

## МАТЕМАТИЧЕСКИ МОДЕЛ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТЕМПЕРАТУРНИТЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИ РАЗПРОСТРАНЕНИЕ НА ПАРОВОДНА СМЕС В СИСТЕМА ОТ СВЪРЗАНИ ПОМЕЩЕНИЯ

К. Филипов<sup>1</sup>

*Ключови думи:* разпространение на пароводна смес, ядрена безопасност, механика на флуидите

*Научна област:* математическо моделиране (моделиране на ядрени реактори)

### РЕЗЮМЕ

Разпространението на паровъздушна смес в система от свързани помещения е процес, който е труден за изследване дори и със съвременни изчислителни средства. В статията е предложен математически модел на част от компютърен алгоритъм за провеждане на изследване на вътрешни наводнения. По-конкретно е изложена методиката за определяне на разпространението на паровъздушна смес и на изменението на температурата. В подкрепа на модела е представено примерно изследване на реален обект – част от обстройката на АЕЦ с реактор ВВЕР-1000.

### Въведение

Осигуряването на ядрената безопасност е един от най-важните проблеми, които определят възможността за по-нататъшното развитие на ядрената енергетика. Целият жизнен цикъл на ЯЕЦ – от проектирането до извеждането от експлоатация, се съпровожда от дейности, насочени към осигуряване на нейната безопасност.

Съгласно действащите у нас нормативно-технически документи и изискванията на документите на МААЕ основната цел на безопасността на всички етапи от жизнения цикъл на АЕЦ е предприемането на ефективни мерки за избягване на тежки аварии и защита на персонала и населението чрез предотвратяване на изхвърлянето на радиоактивни продукти в околната среда.

---

<sup>1</sup> Калин Боянов Филипов, гл. ас. д-р, кат. „Топло- и ядрена енергетика“, Технически университет – София, e-mail: filipov@tu-sofia.bg

Наличието на вода или пара в някои сградни обеми може да бъде събитие-инициатор на отказ по обща причина, тъй като в резултат от него може да се получи нарушаване на разполагаемостта на системи и елементи, пряко свързани с ядрената безопасност [1].

## **Разпространение на вода и паровъздушна смес**

За определяне на разпространението на водата и на паровъздушната смес от помещението, което е източник на наводнение, към останалите помещения във функция на времето, е необходимо да се отчете изтичането през взаимните връзки между тях. Тези връзки могат да бъдат херметична врата, нехерметична врата, отвор в стена, отвор в под, отвор в таван, отвор в под без вентил за дренажното трапче и отвор в под с вентил за дренажното трапче.

Разпространението на водата в системата от взаимосвързани помещения се обуславя от хидростатичния напор, определен от нивата на водата във всяко от тях, с отчитане на техните коти, както и на особеностите на взаимните връзки между тях [1].

Основно предположение, залегнало в съставения алгоритъм, е че изтичащият флуид е в еднофазно състояние (вода), независимо от температурата и налягането му. Това предположение позволява задачата за изследване на динамиката на вътрешно наводнение да бъде сведена до анализ на разпространението единствено и само на водния поток. В действителност това не е така. В повечето случаи, когато източник на наводнение е поток с по-висока енергия, се наблюдава процес на самоизпарение, съпроводен с разпространение на паровъздушната смес от помещението-инициатор на наводнението към свързаните с него помещения. Разпространението на тази смес става на основата на физически закони, които са коренно различни от законите за разпространение на водната фаза [4]. Отчитането на движението на получената паровъздушна смес е от особена важност за безопасността на ЯЕЦ, тъй като нейната кондензация може да доведе до неработоспособност на системите за безопасност и на системите, свързани с безопасността.

Основната движеща сила, която обуславя разпространението на паровъздушната смес, е разликата в налягането между отделните взаимосвързани помещения. Това налага създаването на програмен алгоритъм за математическо моделиране на разпространението на паровъздушна смес [2]. Алгоритъмът е основан на уравненията на масовия и енергийния баланс, приложени за системата от кореспондиращи си помещения, с отчитане на техните взаимни връзки.

Движещият напор се определя от разликата в налягането (температурата) в основното и кореспондиращото му помещение, отнесени към конкретен отвор. Елементарна проверка показва, че не е възможно да се използват класическите зависимости за определяне на масовия разход на газ, който изтича през стесняваща се дюза. Големите размери на свързващите отвори, разглеждани като стесняващи се дюзи, определят много голямо проходно сечение на изтичане и съответно много големи масови разходи. Това обстоятелство налага използването на косвени методи за определяне на масовите разходи на парата и въздуха, които преминават през отворите на взаимосвързаните помещения. Допълнително затруднение представлява фактът, че две съседни помещения могат да бъдат свързани с повече от един отвор.

За определяне на масовите разходи на пара и вода е съставен специализиран алгоритъм. Той обхваща случая, когато разглежданото помещение има връзки с няколко съседни помещения. Тогава системата от взаимосвързани помещения се разглежда

като едно общо помещение. Уравненията на масовите баланси на въздуха, пароводната смес и на енергията се определят за общата съвкупност от взаимосвързани помещения.

Алгоритъмът е изграден в следната последователност. Първоначално се определя групата от взаимосвързани помещения, кореспондиращи си с разглежданото помещение. Техните индексни обозначения се съхраняват в отделен масив. Индексните обозначения са необходими, тъй като с тяхна помощ впоследствие могат да бъдат определени техните параметри, получени от предходната стъпка на решението (маси на вода, пара и въздух, температура и налягане). Тогава общите маси на водата, парата и въздуха в системата от взаимосвързани помещения се определят съобразно следните зависимости:

$$M_a = \sum_{i=1}^n M_{a,i} ; \quad (1)$$

$$M_g = \sum_{i=1}^n M_{g,i} ; \quad (2)$$

$$M_f = \sum_{i=1}^n M_{f,i} . \quad (3)$$

В горните уравнения са използвани следните означения:

$n$  е брой на взаимосвързаните помещения;

$M_a, M_{a,i}$  – обща маса на въздуха във всички взаимосвързани помещения и маса на въздуха в помещение  $i$ ;

$M_g, M_{g,i}$  – обща маса на парата във всички взаимосвързани помещения и маса на въздуха в помещение  $i$ ;

$M_f, M_{f,i}$  – обща маса на водата във всички взаимосвързани помещения и маса на въздуха в помещение  $i$ .

Общата енталпия на системата от взаимосвързани помещения се определя с помощта на уравнението на енергийния баланс, приложено за системата от взаимосвързани помещения

$$U = \sum_{i=1}^n U_i , \quad (4)$$

където

$$U_i = M_{f,i} h_{f,i}(P_{w,i}) + M_{g,i} h_{g,i}(P_{w,i}) + M_{a,i} c_{v,i} T_i . \quad (5)$$

Общата маса на пароводната смес  $M_w$  в системата от взаимосвързани помещения е

$$M_w = M_g + M_f . \quad (6)$$

Следващата стъпка от алгоритъма се състои в определянето на градиентите на изменението на масите на парата и въздуха във всяко едно от групата взаимосвързани помещения. Това изменение в действителност представлява масовите разходи на пара и въздух в отделните помещения на групата. Тук трябва да се отбележи, че изменението на обемните, съответно и масовите разходи на водата, се извършва по методиката, изложена по-горе.

По отношение на определянето на масовия разход на въздуха се подхожда по следния начин. Тъй като взаимосвързаните помещения имат едни и същи термодинамични параметри, то преразпределянето на масите на въздуха във всяко едно от тях се извършва на основата на съотношението на обемите на конкретните помещения  $V_i$  спрямо общия обем  $V$ , т.е.

$$M'_{a,i} = M_a \frac{V_i}{V}. \quad (7)$$

В горното уравнение с  $M'_{a,i}$  е означена новата стойност на масата на въздуха в помещение  $i$ . Тогава масовият разход на въздуха за помещение  $i$  се определя от зависимостта

$$\Delta M_a = M'_{a,i} - M_{a,i}. \quad (8)$$

Масовият разход на парата се определя по косвен път. Предварително за помещението от групата на взаимосвързаните помещения, което има най-висока температура и следователно е източник на масов разход на пара към съседните му помещения, се определя изменението на енталпията му в разглеждания момент от времето, съобразно следната зависимост:

$$\Delta U_1 = M_{f,i} [h_f(P_w) - h_{f,i}(P_{w,i})] + M_{g,i} [h_g(P_w) - h_{g,i}(P_{w,i})], \quad (9)$$

където  $M_{f,i}$  е масата на водната фаза в помещението с най-висока температура, kg ;

$M_{g,i}$  – масата на парната фаза в помещението с най-висока температура, kg ;

$h_f$  – енталпията на насищане на водата при налягане  $P_w$ , което отговаря на парциалното налягане на пароводната смес на групата от свързани помещения, J/kg ;

$h_{f,i}$  – енталпията на насищане на водата при налягане  $P_{w,i}$ , което отговаря на парциалното налягане на пароводната смес на помещението с най-висока температура, J/kg ;

$h_g$  – енталпията на насищане на парата при налягане  $P_w$ , което отговаря на парциалното налягане на пароводната смес на групата от свързани помещения, J/kg ;

$h_{g,i}$  – енталпията на насищане на парата при налягане  $P_{w,i}$ , което отговаря на парциалното налягане на пароводната смес на помещението с най-висока температура, J/kg .

Тъй като преносът на маса и енергия от помещението с най-висока температура към останалите, свързани с него, се свежда до изтичане на пара, то по косвен път може да бъде определен този разход чрез използване на получения израз (9). Преносът на енергия чрез водната фаза се определя в отделна процедура за масовите разходи на водната фаза през отворите. При така възприетия подход се отчитат и процесите на самоизпарение (самокондензация) между водната и парната фаза със съответстващия им обмен на енергия.

$$\Delta M_{g,i} = \frac{\Delta U_1}{h_{g,i}(P_{w,i})}. \quad (10)$$

При определяне на изменението на енталпията в помещението с най-висока температура в резултат на изтичането на парна фаза към съседните помещения се използва изразът, определен от (9). Очевидно е, че тази стойност е с отрицателен знак, съобразно приетите предположения.

Изменението на енталпията в резултат на изтичане на водната фаза през отворите, които определят връзките между помещенията, се съхранява в специална променлива за всяко помещение. Тези стойности се получават за всяко помещение и за всеки отвор чрез използване на зависимости за определяне на обемните разходи. След преминаване от обемни към масови разходи изменението на енталпията става съобразно следното уравнение

$$\Delta U_{f,i} = \Delta U_{f,i} + \Delta M_{f,j} h_f(P_w). \quad (11)$$

В горния израз са използвани следните означения:

$\Delta U_{f,i}$  е изменението на енталпията за помещение  $i$  в резултат на обмен на водната фаза,  $W$ ;

$\Delta M_{f,j}$  – масов разход на вода през  $j$ -тия отвор на помещение  $i$ ,  $\text{kg/s}$ ;

$h_f(P_w)$  – енталпия на водната фаза. В зависимост от посоката на изтичането тя се определя във функция от парциалното налягане на пароводната смес за текущото помещение (ако е налице изтичане) или за кореспондиращото му помещение (при случай на втичане).

Определянето на масовите разходи на парата във взаимосвързаните помещения става чрез използване на обемните дялове за всяко помещение. Съобразно условията за масовия баланс сумата от тези масови разходи трябва да бъде равна на  $\Delta M_{g,i}$ . За целта се използва следното уравнение

$$\Delta M_{g,k} = -\Delta M_{g,i} \frac{V_k}{V - V_i}, \quad (12)$$

където  $\Delta M_{g,k}$  е изменението на масовия разход на парната фаза в помещение  $k$ , свързано с помещение  $i$ , което е с най-висока температура от групата на взаимосвързаните помещения,  $\text{kg/s}$ ;

$V_k, V_i$  – обеми на помещение  $k$  и на помещение  $i$ ,  $\text{m}^3$ .

В горното уравнение от общия обем  $V$  се изважда обемът на помещението с най-висока температура, тъй като разпределянето на масовите разходи на пара не се извършва за помещение  $i$ .

По аналогичен начин се определя и изменението на енталпията в резултат на преноса на пара във всяко едно от взаимосвързаните помещения, т.е.

$$\Delta U_{g,k} = -\Delta U_1 \frac{V_k}{V - V_i}. \quad (13)$$

Изменението на енталпията в резултат от преноса на въздух се определя от следния израз:

$$\Delta U_{a,k} = \Delta M_a c_v T. \quad (14)$$

Общото изменение на енталпията за всяко от взаимосвързаните помещения ще съдържа три компонента, съответно отчитащи преноса на вода, пара и въздух. Чрез използване на уравнения (11), (13) и (14) това изменение ще бъде

$$\Delta U = \Delta U_g + \Delta U_f + \Delta U_a. \quad (15)$$

С това първата стъпка от алгоритъма е завършена.

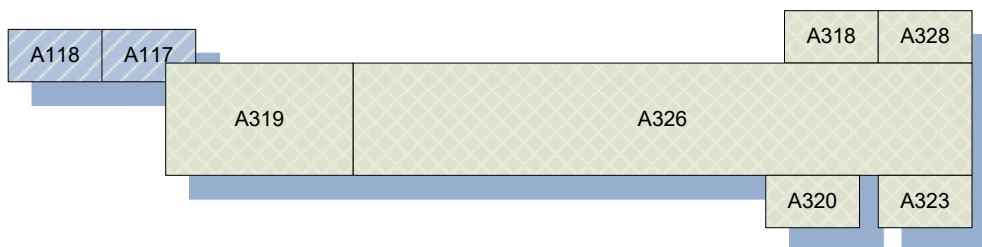
Следващата стъпка се състои в определяне на налягането, температурата и масата на водата и на парата във всяко от разглежданите помещения на обстройката на ЯЕЦ. За целта за всяко помещение се прилага алгоритъмът, изложен по-горе. За неговото реализиране се използват стойностите на нарастванията на масата на водата, парата и въздуха, както и нарастването на енталпията, получени по-горе. Чрез изравняване на уравненията на енталпийния баланс, получени по два начина, може да бъде изчислена по итеративен път новата температура в конкретно помещение. Следствие от нея е парциалното налягане на пароводната смес, парциалното налягане на въздуха и общото налягане в помещението за конкретна стъпка от транзienta.

### **Примерен анализ на разпространението на паровъздушна смес и свързаното с нея изменение на температурата**

За провеждане на примерен анализ е избрана системата за подхранване и продухване на първи контур на реактори ВВЕР-1000 [3]. На фиг. 1 е показано схематично взаимното разположение на част от помещенията от обстройката на АЕЦ Козлодуй – блок 6, в които има инсталирано оборудване, тръбопроводи и арматура на част от системата за продухване и подхранване на първи контур (ТК). Избраните помещения са разположени на две коти и имат различни типове свързващи ги отвори.

Симулираното събитие е скъсване на тръбопровод в помещение А117, което представлява вентилационна камера за подхранващи помпи. Разположено е на кота 0.00 m, с височина 3.6 m и обем 104 m<sup>3</sup>. Помещението има пряка връзка с помещения АК118 и А319. Помещение АК118 представлява шлюз, разположен на кота 0.00 m, с височина на тавана 3.6 m и обем 50 m<sup>3</sup>. Връзките му с помещение А117 (инициаторът на наводнението) са отвор в стената и херметична врата. В помещение А319 са инсталирани топлообменници и арматура на системата за подхранване на първи контур. То е разположено на кота 6.60 m, с височина 6.60 m и общ обем приблизително 1000 m<sup>3</sup>. Комуникацията между него и помещение А117 се осъществява чрез триъгълен отвор в пода. Помещение А326 представлява коридор, разположен

на кота 6.60 m, с височина на тавана 6.60 m и обем 4574 m<sup>3</sup>. Връзките между помещението А326 и А319, които са на една и съща кота, са херметична врата и два кръгли отвора в стената.



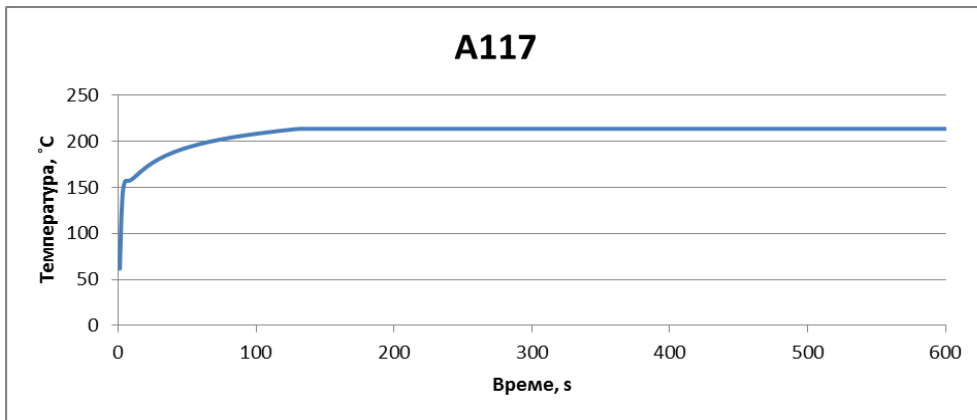
Фиг. 1. Схематично разположение на помещенията

Изследваното изходно събитие е изтичане през едностранно гилотинно скъсване на тръбопровод с диаметър 133 mm (налягане на флуида 15.7 МРа, температура 289 °С и разход през скъсването 685 kg/s). Продължителността на изтичането е 312 секунди, а на транзиента – 600 секунди.

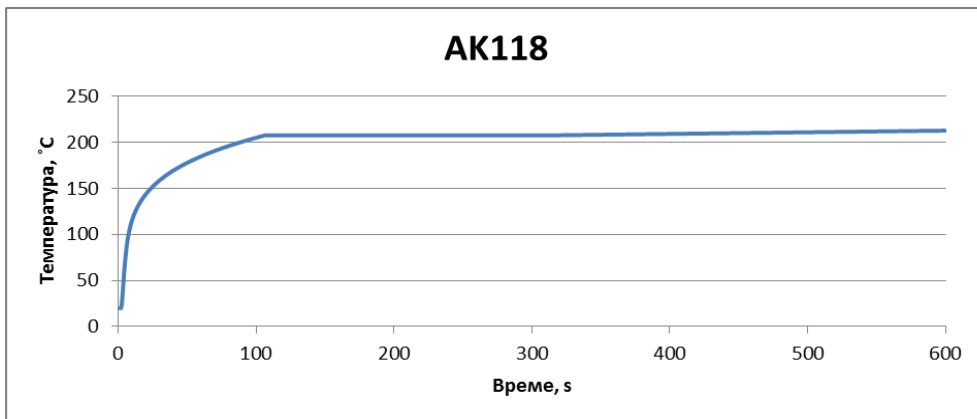
**Функционален анализ:** Основните характеристики на преходния процес са пълно разхерметизиране на система ТК, загуба на топлоносител от първи контур, радиационно замърсяване, повишена температура в 87 помещения (около 105°С при абсолютно налягане 0.25 МРа), напълно наводняване на помещението А117 и частично наводняване на помещението А319. Друга характеристика на преходния процес е изтичане на пароводна смес и кондензация на пара върху стените и оборудването на помещенията от обстройката на ЯЕЦ. Допълнителна кондензация на пара ще бъде породена от тръбопроводи на система ТК, тръбопроводи за техническа вода и въздуховоди.

Температурите на паровъздушната смес в разглежданите помещения са показани на фиг. 2, фиг. 3 и фиг. 4. В помещението, в което е възникнало инициращото събитие (А117), температурата на паровъздушната смес рязко се повишава и достига до 213 °С. Тази висока стойност е в резултат на високата температура на изтичащата вода (симулирано е скъсване на високоенергиен тръбопровод). След запълването на помещението с вода температурата остава постоянна. Подобно изменение на температурата се наблюдава и в пряко свързаното с него помещението А319. Температурата на паровъздушната смес в А319 нараства до момента на запълване на свързващия го отвор с помещението А117 с вода. Повишението на температурата се дължи на проникващата парна фаза от помещението-инициатор. След това тази температура започва да се понижава в резултат на процесите на самоизпарение на постъпващата през отвора в пода вода. Налягането на паровъздушната смес в разглежданите помещения нараства с висок градиент до достигане на стойности около 2 МРа. След запълването на А117 с вода налягането в него става равно на нула, поради липса на пароводна смес. Ходът на налягането в помещението А319 следва изменението на температурата в него. Същото се отнася и за помещението А318.

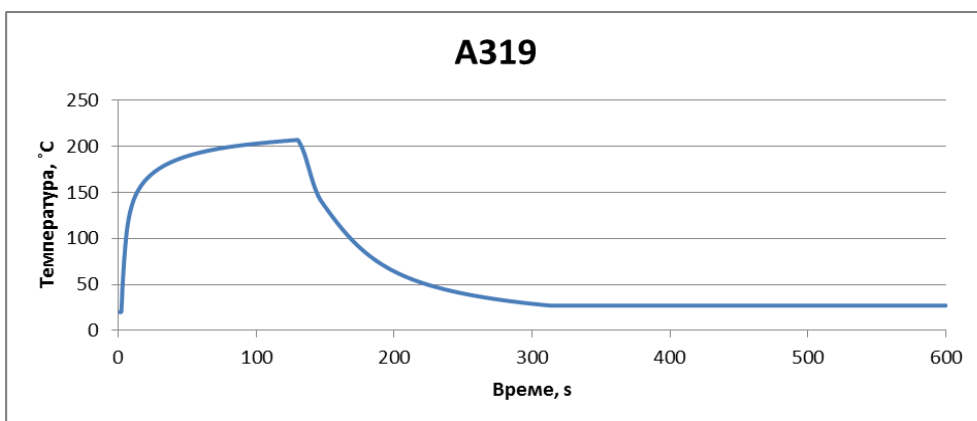
**Коментари:** Този случай *не може* да бъде класифициран като приемлив, тъй като резултатните стойности на температурата в помещението-инициатор на наводнението и директно свързаните с него помещения са много над допустимите стойности. Необходимо е предприемане на превантивни мерки, за да бъде ограничено разпространението на радиоактивност и влажност.



Фиг. 2. Температура в помещении A117



Фиг. 3. Температура в помещении AK118



Фиг. 4. Температура в помещении A319

## Изводи

Нерегламентираното разпространение на водни потоци или пара в сградни структури може да доведе до сериозни последствия от гледна точка на безопасността. От една страна, непредвиденото натрупване на големи водни обеми причинява значително натоварване на строителните конструкции, причинено от масата на водните обеми. Често анализите на вътрешните наводнения отчитат именно само разпространението на водата и максималните стойности на нейното ниво и маса. От гледна точка на работоспособността на електронните устройства, електродвигателите и друго чувствително към влагата оборудване е от изключителна важност отчитането и на запаряването в изследваните обеми. Една от най-честите причини за отказ на електронно оборудване в индустриални обекти е повишената влага, често получена в резултат на кондензация. Друг съществен проблем, който може да възникне както в ядрените, така и в конвенционалните обекти, е ограничаване на достъпа на хора в резултат на повишената температура на атмосферата. По този начин става невъзможно аварийното обслужване на системи и компоненти, ръчното пожарогасене, евакуацията и други дейности, свързани с преминаване на хора през засегнатите сградни обеми.

Във връзка с изложените проблеми е разработен и представен математически модел на алгоритъм, който е заложен в компютърен софтуер за изследване на ефектите, причинени от разпространението на пара и вода в сградни структури. Софтуерът изследва разпространението на водните и паровъздушните потоци, изменението в температурата, налягането и други параметри на средата.

За оценка на достоверността на алгоритъма и на изградения на неговата основа софтуерен продукт е представена част от примерно изчисление, което се основава на реални данни за флуидната система и сградната структура на обстройката на реактор ВВЕР-1000.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Велев, В., Филипов, К.* Симуляционно моделиране на вътрешни наводнения в ЯЕЦ, Енергиен форум, Варна, 11–14 юни, 2008.
2. *Филипов, К.* Разпространение на паровъздушна смес при вътрешно наводнение в обстройката на ЯЕЦ, –Годишник на УАСГ 2004–2009, София, 2009.
3. *Филипов, К., Велев, В.* Изследване на вътрешно наводнение при скъсване на високоенергиен тръбопровод от система ТК, разположен в обстройката на реактор ВВЕР-1000, Научна конференция на БЯД, В. Търново, 11–14 ноември 2009, "Доклади на БЯД 2010", Том 14, 79-85.
4. *Filipov, K., Philipov, S.* Code development for internal flooding in NPP and benchmark analyses, 8th International Conference on Nuclear Option in Countries with Small and Medium Electricity Grids, Dubrovnik, Croatia, 16–20 May 2010.

Постъпила: януари, 2012

# MATHEMATICAL MODEL FOR TEMPERATURE CHANGES ANALYSIS WHEN WATER AND STEAM MIXTURE IS RELEASED IN LINKED COMPARTMENTS SYSTEM

**K. Filipov<sup>1</sup>**

*Keywords: propagation of steam-water mixture, nuclear safety, mechanics of fluids*

*Research area: mathematical modeling (modeling of nuclear reactors)*

## ABSTRACT

The distribution of steam-water mixture in linked compartments system is a process that is difficult to study even with modern computing tools. In this paper a mathematical model and a computational algorithm are proposed for studying internal flooding. In particular, a methodology is described for determining the distribution of steam-water mixture and the change in temperature. A real model is given describing a part of the VVER-1000 reactor building.

---

<sup>1</sup> Kalin Boyanov Filipov, Assistant Professor, PhD, Department of Heat and Nuclear Energetic, Technical University of Sofia, 1756 Sofia, Bulgaria, e-mail: filipov@tu-sofia.bg