***А.Г. Соловьев, студ., И.А. Чусовк.т.н, доцент, ИАТЭ, г. Обнинск***

**Физическое и математическое обоснование теплогидравлической модели понятийного тренажера реактора ЭГП-6**

Разработка понятийных тренажеров, с той или иной степенью детализации физических процессов, является достаточно сложной и неоднозначной в физическом и математическом плане задачей. При теплогидравлическом Ырасчете энергетических установок необходимо решать задачи о начальном прогреве, режиме расхолаживания и переходных процессах, как в контуре циркуляции, так и в самой реакторной установке. При этом результаты расчета должнылибо: 1) соответствовать регламентным нормам скорости разогрева, нормальной эксплуатацииили расхолаживания, предъявляемые к элементам конструкции тракта циркуляции; 2) отражать сценарии развития проектных или запроектных аварийных ситуаций.

Представляется очевидным, что описать все многообразие развития событий в различных элементах реакторной установки и контура циркуляции в рамках единой математической модели не представляется возможным. И возникает необходимость разделять эти модели, как для различных элементов оборудования, так и для различных физических процессов.

В настоящей работе приводится описание теплогидравлической модели течения в активной зоне и контуре циркуляции реакторной установки уран-графитового типа ЭГП-6. Вследствие недостатка места кратко описывается только математическая модель течения однофазного теплоносителя в контуре циркуляции.

Исходная система уравнений для движения некипящего теплоносителя в контуре циркуляции имеет следующий вид [1]:

* уравнение неразрывности

|  |  |
| --- | --- |
| $$\frac{∂ρ\_{f}}{∂τ}+\frac{∂}{∂s}\left(ρ\_{f}W\_{f}\right)=0$$ | (1) |

* уравнение импульса

|  |  |
| --- | --- |
| $$\frac{∂\left(ρ\_{f}W\_{f}\right)}{∂τ}+\frac{∂}{∂s}\left(ρ\_{f}W\_{f}^{2}\right)=-\frac{∂P}{∂s}-\sum\_{i=0}^{N}F\_{i}-ρ\_{f}gCos\left(θ\right)$$ | (2) |

* уравнение энергии теплоносителя

|  |  |
| --- | --- |
| $$ρ\_{f}с\_{f}F\_{f}\frac{∂T\_{f}}{∂τ}+ρ\_{f}с\_{f}W\_{f}F\_{f}\frac{∂T\_{f}}{∂s}=П\_{f}α\_{f}\left(T\_{k}-T\_{f}\right)+П\_{ТО}k\_{ТО}\left(T\_{Т}-T\_{f}\right)$$ | (3) |

* уравнение энергии для стенки канала

|  |  |
| --- | --- |
| $$ρ\_{k}П\_{f}δ\_{k}с\_{k}\frac{∂T\_{k}}{∂τ}+=k\_{m}П\_{m}\left(T\_{m}-T\_{k}\right)+П\_{f}α\_{f}\left(T\_{k}-T\_{f}\right)$$ | (4) |

* уравнение энергии для окружающих контур масс

|  |  |
| --- | --- |
| $$ρ\_{m}с\_{m}F\_{m}\frac{∂T\_{m}}{∂τ}=П\_{m}k\_{e}\left(T\_{e}-T\_{m}\right)-П\_{m}k\_{m}\left(T\_{m}-T\_{k}\right)$$ | (5) |

В качестве начальных условий используются:

* величина расхода по контуру циркуляции

$G\_{f}=ρ\_{f}W\_{f}F\_{f}$;

* начальная температура теплоносителя в контуре циркуляции

*Tinp* = *Const*.

В качестве дополнительных условий используются:

* гидравлическая характеристика контура (задается геометрическими параметрами и особенностями компоновки контура циркуляции)

|  |  |
| --- | --- |
| $$Δp\_{k}=Δp\_{kN}\left(\frac{G\_{f}}{G\_{f}}\right)^{2}$$ | (6) |

* гидравлическая характеристика нагнетателя (задается эксплуатационными характеристиками нагнетателя)

|  |  |
| --- | --- |
| $$Δp\_{с}=Δp\_{с0}\left[1-\left(\frac{G\_{f}}{G\_{fN}}\right)^{2}\right]$$ | (7) |

Здесь: *ρf* – плотность теплоносителя, [кг/м3];*Wf* – скорость теплоносителя, [м/с];*Ff* – площадь проходного сечения канала, [м2];Δ*p*c– действительный напор насоса, [Па];Δ*p*c0 – номинальный напор насоса, [Па];Δ*p*k – перепад давления на контуре, [Па];Δ*p*kN – номинальный перепад давления на контуре, [Па];Пf – периметр канала, [м];ПТО – периметр теплообменника как функция координаты *S*, [м];Пm – периметр окружающих масс как функция координаты *S*, [м];*cf* – теплоемкость теплоносителя, [кДж/(кг⋅К)];*ck* – теплоемкость стенки канала, [кДж/(кг⋅К)];*cm* – теплоемкость окружающих масс [кДж/(кг⋅К)];*αf* – коэффициент теплоотдачи, [Вт/(м град)];*k*ТО – коэффициент теплоотдачи теплообменника, [Вт/(м град)];*ke* – коэффициент теплоотдачи от электронагревателя к окружающим массам, [Вт/(м град) ];*km* – коэффициент теплоотдачи от окружающим масс к стенке канала (с учетом контактных термических сопротивлений) , [Вт/(м град) ];*Tf* – температура теплоносителя, [К];*Tk* – температура стенки канала, [К];*Tm* – температура электронагревателя, [К];*Te* – температура окружающих масс, [К].

Для решения системы дифференциально-алгебраических уравнений (1) – (7) была разработана расчетная программа, позволяющая решать нелинейные уравнения следующего вида:

|  |  |
| --- | --- |
| $$\sum\_{i=1}^{N}\left[P\_{ij}\frac{∂U\_{j}}{∂t}+\frac{∂F\_{i}}{∂x}=C\_{i}\frac{∂D\_{i}}{∂x}+S\_{i}\right]$$ | (8) |

$$U\left(x,t\right)=\left[U\_{1}\left(x,t\right), U\_{2}\left(x,t\right),……,U\_{N}\left(x,t\right)\right]$$

Здесь *N* – количество дифференциальных уравнений в частных производных. В (8) *Pij*, *Fij*,*Cij*определяются как алгебраические, необязательно линейные уравнения

$$P\_{ij}=P\_{ij}\left(x,t,U\right)$$

$$F\_{ij}=F\_{ij}\left(x,t,U\right)$$

$$C\_{ij}=C\_{ij}\left(x,t,U\right)$$

Алгоритм программы основан на методе линий с разностями против потока и регуляризацией[2, 3]. Для проверки правильности работы программы была решена следующая тестовая задача

|  |  |
| --- | --- |
| $$\frac{∂ρ}{∂t}+\frac{∂ρu}{∂x}=0,$$ | (9) |
| $$\frac{∂ρu}{∂t}+\frac{∂}{∂x}\left[ρu^{2}+\left(γ-1\right)\left(h-\frac{ρu^{2}}{2}\right)\right]=0,$$ | (10) |
| $$\frac{∂h}{∂t}+\frac{∂}{∂x}\left[uh+u\left(γ-1\right)\left(h-\frac{ρu^{2}}{2}\right)\right]=0,$$ | (11) |

Давление определяется как

|  |  |
| --- | --- |
| $$p=\left(γ-1\right)\left(h-\frac{ρu^{2}}{2}\right).$$ | (12) |

0 ≤*x*≤ 1 для<*t*≤ 0,2.

Начальные условия

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| *ρ*(x,0) = 1 | *ρu*(x,0) = 0 | *h*(x,0) = 2,5 | для x < 0,5 |
| *ρ*(x,0) = 0,125 | *ρu* (x,0) = 0 | *h*(x,0) = 0,25 | для x> 0,5 |

Здесь *ρ*– плотность; *u* – скорость; *h* – удельная энтальпия; *γ*– показатель адиабаты.

Сравнение результатов численного решения уравнений (9) – (12) для плотности, скорости и давления с аналитическим решением приведены в таблице.

Анализ результатов расчета показал удовлетворительное согласие с имеющимся аналитическим решением.

***Сопоставление численного и аналитического решения***

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ***x*** | ***ρ -* чис-но**  | ***ρ -* точно**  | ***u*–чис-но** | ***u* - точно**  | ***p*–чис-но** | ***p* - точно** |
| ***T = 0,10*** |
| 0,20 | 1,0000 | 1,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 1,0000 | 1,0000 |
| 0,30 | 1,0000 | 1,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 1,0000 | 1,0000 |
| 0,40 | 0,8668 | 0,8775 | 0,1665 | 0,1527 | 0,8188 | 0,8327 |
| 0,50 | 0,4299 | 0,4263 | 0,9182 | 0,9275 | 0,3071 | 0,3031 |
| 0,60 | 0,2969 | 0,2656 | 0,9274 | 0,9275 | 0,3028 | 0,3031 |
| 0,70 | 0,1250 | 0,1250 | 0,0000 | 0,0000 | 0,1000 | 0,1000 |
| 0,80 | 0,1250 | 0,1250 | 0,0000 | 0,0000 | 0,1000 | 0,1000 |
| 0,90 | 0,1250 | 0,1250 | 0,0000 | 0,0000 | 0,1000 | 0,1000 |
| ***T = 0,20*** |
| 0,20 | 1,0000 | 1,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 1,0000 | 1,0000 |
| 0,30 | 0,8718 | 0,8775 | 0,1601 | 0,1527 | 0,8253 | 0,8327 |
| 0,40 | 0,6113 | 0,6029 | 0,5543 | 0,5693 | 0,5022 | 0,4925 |
| 0,50 | 0,4245 | 0,4263 | 0,9314 | 0,9275 | 0,3014 | 0,3031 |
| 0,60 | 0,4259 | 0,4263 | 0,9277 | 0,9275 | 0,3030 | 0,3031 |
| 0,70 | 0,2772 | 0,2656 | 0,9272 | 0,9275 | 0,3031 | 0,3031 |
| 0,80 | 0,2657 | 0,2656 | 0,9276 | 0,9275 | 0,3032 | 0,3031 |
| 0,90 | 0,1250 | 0,1250 | 0,0000 | 0,0000 | 0,1000 | 0,1000 |

**Библиографический список**

1. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С. Гидродинамические расчеты. –Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2007.
2. M. Arnold. Numerically stable modular time integration of multiphysical systems. In K.J.Bathe, editor, Proceedings of the First MIT Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics, Cambridge, MA, June 12-15, 2001, pages 1062–1064, 2001.
3. S.L. Campbell and C.W. Gear. The index of general nonlinear DAEs. NumerischeMathematik, 72(2):173, 196, 1995.