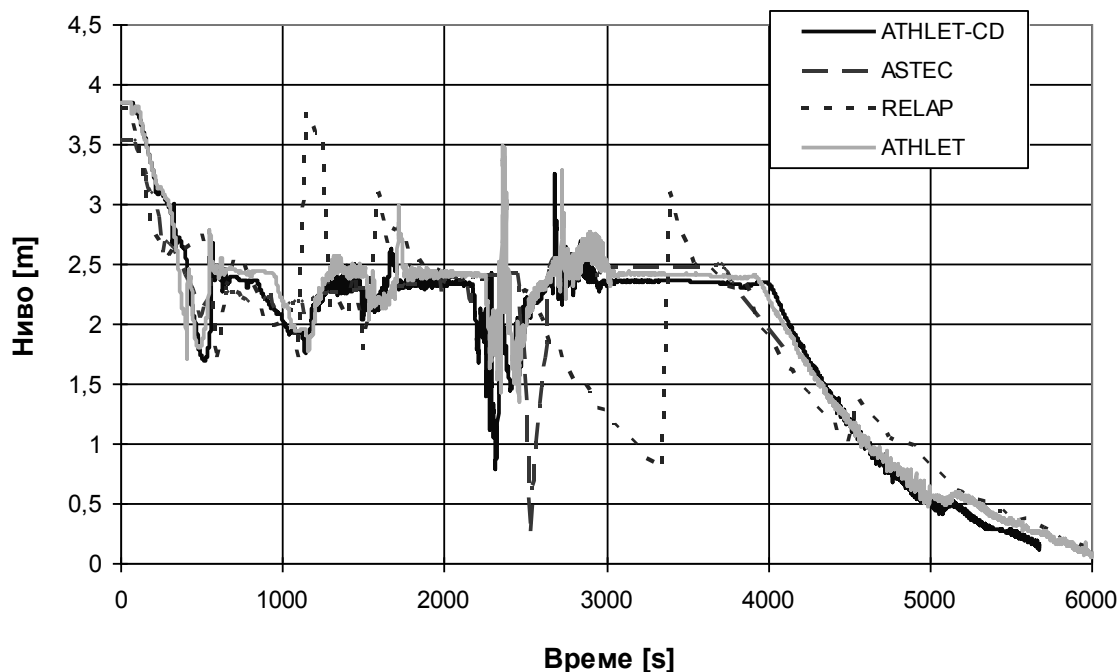
За проверка на коректността на модела за кода ATHLET-CD са използвани резултатите от кодовете ATHLET-2.1A, RELAP5mod3.2 и ASTEC-2.1, представени подробно в [2]. Сравнени са получените резултати за налягането над активната зона, нивото на водата в активната зона и максимална температура на обвивките на топлоотделящите елементи.

На Фигура 3 се наблюдава добро съвпадение на налягането и при четирите кода. Като резултат от разгерметизирането на първи контур налягането бързо се понижава. В първите 15 минути от началото на аварията и при четирите кода налягането се задържа около 8.0 MPa, след което се установява приблизително на 2 MPa за продължителен период от време.

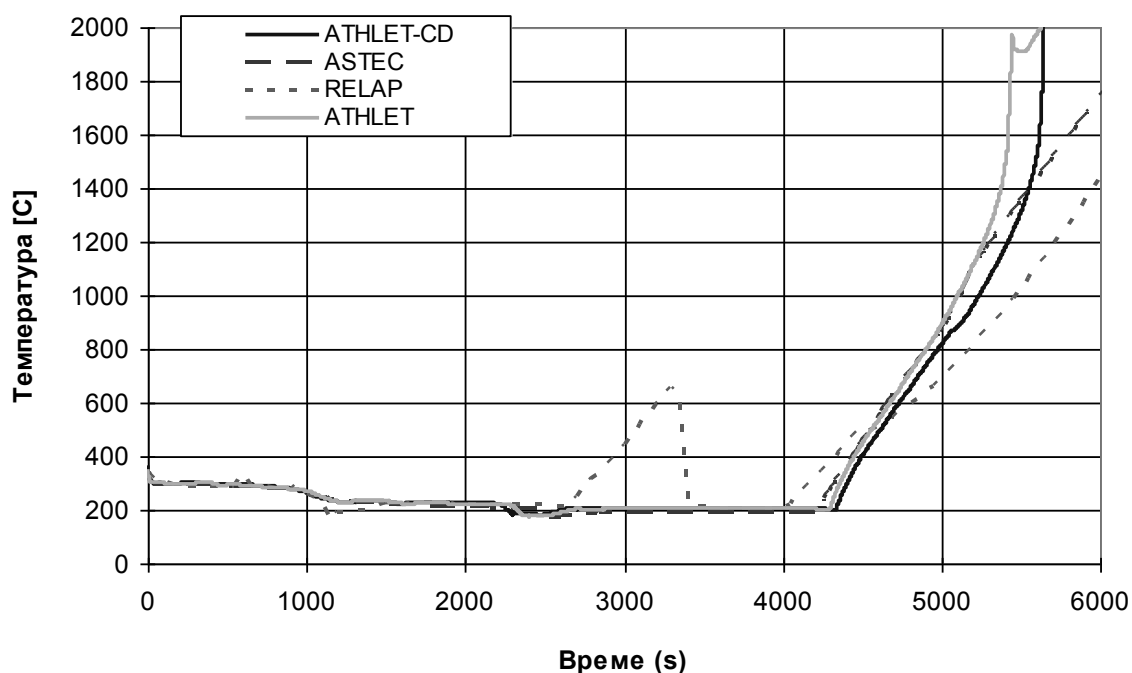


Фигура 3. Налягане над активната зона на реактора

На Фигура 4 е показано нивото на водата в активната зона. Трайното оголване на активната зона започва най-рано при RELAP5 (3504 секунди). При кода ASTEC-2.1 възниква 3748 секунди след началото на аварията, при ATHLET-2.1A 3941 секунди, а най-късно при ATHLET-CD2.1A – 4023 секунди.



Фигура 4. Ниво на водата в активната зона на реактора



Фигура 5. Максимална температура на обвивката на ТОЕ

На Фигура 5 са представени максималните температури на обвивката на топлоотделящите елементи, изчислени от четирите кода. Единствено RELAP5 предсказва повишение на температурата от 216°C до около 650°C от 2600-та до 3500-та секунда. При другите три изчисления такова повишаване не се наблюдава. При RELAP5 активната зона е оголена за по-дълъг период от време (Фигура 4), което води до повишаване на температурите на топлоотделящите елементи. За модела на ATHLET-CD2.1A в 5419 секунда след началото на аварията се осъществява преход към тежка авария поради достигане на температура на повърхността на циркониевите обвивки от 1200°C. При модела

за ATHLET-2.1A температурата се достига в 5267 секунда, при ASTEC-2.1 в 5322 секунда, а при RELAP5mod3.2 – в 5724 секунда. На графиките се забелязва много сходният характер на кривите за кодовете ATHLET-2.1A и ATHLET-CD2.1A, като при ATHLET-2.1A разгръването е малко по-бързо. При ATHLET-CD2.1A и ASTEC-2.1 пароциркониевата реакция се изчислява, като се отчитат и измененията в геометрията на топлоотделящите елементи.

Основната разлика между кодовете ATHLET-2.1A и ATHLET-CD2.1A се състои в това, че при ATHLET-CD2.1A се симулира разрушаването на топлоотделящите елементи (деформиране, пропукване, разтопяване), докато при кода ATHLET-2.1A геометрията на топлоотделящите елементи остава непроменена по време на цялата симулация. Тази разлика оказва най-голямо влияние при изследването на пароциркониевата реакция с двата кода. При ATHLET-CD2.1A е възможно симулиране на окисляването и на вътрешната повърхност на обвивката на топлоотделящия елемент след разрушаване на нейната цялост, докато при ATHLET-2.1A е възможно симулиране само на окисляването на външната повърхност.

Заключение

Създаденият математически модел на реактор ВВЕР-1000 за компютърния код ATHLET-CD обогатява съществуващите методи и средства за изследване на надпроектни и тежки аварии на ЯЕЦ с реактори тип ВВЕР-1000/В-320. Проведеният сравнителен анализ на резултатите от компютърните кодове ATHLET-CD2.1A, ATHLET-2.1A, ASTEC-2.1 и RELAP5mod3.2 при изследване на една и съща надпроектна авария показва, че основните параметри на активната зона имат подобен характер. Това дава основание да се приеме, че кодът ATHLET-CD2.1A и разработеният модел могат да бъдат прилагани за изследване на надпроектни аварии при реактори от тип ВВЕР-1000.

В настоящето изследване е разгледана само ранната фаза на надпроектната авария, т.е. не е изследвано развитието на тежката фаза на аварията – разтопяване на активната зона, нейната релокализация и разкъсването на корпуса на реактора. Предмет на бъдеща работа е валидацията на модела при анализ на процесите в късната фаза на надпроектна авария.

Литература:

- [1] Георгиев Й., Вл. Велев, "Модел на ядрен енергиен блок с реактор тип ВВЕР-1000 В-320 с компютърния код ATHLET-2.1A", Научна конференция на ЕМФ, Созопол, 2011 г.
- [2] Георгиев Й., Д. Димов, Б. Калчев, "Сравнителен анализ на резултатите между компютърните кодове ATHLET-2.1A, RELAPmod3.2 и ASTEC-2.1 при изследване на една и съща надпроектна авария", Научна конференция на ЕМФ, Созопол, 2011.
- [3] Approaches and Tools for Severe Accident Analysis for Nuclear Power Plants, Safety Report Series № 56, IAEA, Vienna, Austria, 2008.
- [4] Trambauer K., Bals C., Schubert J., Austregesilo H., ATHLET-CD Mod-2.1 Cycle A – User's Manual, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 2006.

Автори:

Маг. инж. д-р Йото Георгиев Георгиев, y_g_g@abv.bg

Доц. д-р Калин Боянов Филипов, Технически Университет – София, катедра Топлоенергетика и ядрена енергетика, 02/965 2297, filipov@tu-sofia.bg.

Проф. д-р Владимир Асенов Велев, Технически Университет – София, катедра Топлоенергетика и ядрена енергетика, 02/965 2297, v.velev@tu-sofia.bg