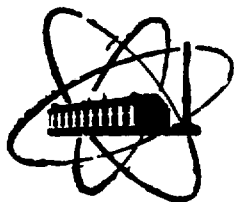


SIU 009396

ФЭИ-985



ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

*О. В. РЕМИЗОВ, Э. Ф. ГАЛЬЧЕНКО, Н. Г. ШУРКИН,  
В. В. СЕРГЕЕВ*

**Закризисный теплообмен в кольцевом канале  
с наружным обогревом**

Обнинск — 1980

**ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

**О.В.Ремизов, Э.Ф.Гальченко, Н.Г.Шуркин, В.В.Сергеев**

**ЗАКРИВИСНЫЙ ТЕПЛОБМЕН В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ  
С НАРУЖНЫМ ОБОГРЕВОМ**

## АННОТАЦИЯ

Приведены экспериментальные данные по закризисной теплоотдаче в кольцевом канале с наружным обогревом при давлениях 6,9-19,6 МПа, массовых скоростях 350-1000 кг/м<sup>2</sup>с.

Проведен анализ имеющихся расчетных рекомендаций и предложено эмпирическое уравнение для расчета коэффициента теплоотдачи в закризисной области.

## ОБОЗНАЧЕНИЯ

- $P$  - давление, МПа ;  
 $\rho W$  - массовая скорость, кг/м<sup>2</sup>с ;  
 $q$  - удельный тепловой поток, МВт/м<sup>2</sup>, кВт/м<sup>2</sup> ;  
 $d_3$  - эквивалентный диаметр, м ;  
 $t_{ст}$  - температура стенки, °С ;  
 $t_s$  - температура насыщенения, °С ;  
 $\alpha = \frac{q}{t_{ст} - t_s}$  - коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup> °С ;  
 $X$  - массовое расходное паросодержание ;  
 $X_{кр}$  - паросодержание, при котором начинается режим ухудшенного теплообмена ;  
 $\lambda$  - коэффициент теплопроводности, Вт/м<sup>2</sup> °С ;  
 $l$  - осевая координата, м ;

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования закризисной теплоотдачи в кольцевом канале  $32 \times 28 \times 3000$  мм с равномерным распределением теплового потока по длине при давлениях 6,9–19,6 МПа и массовых скоростях 350–1000 кг/м<sup>2</sup>с. Обогрев – электрический, наружный, односторонний.

Для измерения стационарных температурных полей и фиксации кризиса теплообмена к наружной поверхности кольцевого канала были приварены хромельалюмелевые термопары диаметром термоэлектродов 0,3 мм с шагом 50 мм по двум образующим, смещенным друг относительно друга на 90°. Сигналы от термопар выводились на цифровой вольтметр Ф-30 через сбегачное устройство на 100 точек. Потери тепла на рабочем участке учитывались при расчетах теплового потока, паросодержания и температуры внутренней поверхности канала.

За место кризиса теплоотдачи принималось сечение канала, в котором кривая  $t_{cr} = f(l)$  претерпевала излом.

Измеренные в экспериментах температурные поля позволили рассчитать коэффициенты теплоотдачи в закризисной зоне по формуле

$$\alpha = q / (t_{cr} - t_s).$$

За характерную температуру более правильно было бы принять температуру пара в ядре потока, однако из-за методических трудностей в определении температуры пара в качестве характерной принята температура насыщения при данном давлении.

На рис. 1–3 представлены опытные данные, из которых видно влияние основных режимных параметров на коэффициенты теплоотдачи в закризисной области. Для больших паросодержаний наблюдается типичное для вынужденной конвекции положительное влияние массовой скорости на теплоотдачу (при фиксированных давлении и паросодержании). Во всей исследованной области давлений при массовых скоростях 350–500 кг/м<sup>2</sup>с с ростом паросодержания коэффициент теплоотдачи монотонно уменьшается. Это характерно и для массовой скорости 700 кг/м<sup>2</sup>с при давлениях 6,9 и 9,8 МПа. Во всем остальном исследованном диапазоне режимных параметров коэффициент теплоотдачи сначала с ростом паросодержания уменьшается, достигает минимального значения, а затем вновь возрастает.

Следует отметить, что при высоких давлениях (начиная с 15,7 МПа), а также для массовой скорости 1000 кг/м<sup>2</sup>с при всех исследованных давлениях наблюдается влияние теплового потока на коэффициент теплоотдачи в закризисной области, а именно, с ростом  $q$  наблюдается уменьшение коэффициента теплоотдачи.

Таким образом, в целом, характер влияния основных режимных параметров на закризисную теплоотдачу в кольцевых каналах с наружным обогревом аналогичен наблюдающемуся в круглых трубах /1/. Более того, сопоставление экспериментальных данных по закризисной теплоотдаче в кольцевых каналах с наружным обогревом и трубах показывает их качественное согласие между собой.

Для расчета коэффициента теплоотдачи в закризисной области в кольцевых каналах и трубах имеется ряд эмпирических зависимостей /2/ для давлений до 9,8 МПа и высоких массовых скоростей ( $>1000$  кг/м<sup>2</sup>с). Эти интерполяционные уравнения не отражают физической сущности процесса, что практически исключает возможность их экстраполяции за пределы весьма узкой области их применимости. Поскольку эти недостатки присущи всем уравнениям, то на первом этапе предпочтение было отдано зависимости, предложенной авторами /6/ для кольцевых каналов и труб, которая в отличие от остальных уравнений описывает теплоотдачу не только в области устойчивого пленочного кипения, но и в так называемой области переходного или частично пленочного кипения, т.е. в области, расположенной в начале закризисной зоны и характеризующейся реакцией изменением температуры стенки по длине:

$$\alpha = 909 \cdot 10^4 \exp(0,5 \sqrt{t_w - t_s}) + 20,8 (Re)^{0,289} Pr^{0,457} d_0^{-0,279} (\lambda)^{0,225} x^{-0,009} \quad (1)$$

Как видно из рис. 1-3, коэффициенты теплоотдачи, рассчитанные по уравнению (1), плохо согласуются с экспериментом. Это относится и к трубам (см. рис. 4).

На следующем этапе для сравнения была выбрана более общая зависимость, предложенная теми же авторами /6/ для пучков стержней:

$$\alpha = 2,93 \cdot 10^4 \exp(0,5 \sqrt{t_w - t_s}) + 1,22 (Re)^{0,205} Pr^{0,455} d_0^{-0,415} (\lambda)^{0,409} x^{-0,213} \quad (2)$$

Сравнение расчета по уравнению (2) с опытными данными в кольцевом канале показывает достаточно хорошее согласие и в более широком диапазоне давлений, чем рекомендовано авторами (см. рис. 1-3).

В /4/ расчет по уравнению (2) сравнивали с экспериментальными данными для труб, и показали, что около 95% опытных точек отклоняются от расчета не более, чем на 25%. В нашем случае расхождение расчета по уравнению (2) с экспериментальными данными для труб /5/ составляет ~30-50% (рис.4).

Следует отметить, что уравнение (1,2), как и большинство других, зависят от искомой температуры стенки, поэтому в расчетах приходится использовать итерационный процесс. При расчетах по итеративной схеме ищутся корни уравнения

$$\alpha(t_{cr} - t_s) - q = 0, \quad (3)$$

где  $\alpha$  - заданная функция  $t_{cr}$ . Но это уравнение в зависимости от конкретного вида функции  $\alpha(t_{cr})$  может иметь не один, а несколько корней. Из рис.5 видно, что в зависимости от величины  $q$  уравнение (3) может иметь от одного до трех корней. Кроме того, поскольку функция  $\alpha(t_{cr} - t_s)$  в области между вторым и третьим корнями меняется мало, то в определении этих корней большое значение имеет задание точности сходимости итераций по температуре (или тепловому потоку). Вследствие этого использовать уравнения (1,2) для предсказания коэффициентов теплоотдачи не представляется возможным. Поэтому в настоящей работе при расчетах использовалась известная из эксперимента температура стенки.

Таким образом, поскольку уравнение (2) достаточно хорошо описывает опытные данные в кольцевых каналах его можно использовать для обобщения экспериментальных данных, но для предсказания коэффициентов теплоотдачи в закризисной области оно непригодно из-за своей неоднозначности.

На основании приведенного экспериментального материала получено эмпирическое уравнение для расчета коэффициентов теплоотдачи в закризисной области в кольцевых каналах с наружным обогревом, аналогичное ранее предложенному /5/ для труб

$$\alpha = \frac{14,5 + 0,029 \rho W}{(x + 0,002) - x_{cr}} - (5400 - 9,3 \rho W)(x - x_{cr}) + 1910 \quad (4)$$

при  $P = 6,9+13,7$  МПа;  $\rho W = 350,500,700$  кг/м<sup>2</sup>с;  $q = 280+610$  кВт/м<sup>2</sup>;  $X_{yx} < X < 1$ . Значения  $X_{yx}$  получены в работе /3/. Из рис.6 видно, что уравнение (4) с точностью  $\pm 25\%$  описывает опытные данные по закризисной теплоотдаче в кольцевом канале с наружным обогревом.

#### ВЫВОДЫ

1. Характер зависимости коэффициента теплоотдачи в закризисной области в кольцевом канале с наружным обогревом от режимных параметров аналогичен таковому в трубах.
2. Уравнение (2) позволяет обобщать экспериментальные данные по закризисной теплоотдаче в кольцевых каналах, но непригодно для предсказания коэффициентов теплоотдачи из-за своей неоднозначности.
3. Получено эмпирическое уравнение для расчета закризисного теплообмена в кольцевом канале с наружным обогревом в диапазоне режимных параметров:  
 $P = 6,9+13,7$  МПа;  $\rho W = 350+700$  кг/м<sup>2</sup>с и  $X_{yx} < X < 1$ .

ЛИТЕРАТУРА

1. О.В.Ремизов, В.А.Воробьев, В.В.Сергеев. Теплообмен в закризисной области. (Аналитический обзор)., ОБ-24, Обнинск, ФЭИ, 1976.
2. В.В.Сергеев. Закризисный теплообмен в кольцевых каналах и пучках стержней. (Аналитический обзор). ОБ-67, Обнинск, ФЭИ, 1978.
3. Граничные паросодержания в кольцевом канале. Препринт ФЭИ-878, Обнинск, 1978. Авт.: Ремизов О.В., Шуркин Н.Р., Подгорный К.К., Гальченко Э.Ф., Бухтеев И.С.
4. С.К.Смирнов, В.И.Зайцев, В.Е.Серов. Составление коэффициентов теплоотдачи при пленочном кипении в трубах и стержневых сборках. - Труды МЭИ. Вып.313, М., 1976, с.78-82.
5. О.В.Ремизов, В.А.Воробьев, Э.Ф.Гальченко. Границы наступления режима с ухудшенной теплоотдачей и теплообмен в закризисной области. - Препринт ФЭИ-653, Обнинск, 1975.
6. R.J.Mattson, K.G.Condie, S.J.Bengston, C.F.Obenchain. Regression analysis of post-SNF flow boiling data. - In.: Heat Transfer 1974, Proc. V Int. Heat Transfer Conf. Tokyo, 1974, v.IV, p.115-119.



$\alpha, \text{кВт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ 

I

- 8 -

 $\alpha, \text{кВт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ 

II

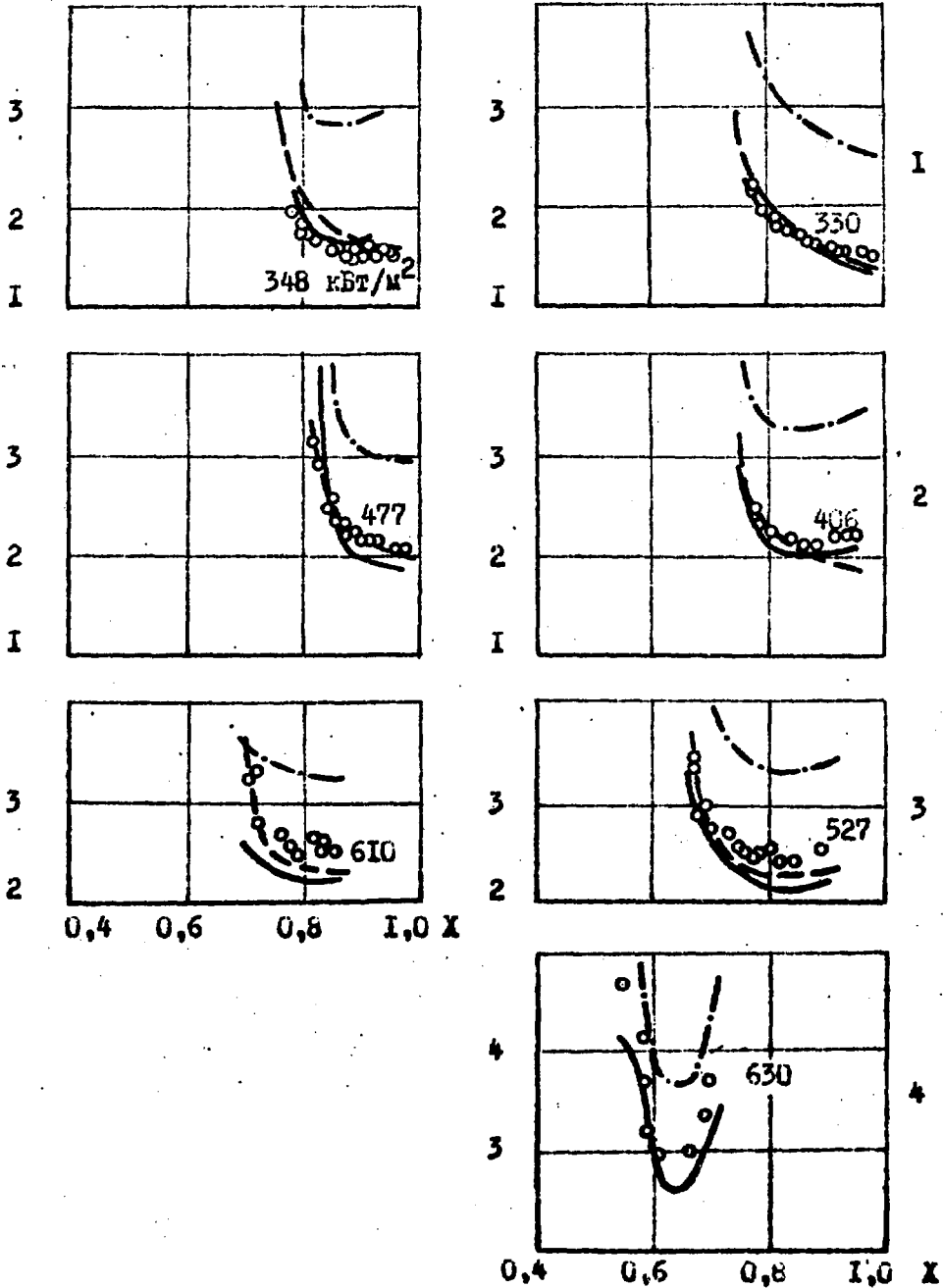


Рис. I. Изменение коэффициента теплоотдачи в акризной области для давлений: I -  $P=6,9$  МПа; II -  $P=9,6$  МПа.

I -  $\rho_w=350$  кг/м<sup>3</sup>; 2 -  $\rho_w=500$  кг/м<sup>3</sup>; 3 -  $\rho_w=700$  кг/м<sup>3</sup>;

4 -  $\rho_w=1000$  кг/м<sup>3</sup>. - - - - расчет по уравнению (1);

— — — — расчет по уравнению (2); - - - расчет по уравнению (4).

$\alpha$ , кВт/м<sup>2</sup> °С

III

$\alpha$ , кВт/м<sup>2</sup> °С

IV

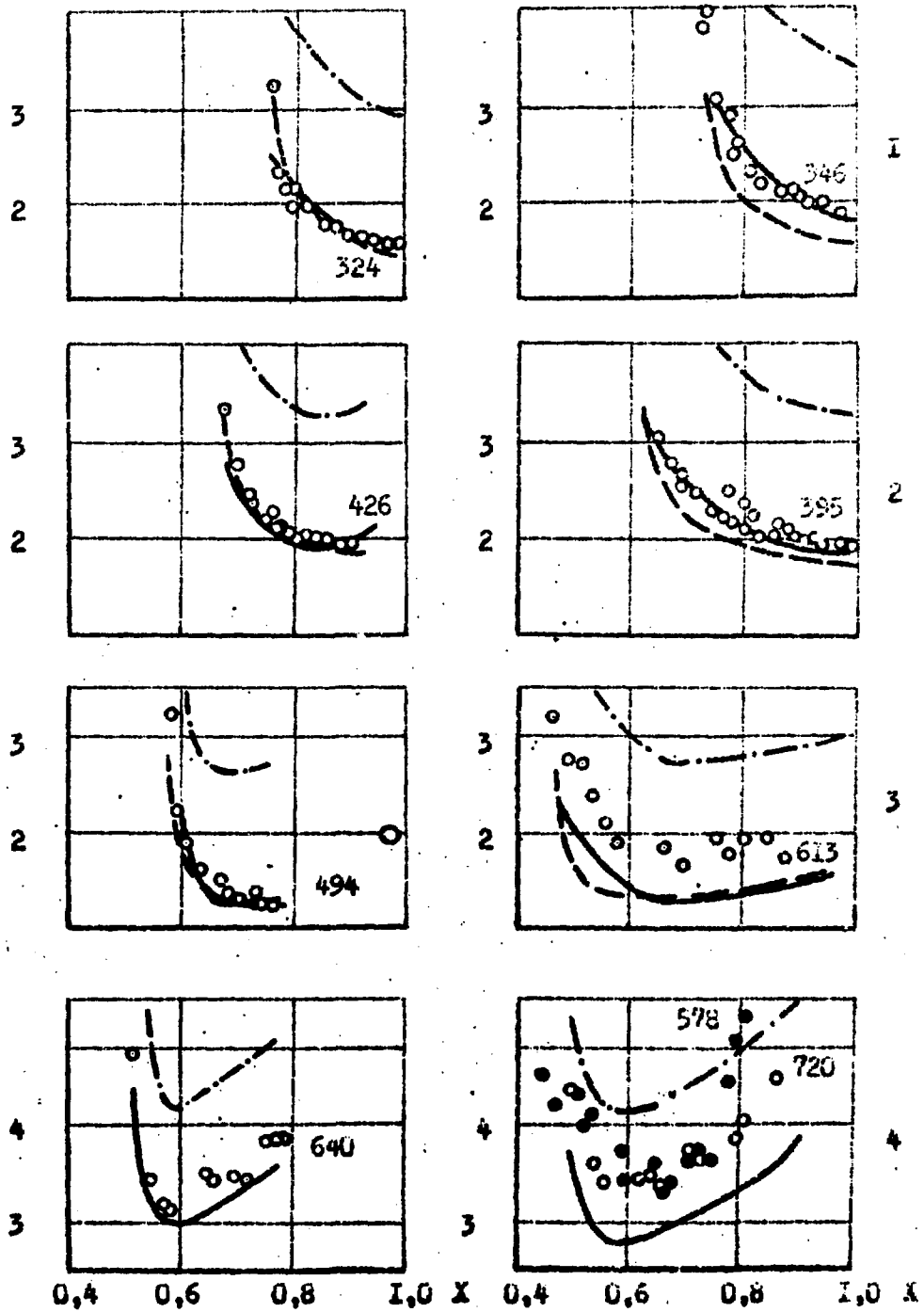
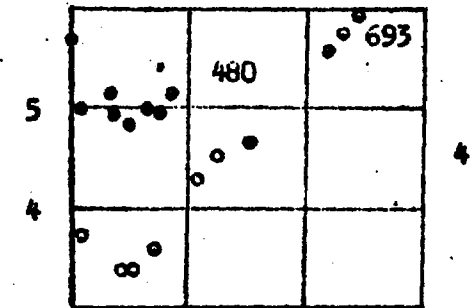
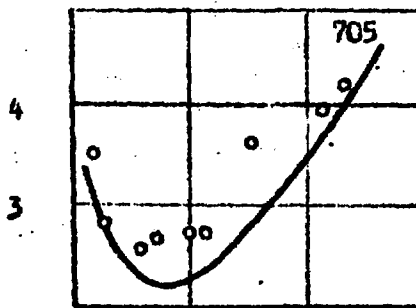
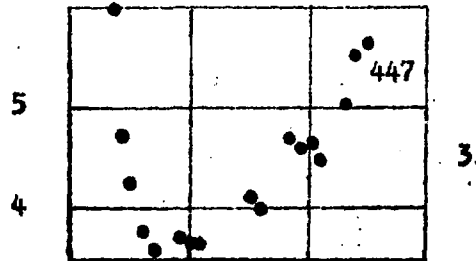
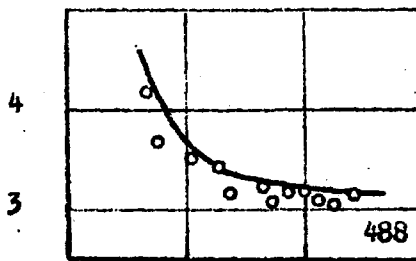
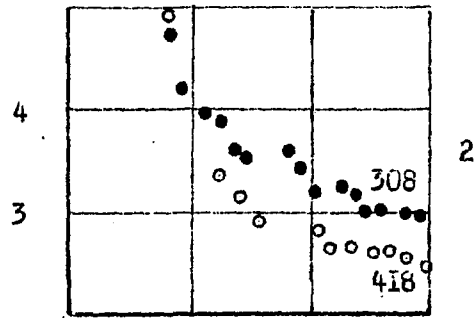
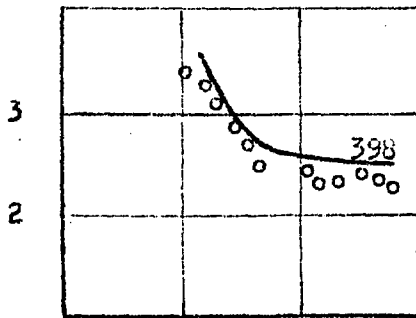
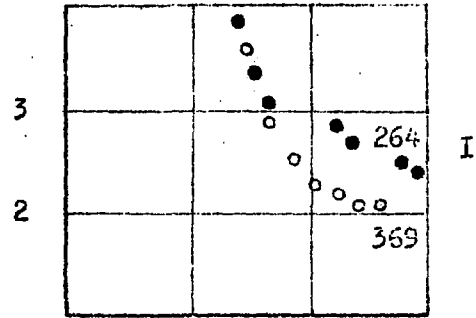
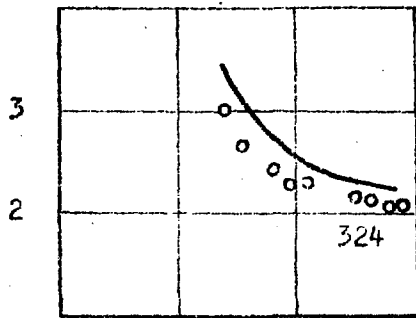


Рис.2. Изменение коэффициента теплоотдачи в закризисной области для давлений: III - P=11,7 МПа; IV - P=13,7 МПа. Обозначения те же, что и на рис.1.

$\alpha, \text{кВт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  $\gamma$ 

- 10 -

 $\alpha, \text{кВт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  $\gamma\text{I}$ 

0,4 0,6 0,8 1,0 X 0,4 0,6 0,8 1,0 X

Рис.3. Изменение коэффициента теплоотдачи в закризисной области для давлений:  $\gamma$  -  $P=15,7$  МПа;  $\gamma\text{I}$  -  $P=17,7$  МПа. Обозначения те же, что и на рис.1.

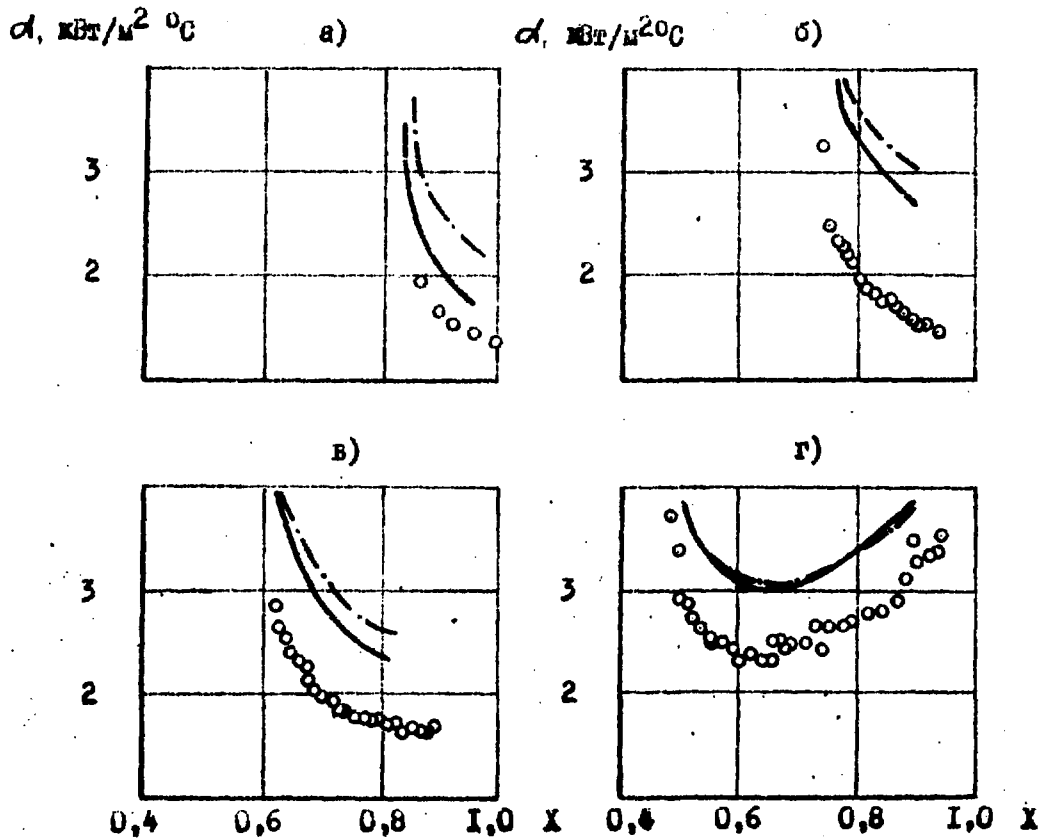


Рис. 4. Сравнение расчетных значений коэффициентов теплоотдачи с экспериментом для труб при давлении 9,8 МПа.  
а) -  $\rho W = 350 \text{ кг/м}^2\text{с}$ ; б) -  $\rho W = 500 \text{ кг/м}^2\text{с}$ ;  
в) -  $\rho W = 700 \text{ кг/м}^2\text{с}$ ; г) -  $\rho W = 1000 \text{ кг/м}^2\text{с}$ .  
- - - - - расчет по уравнению (1); — — — — — расчет по уравнению (2).

$\alpha(t_{cr}-t_s), \text{кВт/м}^2$

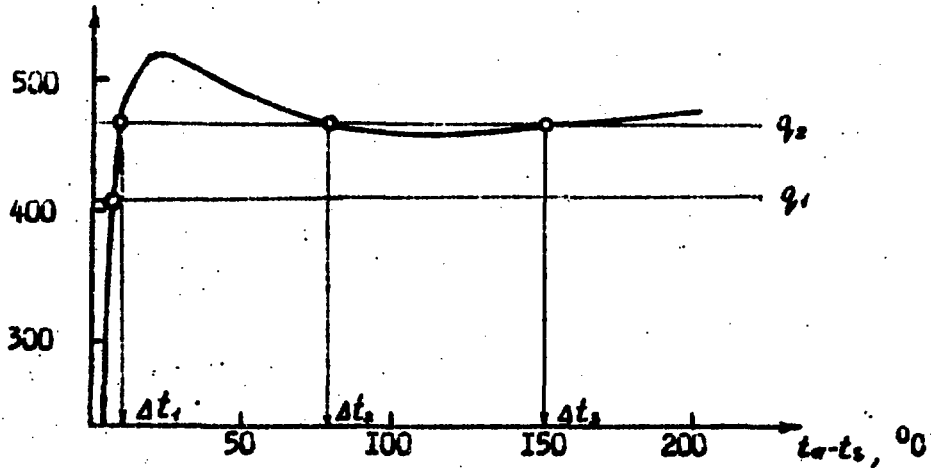


Рис.5. Корни уравнения (3) для случая, когда  $\alpha$  задано уравнением (2).  $P=9,6 \text{ МПа}$ ;  $\rho W=500 \text{ кг/м}^2\text{с}$ .

$\alpha_p, \text{кВт/м}^2\text{ }^\circ\text{C}$

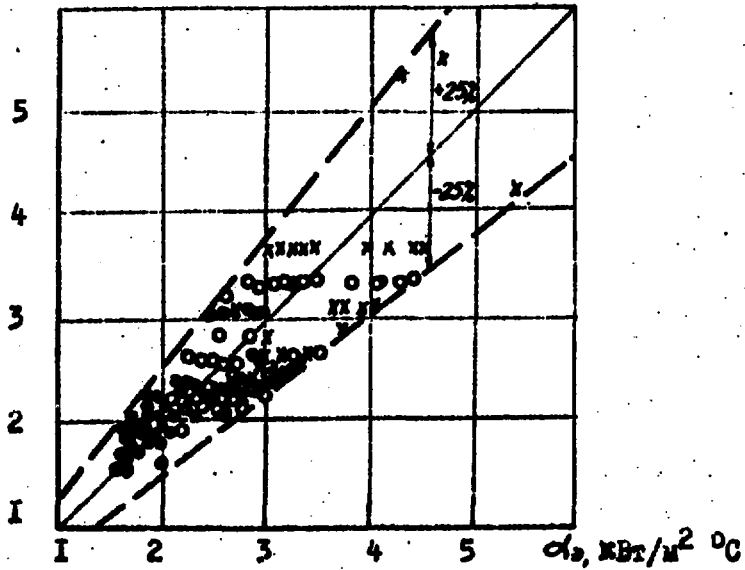


Рис.6. Сравнение коэффициентов теплоотдачи, рассчитанных по уравнению (4) с экспериментом.

● -  $\rho W=350 \text{ кг/м}^2\text{с}$ ;    x -  $\rho W=500 \text{ кг/м}^2\text{с}$ ;  
○ -  $\rho W=700 \text{ кг/м}^2\text{с}$ .



Подписано в печать 14/III-1979 г. Т-22814. Односторонняя печать  
Формат 60x90 1/16 Усл.п.л. 0,75 Уч.-изд.л. 0,5 Тираж 95 экз.  
Заказ № 201 Цена 5 коп. Издано 3624 08И-985

---

Отпечатано на ротационных машинах, февраль 1980 г.

**5 коп.**

**Индекс 3624**