

Е.А. Белоногова, А.А. Бочкарева, И.Р. Макеева, У.Ф. Шереметьева  
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», г. Снежинск  
E-mail: [e.a.belonogova@vniitf.ru](mailto:e.a.belonogova@vniitf.ru)

### Описание процесса спекания

На стадии спекания частицы порошка превращаются в монолитное сплошное твердое тело, форма которого была задана конфигурацией прессовки.

Участок спекания топливных таблеток располагается в составе линии изготовления таблеток, используемых для сборки ТВЭЛов ТВС реакторной установки.

### Этапы фабрикации ядерного топлива



### Описание печи спекания

Для спекания топливных таблеток применяется *проходная высокотемпературная печь толкательного типа*, состоящая из нескольких температурных зон.

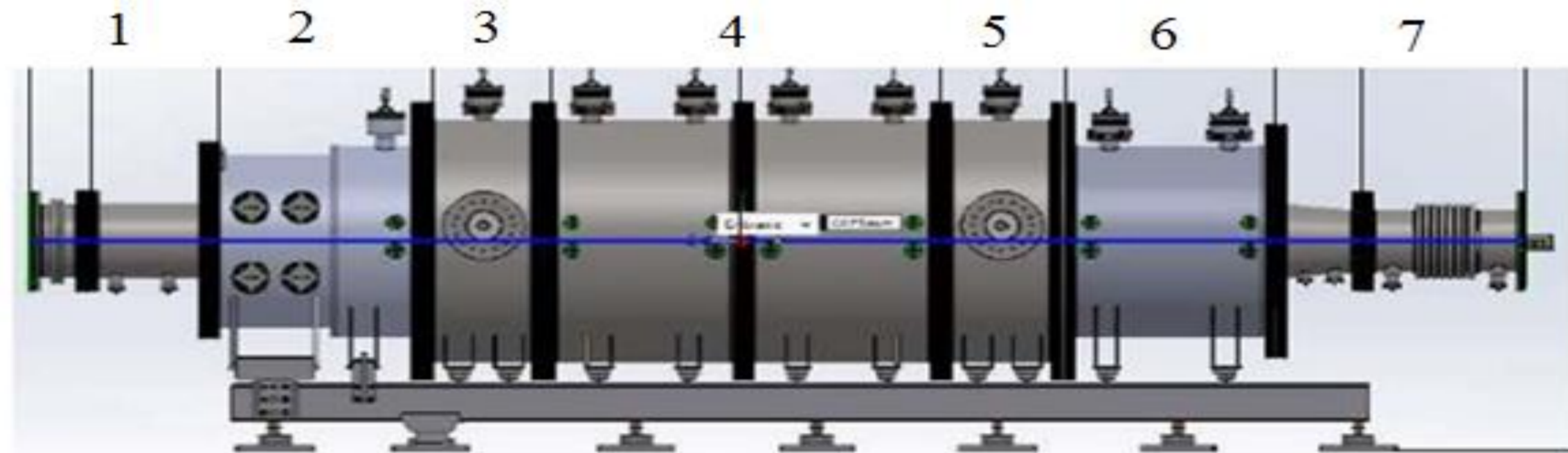


Рисунок 1. Принципиальный вид печи спекания:

- 1 – входной модуль, 2 – зона предварительного нагрева, 3 – зона выпуска газа, 4 – зона спекания, 5 – зона подачи газа, 6 – зона охлаждения, 7 – выходной модуль

Спрессованные топливные таблетки насыпаются в лодочки, перемещающиеся по установке в специальных подложках. В зонах предварительного нагрева и охлаждения осуществляется нагрев и охлаждение лодочек в потоке аргона. Процесс спекания проводится в потоке смеси газов  $N_2+7\%H_2$  при температуре 1800 °С.

### Моделирование процессов теплообмена

Теплообмен между твердыми и жидкими веществами моделируется с помощью решателя chtMultiRegionFoam и chtMultiRegionSimpleFoam (стационарный расчет) открытого программного комплекса OpenFoam [1].

В решателе chtMultiRegionFoam реализованы основные законы сохранения для сжимаемой жидкости.

Для учета энерговыделения в топливе в стандартное уравнение теплопроводности [2] решателя было внесено слагаемое  $q_v$ , отвечающее за внутренний источник энергии, обусловленный распадами ядер нестабильных изотопов:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \text{div}(\lambda \text{grad} T) - q_v = 0,$$

где  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $T$  – температура, К;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $C_p$  – теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К).

[1] OpenFOAM User Guide // <http://cfd.direct/openfoam/user-guide/>

[2]. Исаченко В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел / Москва: Энергия, 1981. – 440 с.

[3] <http://www.salome-platform.org>

### Модель печи спекания

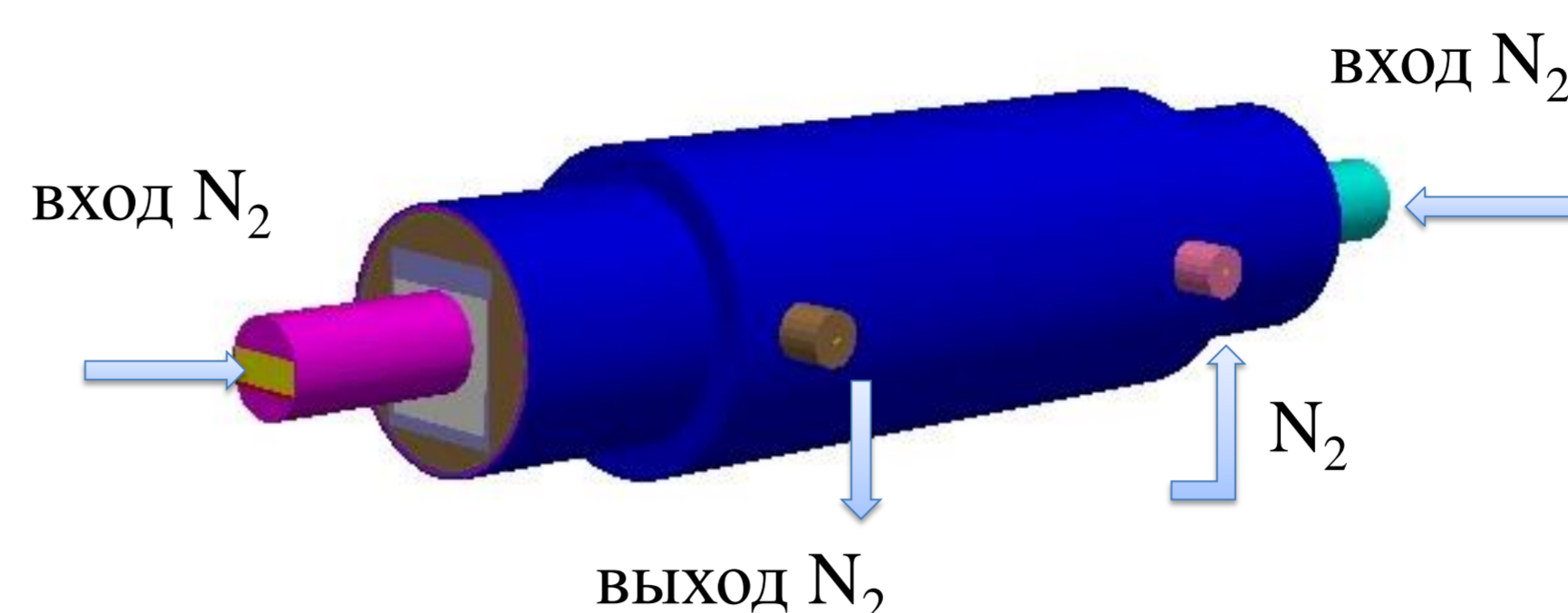


Рисунок 2. Расчетная модель печи спекания

Геометрия построена в ПК Salome [3].

Сеточная модель состоит из 1 115 068 тетраэдральных элементов.

В модели учитывается 4 слоя теплоизоляции.

В газовой камере расположены 23 лодочки с топливными загрузками.

### Описание исходных данных

- начальная температура 20 °С;
- скорость газа через каждый вход 0,001 м/с;
- коэффициент теплоотдачи от корпуса к охлаждающей воде 112 Вт/(м<sup>2</sup>·К);
- температура охлаждающей воды 25 °С;
- на боковой поверхности газового канала задавали температуру, соответствующую каждой зоне печи.

- не учитываются химические реакции топливных загрузок с технологическим газом;
- не учитываются нагревательные элементы;
- мощность, передаваемая за счет излучения, не учитывается;
- газ движется в ламинарном режиме;
- перемещение лодочек не рассматривается.

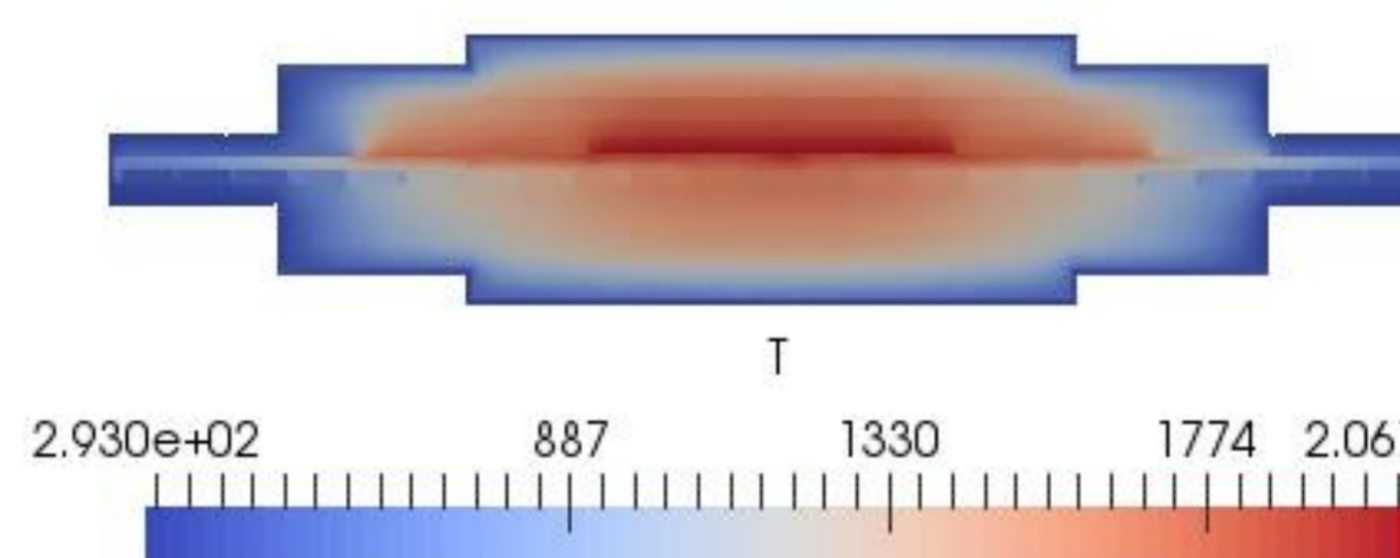


Рисунок 3. Распределение температуры в печи (разрез) в стационарном режиме, К

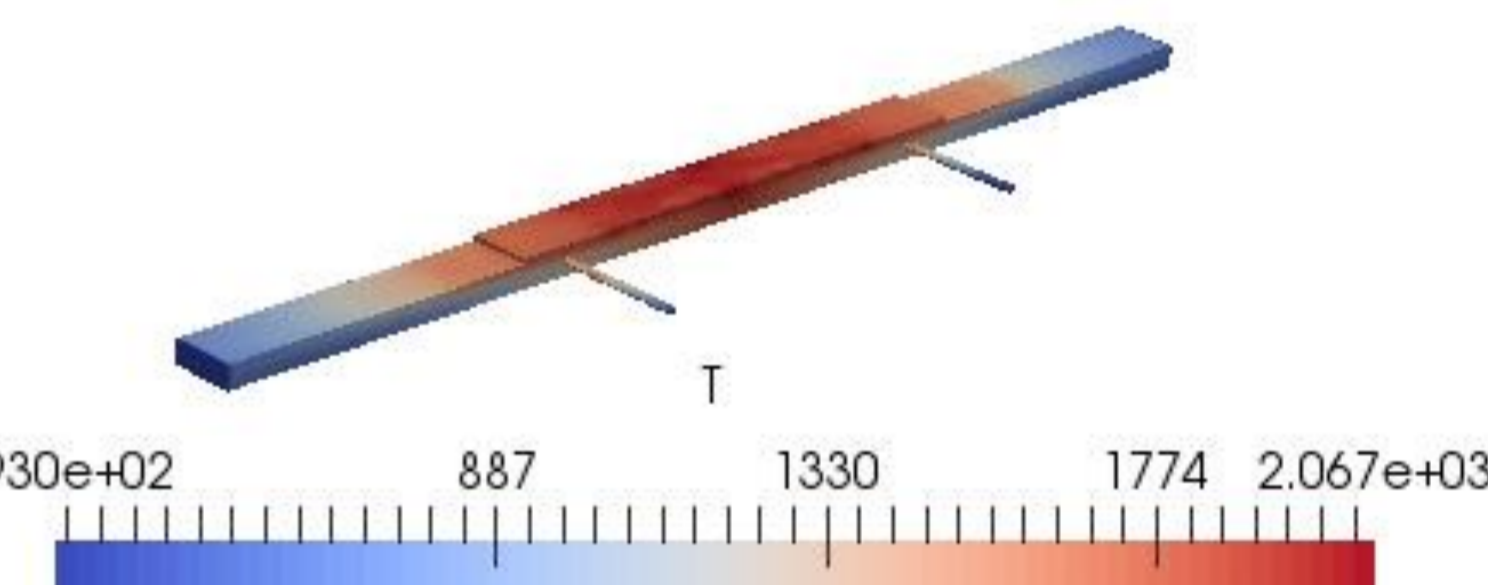


Рисунок 4. Распределение температуры в газовом канале в стационарном режиме, К

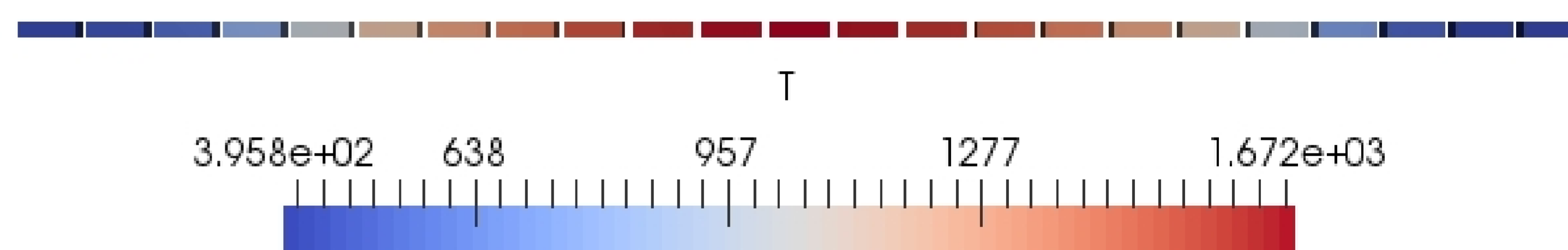


Рисунок 5. Распределение температуры в топливных загрузках в стационарном режиме, К

### Оценка влияния распадного энерговыделения топлива UN и (U,Pu)N на температуру в печи (OpenFoam)

Топливо	Максимальная температура газа, °С	Максимальная температура топливных загрузок, °С
UN	24,5	24,5
(U,Pu)N	258,2	263,8

### Выводы

При помощи программного комплекса OpenFoam разработана теплофизическая модель печи спекания, в которую добавлена возможность учета распадного энерговыделения.

Разработанная модель позволяет проводить оценку распределений температур, плотностей и скоростей в отдельных зонах печи спекания и определять температуру топливных загрузок.