

# Повышение теплоотдачи пруткового твэла при помощи шероховатости

О. С. ВИНОГРАДОВ, П. И. ПУЧКОВ

УДК 621.039.548

Шероховатость как средство интенсификации теплоотдачи пучков из труб или стержней при продольном обтекании изучалась в ряде работ [1—5]. Наблюдается большое разнообразие технологий нанесения, форм и относительных размеров элементов шероховатости, их распределения по поверхности, а также конструкций пучков (компоновки, способов дистанционирования, относительных длин и т. д.). Еще большее разнообразие наблюдается при исследовании в круглых трубах, кольцевых и плоских каналах. Это объясняется попытками исследователей найти оптимальные формы и размеры шероховатости и по возможности упростить технологию ее нанесения.

Если влияние относительных размеров шероховатости на теплоотдачу и сопротивление пучков может быть обобщено хотя бы эмпирическими зависимостями, то влияние форм и некоторых технологических факторов на теплоотдачу (например, контакт с теплоотдающей поверхностью) не поддается обобщению.

Поэтому возникают трудности при переносе на конкретные конструкции прутковых твэлов результатов исследований, проведенных на пучках или сборках других конструкций. Авторы настоящей работы провели специальное исследование по влиянию шероховатости на одной из конструкций сборок для газоохлаждаемых реакторов.

Опыты проводились на экспериментальной установке с замкнутым циркуляционным контуром, на которой могут быть использованы различные газы при давлениях до  $6 \cdot 10^6$  Па и температурах газа до  $725^\circ\text{K}$  без охлаждения.

Рабочий участок (рис. 1) состоял из вертикального корпуса канала, где последовательно размещались два макета сборок прутковых твэлов. Верхний макет не обогревался и обеспечивал натурные гидродинамические условия для нижнего обогреваемого макета, являющегося опытным элементом.

Макет состоял из центрального опорного стержня, на котором устанавливались верхняя и нижняя головки со специальными выступами, кронштейнами и решетками для установки твэлов. Последние имитировались тонкостенными трубками из нержавеющей стали, припаянными к выступам и решеткам головок, служившим шинами для подвода электрического тока. Го-

ловки и все детали на них изготавливались из меди. Ниже приведены основные геометрические размеры рабочего участка и макета:

Внутренний диаметр канала $d_2$ . . . . .	0,1055 м
Полная длина одной сборки $L$ . . . . .	0,575 м
Нагреваемая длина трубок $L_H$ . . . . .	0,520 м
Число трубок $N$ . . . . .	48
Наружный диаметр трубок $d_1$ . . . . .	$5 \cdot 10^{-3}$
Полная теплоотдающая поверхность $F$ . . . . .	$0,893 \text{ м}^2$
Прходное сечение (без учета головок) $\Omega$ . . . . .	$7,32 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$
Эквивалентный диаметр $d_3$ . . . . .	$25,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

Исследовались три макета сборок: один с гладкими трубками (пучок 1) и два с шероховатыми (2 и 3). Шероховатость в виде однозаконной винтовой нарезки с профилем, близким к треугольному, нарезалась на поверхности трубок. Контроль за размером и формой шероховатости осуществлялся при помощи микроскопа. Размеры шероховатости приведены в табл. 1.

Размеры шероховатости

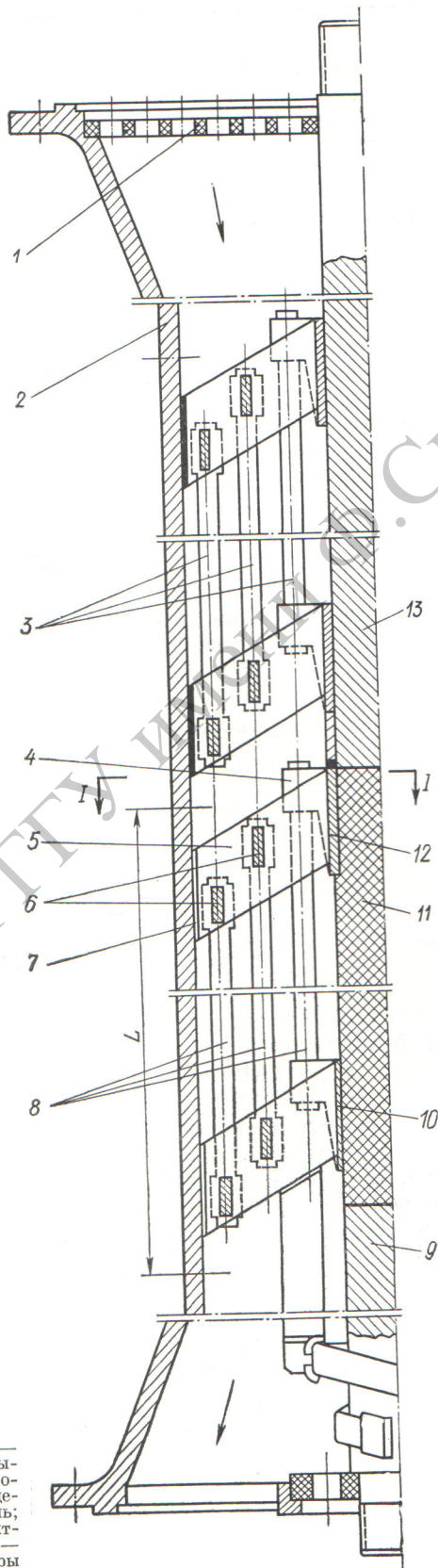
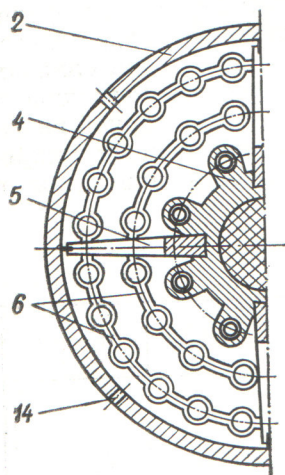
Таблица 1

Параметр	Пучок 2	Пучок 3
Высота $h \times 10^3$ , м	$0,024 \pm 0,005$	$0,065 \pm 0,01$
Шаг $s \times 10^3$ , м	$0,15 \pm 0,01$	$0,44 \pm 0,01$
Относительная высота $h/d_3$	0,00095	0,0026
Отношение шаг — высота $s/h$	6,25	6,75

Опыты проводились с использованием воздуха и углекислого газа при средней температуре поверхности трубок  $\bar{T}_{ст} = 375 \div 725^\circ\text{K}$ , температурах газа  $\bar{T}_г = 300 \div 575^\circ\text{K}$ , температурном факторе  $\psi = \bar{T}_{ст}/\bar{T}_г = 1,2 \div 1,6$  и числах  $Re = 2 \cdot 10^4 \div 10^6$ .

Температура поверхности измерялась при помощи хромель-алюмелевых термопар, размещенных внутри трубок. При подсчете температуры наружной поверхности трубок вводилась поправка на перепад температур в стенке, которая не превышала 2% температурного напора. В восьми трубках-калориметрах (по две в каждом ряду) размещалось по пять распределенных

Сечение I-I



Р и с. 1. Рабочий участок:

1 — верхняя решетка; 2 — корпус канала; 3 — медные трубки необогреваемого макета; 4 — выступы; 5 — кронштейны; 6 — решетки; 7 — паронитовые изоляционные вставки; 8 — теплопроводящие трубки («твэлы»); 9 — медный стержень; 10 — нижняя головка; 11 — опорный асбестоцементный стержень; 12 — верхняя головка; 13 — медный токоподводящий стержень; 14 — отборы статистических давлений.

по длине термопар, в остальных трубках — по одной термопаре, соответствующей расположению средних термопар в трубках-калориметрах.

По показаниям термопар подсчитывались средняя температура поверхности трубок-калориметров в каждом ряду  $\bar{T}_{стi}$  и коэффициент температурного поля для каждого ряда  $\varphi_i = \bar{T}_{стi} / \bar{T}_{цi}$ , где  $\bar{T}_{цi}$  — показания средней по длине трубки термопары.

Температура поверхности трубок всего пучка подсчитывалась по формуле

$$\bar{T}_{ст} = \frac{\sum_{i=1}^3 \varphi_i \bar{T}_{цi}^{n_i}}{\sum_{i=1}^3 n_i}, \quad (1)$$

где  $\bar{T}_{цi}$  — среднеарифметическая из показаний центральных термопар всех трубок  $i$ -го ряда;  $n_i$  — число трубок в  $i$ -м ряду.

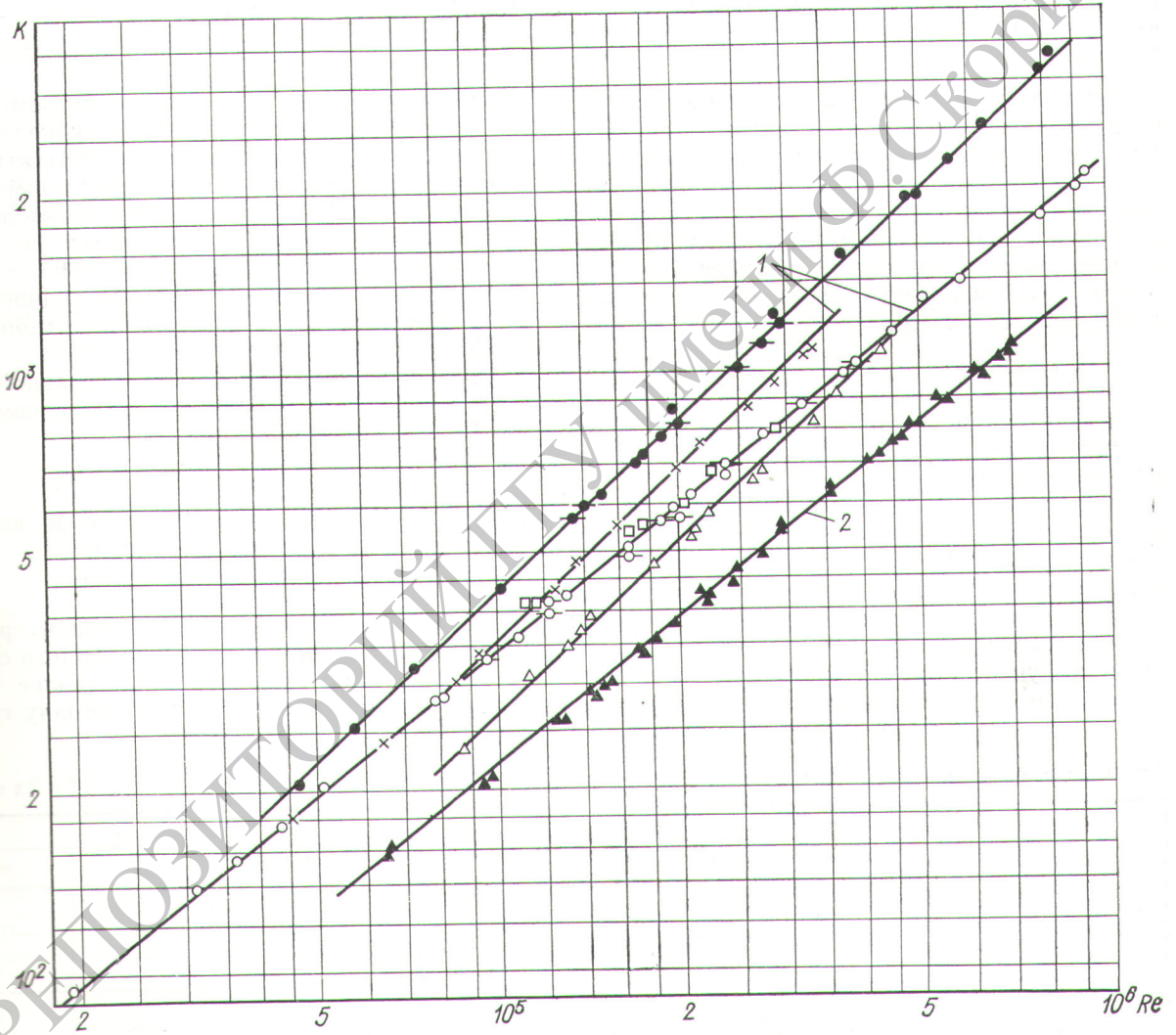


Рис. 2. Влияние шероховатости на теплоотдачу.

Манеты прутковых твэлов,  $K = f(Re)$ : гладкие прутки:  $\circ$  — воздух,  $\bar{T}_{ст} \approx 375^\circ \text{K}$ ,  $\psi = 1,2-1,3$ ;  $\circ$  — воздух,  $\bar{T}_{ст} \approx 500^\circ \text{K}$ ,  $\psi \approx 1,6$ ;  $\square$  —  $\text{CO}_2$ ,  $\bar{T}_{ст} \approx 725^\circ \text{K}$ ;  $\psi \approx 1,3$ ; шероховатые прутки:  $\times$  —  $h/d_0 = 0,00095$ , воздух,  $\bar{T}_{ст} \approx 375^\circ \text{K}$ ,  $\psi \approx 1,25$ ,  $h/d_0 = 0,0026$ ;  $\bullet$  — воздух,  $\bar{T}_{ст} \approx 375^\circ \text{K}$ ,  $\psi = 1,2-1,3$ ;  $\bullet$  —  $\text{CO}_2$ ,  $\bar{T}_{ст} \approx 725^\circ \text{K}$ ,  $\psi \approx 1,3$ ; 1 — расчет по формуле (5). Кольцевые каналы,  $Nu = f(Re)$ :  $\blacktriangle$  — гладкая поверхность;  $\triangle$  — шероховатость,  $h/d_0 = 0,0016$ ; 2 — расчет по формуле (3).

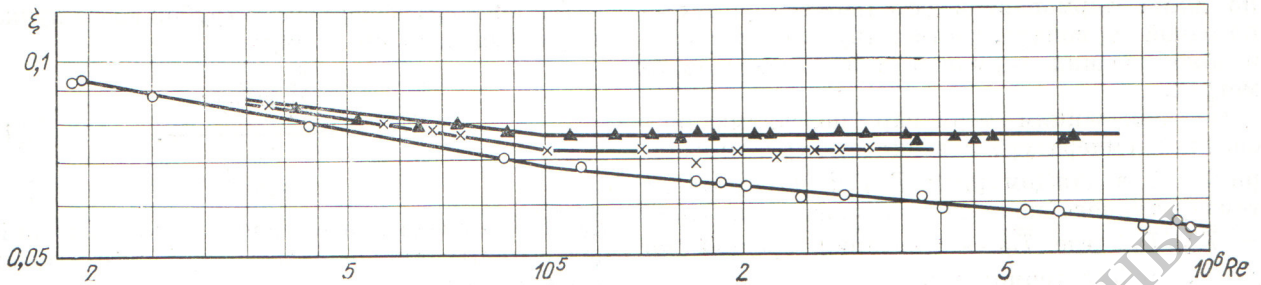


Рис. 3. Влияние шероховатости на сопротивление:

○ — макет с гладкими прутками; ×, ▲ — шероховатые прутки,  $h/d_0$  равно 0,00095 и 0,0026 соответственно; — — расчет по формуле (6).

Температура потока  $\bar{T}_r$  подсчитывалась как среднеарифметическая из показаний термопар на входе в рабочий участок и выходе из него и являлась определяющей для выбора физических констант. Тепловая нагрузка подсчитывалась по электрической мощности и проверялась по подогреву газа. Разбаланс составлял менее 5%. Результаты опытов обрабатывались в безразмерном виде:

$$Nu = \frac{\alpha d_0}{\lambda}; Re = \frac{w d_0}{\nu}; \xi = \frac{2\Delta P}{\rho w^2} \frac{d_0}{L}. \quad (2)$$

Влияние температурного фактора на теплоотдачу учитывалось введением принятой в литературе поправки  $\psi^{-0,55}$ .

На рис. 2 представлены результаты опытов по теплоотдаче в виде зависимости  $K = f(Re)$ , где  $K = Nu/Pr^{0,4} \psi^{-0,55}$ . Получены характерные для теплоотдачи шероховатых поверхностей кривые, причем для шероховатости меньших относительных размеров ( $h/d_0 \approx 0,00095$ ) хорошо виден участок, на котором влияние шероховатости не обнаруживается, и участок с явно

выраженным влиянием шероховатости (при  $Re \geq 8 \cdot 10^4$ ). Для сравнения на этом же графике в виде  $Nu = f(Re)$  приведены результаты опытов по теплоотдаче воздуха гладкой и шероховатой ( $h/d_0 = 0,0016$ ) трубок с наружным диаметром  $d_0 = 5 \cdot 10^{-3}$  м, помещенных в канал с внутренним диаметром  $d_2 = 0,064$  м. При этом образуется кольцевой канал с односторонним внутренним обогревом и отношением  $d_2/d_1 = 12,8$ .

Опытные данные по теплоотдаче гладкой трубки хорошо согласуются с зависимостью Б. С. Петухова [6]:

$$Nu_1 = 0,86 Nu_{тр} (d_1/d_2)^{-0,16} \zeta, \quad (3)$$

где  $Nu_{тр}$  — теплоотдача воздуху в круглой трубе подсчитывалась по формуле

$$Nu_{тр} = 0,0186 Re^{0,8} \psi^{-0,5}. \quad (4)$$

Разница в показателе степени при  $\psi$ , равном 0,5 и 0,55, незначительна и для данного случая ( $\psi = 1,15$ ) дает погрешность не более 0,5%. Влияние шероховатости на теплоотдачу трубки

Значения коэффициентов в формулах (5) и (6)

Таблица 2

Пучки	Формула (5)			Формула (6)		
	Пределы чисел Re	c	m	Пределы чисел Re	c <sub>1</sub>	m <sub>1</sub>
Пучок 1, гладкий	2·10 <sup>4</sup> —10 <sup>6</sup>	0,035	0,8	2·10 <sup>4</sup> —10 <sup>5</sup> 10 <sup>5</sup> —10 <sup>6</sup>	0,68 0,215	—0,2 —0,1
Пучок 2, $h/d_0 = 0,00095$	4·10 <sup>4</sup> —8·10 <sup>4</sup> 8·10 <sup>4</sup> —4·10 <sup>5</sup>	0,035 0,0056	0,8 0,96	10 <sup>5</sup> —4·10 <sup>5</sup>	0,072	0
Пучок 3, $h/d_0 = 0,0026$	3·10 <sup>4</sup> —10 <sup>6</sup>	0,0068	0,96	3·10 <sup>4</sup> —10 <sup>5</sup> 10 <sup>5</sup> —10 <sup>6</sup>	0,34 0,076	—0,13 0

в кольцевом канале аналогично влиянию ее в сборках тепловыделяющих прутков.

Результаты опытов по гидравлическому сопротивлению сборок при изотермическом течении воздуха приведены на рис. 3. На этом же рисунке показаны характерные для поверхностей с малой относительной шероховатостью кривые сопротивлений, которые при  $Re \geq 10^5$  переходят в прямые, не зависящие от чисел  $Re$ .

Теплоотдача исследованных сборок описывается эмпирической формулой

$$Nu = c Re^m Pr^{0,4\psi-0,55}, \quad (5)$$

а гидравлическое сопротивление

$$\xi = c_1 Re^{m_1}. \quad (6)$$

Значения чисел  $c$ ,  $m$ ,  $c_1$  и  $m_1$  в соответствующих диапазонах изменения чисел  $Re$  приведены в табл. 2.

Следует отметить несколько большее увеличение теплоотдачи (до 80%) по сравнению с сопротивлением (до 40%) под воздействием шероховатости. Это вызвано тем, что основная доля сопротивления сборки приходится на массивные головки, поэтому даже значительное

повышение коэффициента трения тепловыделяющих прутков под воздействием шероховатости не дает существенного повышения сопротивления всей сборки, в то время как повышение теплоотдачи обусловлено главным образом турбулизацией элементами шероховатости ламинарного подслоя на поверхности прутков. Таким образом, шероховатость позволяет существенно повысить тепловые характеристики сборок твэлов газоохлаждаемых реакторов. Шероховатость может быть также использована и для интенсификации теплообмена в элементах энергетического оборудования.

Поступила в Редакцию 7/X 1971 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. N. Kattchee, W. Maskevicz. Экспресс-информация «Теплоэнергетика», № 46, 1964.
2. E. Adam. Kernenergie, 9, No. 1, 1 (1966).
3. G. Grunwald. Kernenergie, 9, No. 11, 345 (1966).
4. W. Sutherland. Internat. J. of Heat and Mass Transfer, 10, No. 11, 1589 (1967).
5. Г. А. Дрейдер, Э. К. Калинин. «Инж.-физ. ж.», 15, № 3, 408 (1968).
6. Б. С. Петухов, Л. Н. Ройзен. «Теплофизика высоких температур», 2, № 1, 78 (1964.)

#### ПОПРАВКИ

В работе В. П. Лупенко, Н. В. Полянского, С. П. Добровольского «О торможении осколков деления  $U^{235}$  в легких средах» (т. 32, вып. 5, стр. 411) допущены следующие опечатки:

1) в формуле (1) вместо  $Z_{эфф}$  следует читать  $Z_{эфф}^2$ ;

2) параметр  $\xi$  (стр. 411, левая колонка, 5-я строка снизу) должен

иметь вид  $\xi = \frac{e^2}{a_0} \cdot \frac{Z_1^{1/6} Z_2^{5/6}}{I}$ .