

03;12  
©1994

## ТЕПЛОТДАЧА ПРИ ТЕЧЕНИИ ЖИДКОЙ СЕРЫ В ТРУБЕ

*Б.С.Фокин, Э.В.Фирсова, М.Я.Беленький, М.Е.Лебедев,  
В.В.Баранов, В.А.Дивавин, И.В.Мазуль,  
В.Н.Макаренков, В.П.Озимов*

Постановка и проведение экспериментального исследования теплоотдачи к потоку расплава серы вызваны поиском новых высокотемпературных теплоносителей, которые могут быть использованы в теплонапряженных установках при наличии сильных магнитных полей (например, в системе охлаждения элементов термоядерных установок). Несмотря на широкое распространение серы и ее соединений в природе и применение их в разных отраслях промышленности, в литературе отсутствуют сведения о теплоотдаче к жидкой сере. В чистом виде сера как теплоноситель вряд ли найдет широкое применение из-за высокой вязкости (особенно вблизи  $200^{\circ}\text{C}$ ). Для значительного снижения вязкости в серу рекомендуется добавлять в небольших количествах галогены (например, йод [1]). Теплофизические свойства расплава сера-йод, так же как и теплоотдача к нему, не исследованы. Ниже приведены полученные впервые результаты экспериментов по исследованию теплоотдачи при вынужденном течении расплава сера-йод (3% иода) в вертикальной круглой трубе из нержавеющей стали 12Х18Н10Т длиной 300 мм, внутренним диаметром 5 мм при температуре до  $370^{\circ}\text{C}$ , давлении 0.12–0.4 МПа и скоростях потока 0.83–1.25 м/с. Труба обогревалась переменным электрическим током промышленной частоты. Температурный режим стенки трубы контролировался семью хромель-алюмелевыми термопарами, а потока — двумя такими же термопарами на входе в трубу и выходе из нее. Плотность теплового потока на внутренней поверхности теплообмена достигала  $0.625 \text{ МВт/м}^2$ , температура стенки трубы —  $580^{\circ}\text{C}$ .

Теплоотдача исследовалась в области ламинарного режима течения теплоносителя ( $Re = 36-74$ ,  $Pt = 660-1890$ ) на термическом начальном участке. В опытах наблюдался как чисто конвективный режим теплообмена, так и смешанный (с поверхностным кипением). В области конвективного теплообмена локальные по длине трубы коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_{\text{кон}}^{\text{лок}}$  монотонно уменьшались по длине тру-

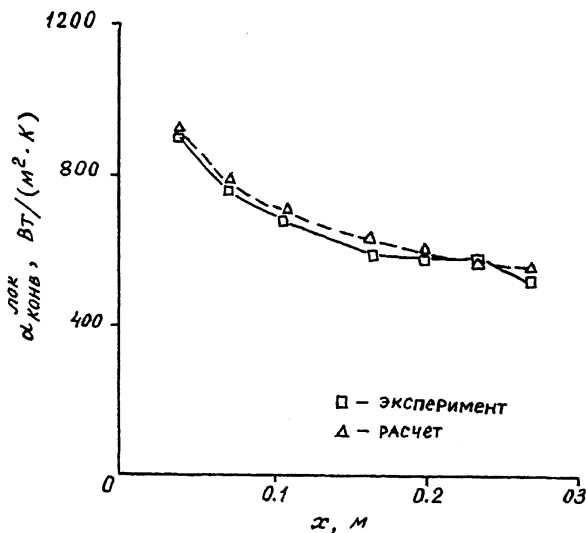


Рис. 1. Изменение локального коэффициента теплоотдачи вдоль рабочего участка при конвективном режиме ( $W = 0.83$  м/с,  $q = 95810$  Вт/м<sup>2</sup>).

бы и не зависели от величины плотности теплового потока (см. рис. 1). В области смешанного теплообмена, когда температура стенки превышала температуру кипения жидкой серы, характер изменения  $\alpha_{\text{кип}}^{\text{лок}}$  по длине трубы был совсем иным (см. рис. 2). При этом наблюдалась существенная зависимость интенсивности теплоотдачи от величины теплового потока  $q$ , что характерно для процесса кипения жидкостей. Наличие поверхностного кипения расплава серы существенно интенсифицировало теплоотдачу (до 500% на выходе из трубы). Опытные значения  $\alpha_{\text{лок}}$  в конвективной области (см. рис. 1) хорошо описались зависимостью Б.С.Петухова-А.А.Жукаускаса [2] для ламинарного течения на начальном термическом участке в трубе:

$$Nu_x \equiv \frac{\alpha_{\text{конв}}^{\text{лок}} d}{\Lambda} = 1.31 \left( \frac{1}{Pe} \frac{x}{d} \right)^{-1/3} \left( 1 + 2 \frac{1}{Pe} \frac{x}{d} \right) \left( \frac{\mu_{\text{ж}}}{\mu_{\text{ст}}} \right)^{-1/6}. \quad (1)$$

Область смешанного теплообмена (см. рис. 2) удовлетворительно описалась формулой С.С.Кутателадзе [3]:

$$\alpha_{\text{кип}}^{\text{лок}} = \sqrt{\alpha_{\text{конв}}^{\text{лок}^2} + \alpha_{\text{р.к.}}^2 \left( \frac{t_{\text{см}} - t_{\text{s}}}{t_{\text{см}} - t_{\text{ж}}} \right)}, \quad (2)$$

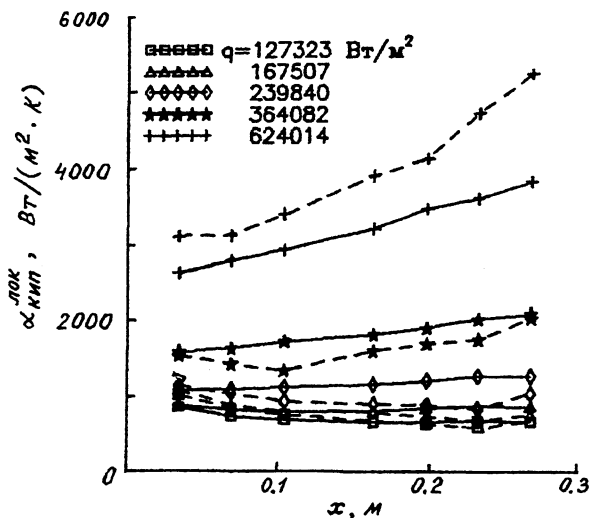


Рис. 2. Изменение локального коэффициента теплоотдачи вдоль рабочего участка в режимах с поверхностным кипением ( $W = 0.83$  м/с).

где теплоотдача при развитом кипении жидкой серы рассчитывалась по формуле В.М.Боришанского [4], полученной на основе теории термодинамического подобия кипящих жидкостей:

$$\alpha_{p.k.} = \sqrt[6]{\frac{P_{кр}^2}{T_{кр}^5 M} \left( 0.37 + 3.15 \frac{P}{P_{кр}} \right)} q^{2/3}. \quad (3)$$

В формулах (1)–(3) использованы общепринятые обозначения, приведенные в работах [2–4]. Все теплофизические свойства расплава сера-йод (за исключением вязкости) принимались по данным [5] для чистой жидкой серы. Вязкость расплава при различных температурах определялась по экспериментальным данным работы [1]. Средняя молекулярная масса серы  $M = 224$  кг-моль рассчитывалась, согласно данным [6] о сложном составе различных модификаций молекул кипящей серы. Приемлемое соответствие между экспериментальными данными и расчетными зависимостями в исследованном диапазоне параметров позволяет достаточно уверенно производить прогнозные расчеты по известным формулам для развитого кипения жидкой серы. Эти расчеты показывают, что в области повышенных давлений (2.0–3.0 МПа) коэффициенты теплоотдачи при  $q = 1$  МВт/м<sup>2</sup> будут порядка  $(25–35) \cdot 10^3$  Вт/(м<sup>2</sup>К), а ожидаемые критические тепловые потоки при кипении серы составят несколько миллионов Вт/м<sup>2</sup>.

Таким образом, применение расплава серы в качестве теплоносителя представляется вполне реальным.

### Список литературы

- [1] *Timrot D.L. et al. // Heat Recovery Systems. 1981. V. 1. N 4. P. 309-314.*
- [2] *Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. М.: Энергия, 1982.*
- [3] *Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М.; Л.: Машгиз, 1962.*
- [4] *Новиков И.И., Боришанский В.М. Теория подобия в термодинамике и теплопередаче. М.: Атомиздат, 1979.*
- [5] *Лекае В.М., Елкин Л.Н. Физико-химические и термодинамические константы элементарной серы. М.: МХТИ им.Д.И.Менделеева, 1964.*
- [6] *Природная сера / Под ред. М.А.Менковского. М.: Химия, 1972.*

НПО ЦКТИ им.И.И.Ползунова  
НПП "ЭНЕК"  
НИИЭФА им.Д.В.Ефремова  
Горный Институт им.Г.В.Плеханова

Поступило в Редакцию  
27 мая 1994 г.