

УДК 536.12:536.221:536.2.022

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕАКТОРОВ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

© 2021 г. А. И. Киселев\*

*Институт химии твердого тела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия*

*\*E-mail: kis1771@yandex.ru*

Поступило в редакцию 26.08.2019 г.

После доработки 04.03.2021 г.

Принято к публикации 19.05.2021 г.

Оценено изменение идеального КПД реакторов серии БН при увеличении теплопроводности расплава натрия. Исследование проводится на основе решения уравнения теплопроводности для стационарного режима, когда не учитывается прокачка теплоносителя. Показана вероятность того, что увеличение теплопроводности теплоносителя на 10% приведет к увеличению КПД приблизительно на 1%.

DOI: 10.31857/S0040364421050100

### ВВЕДЕНИЕ

Металлические теплоносители наиболее широко применяются в ядерных реакторах. Настоящее исследование проводится на основе открытых данных для реакторов серии БН. Основные требования, предъявляемые к теплоносителю: обеспечение достаточно эффективного теплоотвода при умеренной затрате мощности на перекачку, совместимость теплоносителя с конструкционными материалами и ядерным топливом. При этом считается, что перенос тепла в теплообменниках происходит за счет конвекции при движении теплоносителя. Здесь же внимание уделяется возможности повышения КПД ядерного реактора при изменении теплопроводности самого металлического теплоносителя. Объектом исследования является поведение теплоносителя в магистралях, проложенных между активной зоной реактора и холодильником.

В реакторах на быстрых нейтронах – БН-350 и БН-600 – в качестве теплоносителя используется расплавленный натрий. Согласно закону Видемана–Франса, при оценке изменения теплопроводности теплоносителя можно использовать данные о его электросопротивлении. Исследования показали, что при смешивании натрия с металлами III и IV группы электросопротивление и, следовательно, теплопроводность полученных систем возрастают весьма существенно. Так, при смешивании со свинцом электросопротивление натрий-свинцового расплава [1] при температуре 673 К меняется от  $25 \times 10^{-8}$  Ом м для натрия до максимального значения  $464 \times 10^{-8}$  Ом м для сплава с 77.5 ат. % натрия. Численная оценка свойств натрий-галлиевого рас-

плава при температуре 1023 К [2] дает максимальное значение электросопротивления в  $879 \times 10^{-8}$  Ом м.

Целью настоящей работы является исследование влияния изменения теплопроводности металлического теплоносителя на КПД тепловой машины.

### СХЕМАТИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ ТЕПЛОЙ МАШИНЫ

В реакторах БН-350 и БН-600 для того, чтобы максимально избежать риска смешивания натрия с водой, реализуется трехконтурная схема, т.е. имеются три теплообменника (первые два из них, включая теплообменник с активной зоной, содержат натрий). Теплообменники с натрием можно условно представить в виде схемы (рисунок). Температуры натрия в первом контуре – на входе в реактор  $T_4$ , на выходе из него  $T_1$ ; во втором контуре – на входе в парогенератор  $T_2$ , на выходе  $T_3$  взяты из работы [3]. Идеальный коэффициент полезного действия  $\eta$  для подобной схемы, рассчитанный по уравнению  $\eta = 1 - T_3/T_2$ , равен 0.2506.

### УРАВНЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

На данном этапе исследования рассматривается стационарный случай. Интерес представляет характер изменения температуры на участках линий I и II. На этих участках не происходит выделения или поглощения тепла. Длина данных линий  $L$  условно принята равной 100 м. Как будет ясно в дальнейшем, на коэффициенты закономерности изменения температуры величина  $L$  влияния не имеет. Здесь можно было бы ввести в рассмот-

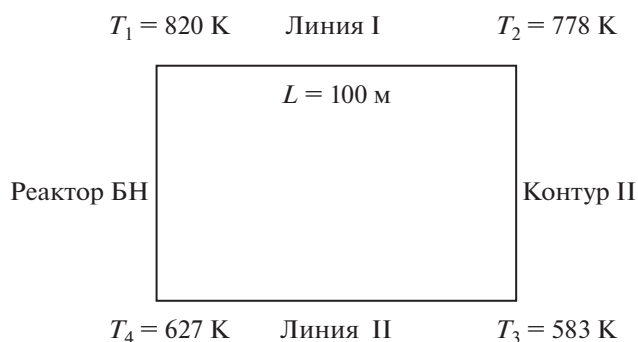


Схема теплообменника реакторов серии БН.

рение элементы нестационарности, т.е. учесть скорость прокачки теплоносителя, уменьшив длину линии I и увеличив длину II. Но так как на этапе определения коэффициентов теплопроводности длины сокращаются, то это говорит о малом влиянии нестационарности на полученные здесь значения КПД.

При стационарной задаче, когда не происходит тепловыделения внутри материала, уравнение теплопроводности принимает вид  $d^2T/dx^2 = 0$  (уравнение Лапласа). В настоящей работе учитывается влияние переменности коэффициента теплопроводности, вид которого в определенных интервалах температур можно аппроксимировать линейной функцией  $\lambda(T) = \lambda_0(1 + \beta T)$ , где  $\lambda_0$  – коэффициент теплопроводности при некоторой характерной температуре,  $\beta$  – эмпирическая постоянная. Согласно [4], при 500 К теплопроводность натрия – 81.8 Вт/(м К), а при 600 К – 76.8 Вт/(м К). Отсюда  $\lambda_0 = 106.8$  Вт/(м К),  $\beta = -0.000468$  1/К.

После интегрирования уравнения

$$\frac{d}{dx} \left[ \lambda(T) \frac{dT}{dx} \right] = 0$$

для стационарного одномерного распределения температуры получается  $\lambda(T) dT/dx = C_1$ . Здесь  $x$  – координата положения точки на линиях I и II. В установившихся условиях течет постоянный тепловой поток. Применяя закон Фурье, можно найти для плотности теплового потока  $q'' = -\lambda(T) dT/dx$ ,

т.е.  $q'' = -C_1$ . После повторного интегрирования получаем  $\lambda_0(T + \beta T^2/2) = C_1x + C_2$ .

Для линии I в качестве граничных условий выбраны температуры  $T(0) = T_1, T(L) = T_2$ , а для линии II –  $T(0) = T_4, T(L) = T_3$ . Тогда можно определить значение коэффициентов

$$C_1 = \frac{\lambda_0}{L} \left[ (T_2 - T_1) + \frac{\beta}{2}(T_2^2 - T_1^2) \right],$$

$$C_2 = \lambda_0(T_1 + \beta T_1^2/2).$$

Для определения изменения КПД при варьировании теплопроводности необходимы изменения температур  $T_2$  и  $T_3$ , для которых  $x = L$ . В этом случае уравнение теплопроводности приобретает вид

$$\lambda_0(T_{T_{2,3}} + \beta T_{T_{2,3}}^2/2) = C_1' + C_2, \tag{1}$$

где  $C_1' = \lambda_0 \left[ (T_2 - T_1) + \frac{\beta}{2}(T_2^2 - T_1^2) \right]$ .

Значения коэффициентов  $C_1'$  и  $C_2$  на линиях I и II приведены в табл. 1. На данном этапе можно рассматривать тенденцию изменения теплового режима при постоянных значениях коэффициентов  $C_1'$  и  $C_2$  и небольшом изменении теплопроводности. Математически такая процедура допустима. На участке уменьшения теплопроводности на  $\Delta\lambda_0 = 10\%$  – от 106.8 до 96.8 Вт/(м К) – такое изменение отражается на значениях коэффициентов теплопроводности, но мало влияет на их сумму, которая учитывается в уравнении (1). Уменьшение теплопроводности привело к различному изменению температур  $\Delta T = T'_{2(3)} - T_{2(3)}$  на участках I и II (табл. 1). Этот факт и влияет на изменение КПД.

Для исследования характера изменения КПД с уменьшением теплопроводности в качестве шага изменения теплопроводности взято  $-2.5\%$  от  $\lambda_0$ . Затем по уравнению (1) находятся измененные температуры  $T_2$  и  $T_3$  (табл. 2). КПД достаточно последовательно возрос практически на  $1\%$  – от 0.2506 до 0.2590.

**Таблица 1.** Коэффициенты уравнения теплопроводности (1) и температуры на входе и выходе контура II реактора БН

Линия	$T_{2(3)}, \text{ К}$	$-C_1', \text{ Вт/м}$	$C_2, \text{ Вт/м}$	$T'_{2(3)}, \text{ К}$	$\Delta T, \text{ К}$
				$\Delta\lambda_0 = 10\%$	
I	778	2808	70772	886	~108
II	583	3369	57139	656	~73

**Таблица 2.** Значения теплопроводности, температуры на входе и выходе контура II реактора БН и изменение значения идеального КПД

$\lambda_0$ , Вт/(м К)	$T_2$ , К	$T_3$ , К	$\eta_1$
106.8	778	583	0.2506
104.1	804	601	0.2527
101.5	832	620	0.2550
98.8	862	640	0.2571
96.8	886	656	0.2590

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В приведенной расчетной схеме просматриваются этапы ее существенного улучшения. На первом шаге можно рассмотреть влияние на результаты решения уравнения теплопроводности формы канала, по которому распространяется теплоноситель. Также необходимо учесть влияние скорости его прокачки. Но это вполне возможно реализо-

вать, только после подтверждения истинности указанной выше взаимосвязи теплопроводности и КПД тепловой машины.

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием и планами НИР ИХТТ УрО РАН № АААА-А19-119031890028-0 блок 2.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Meijer J.A., Geertsma W., van der Lugt W.* Electrical Resistivities of Liquid Alkali-lead and Alkali-indium Alloys // *J. Phys. F: Met. Phys.* 1985. V. 15. P. 899.
2. *Kiselev A.I., Gorbunov V.A.* Simulation of Electrical Conductivity Processes During the Metal-to-nonmetal Phase Transition in Melts of Systems of Lead and Gallium with Alkali Metals // *Inorg. Mater.: Appl. Res.* 2012. V. 3. № 4. P. 275.
3. *Дементьев Б.А.* Ядерные энергетические реакторы. М.: Энергоатомиздат, 1990. 352 с.
4. *Зиновьев В.Е.* Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. Спр. М.: Металлургия, 1989. 384 с.