

УДК 532.529.5

## О ТЕПЛООТДАЧЕ ТРУБЧАТОГО ВОДО-ВОДЯНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА И ЕЕ ОЦЕНКАХ ПО НЕКОТОРЫМ КРИТЕРИАЛЬНЫМ МОДЕЛЯМ

© 2022 г. А. А. Коноплев<sup>а</sup>, \*, Б. Л. Рытов<sup>а</sup>, Ал. Ал. Берлин<sup>а</sup>, С. В. Романов<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, ул. Косыгина, 4, Москва, 119991 Россия

<sup>б</sup>ООО “НПП “Энергосистемы”, Семеновская наб., 2/1, Москва, 105094 Россия

\*e-mail: alexey.konoplev@gmail.com

Поступила в редакцию 14.04.2022 г.

После доработки 25.06.2022 г.

Принята к публикации 03.07.2022 г.

Поскольку известно, что результаты расчетов по различным критериальным моделям конвективно-теплообмена могут отличаться между собой, проведено сравнение экспериментальных данных по теплоотдаче, полученных в экспериментах на лабораторных водо-водяных трубчатых теплообменниках с гладкими трубками трех различных диаметров при нормальном давлении и умеренных температурах с результатами расчетов по критериальным моделям Б.С. Петухова, С.С. Кутателадзе, Нуссельта и М.А. Михеева. Эксперименты проводились на двумерной сетке расходов трубного и межтрубного канала, что позволяет, в соответствии с разработанной ранее методикой построить продольные профили теплообменных параметров. Результаты обработки экспериментальных данных по методу средних значений и по продольным профилям сравниваясь между собой, демонстрируют хорошее совпадение. Обнаружено, что отклонения данных экспериментов от результатов расчетов по критериальным моделям носят систематический характер, зависят от области определяющих параметров, т.е., чисел Рейнольдса и Прандтля  $Re-Pr$ , в которых они сравниваются, возрастают с ростом числа  $Re$ , а в зависимости от числа  $Pr$  имеют экстремум.

**Ключевые слова:** теплотехнический эксперимент, конвективный теплообмен, трубчатый теплообменник, трубный канал, критериальная модель

**DOI:** 10.31857/S0040357122060082

### ВВЕДЕНИЕ

Трубчатые теплообменники, обладают, как известно, некоторыми определенными преимуществами перед другими видами теплообменного оборудования, что делает их применение, по крайней мере, для некоторых технологических задач теплообмена, предпочтительным.

Поэтому задача создания современного высокоэффективного и экономичного трубчатого теплообменного оборудования является сегодня весьма актуальной задачей. Для своего решения эта задача требует, с одной стороны разработки высокоэффективных и технологичных методов интенсификации конвективного теплообмена, с другой — достаточно точных методов ее оценки и расчета теплообменных характеристик.

В настоящее время большинство теплотехнических расчетов конвективного теплообмена осуществляется с помощью критериальных моделей конвективного теплообмена, точность которых в пределах 15–25% считается допустимой.

Будучи по сути своей моделями эмпирическими, т.е., когда соотношения между критериями определяемыми (например, критерий Нуссельта  $Nu$ ) и критериями определяющими (например, критериями Рейнольдса  $Re$  и Прандтля  $Pr$ ) находятся из экспериментов. Желая, по-видимому, добиться большей универсальности выстраиваемых моделей, эксперименты, которые проводятся для установления значений эмпирических модельных коэффициентов осуществляются с разными средами и при различных условиях. Таким образом, удалось построить несколько критериальных моделей для достаточно больших диапазонов изменения определяющих критериев, сужение же этих диапазонов позволяет несколько упростить модельные выражения (см., напр., [1, 2]). При этом, достаточно большие ошибки в расчетах по критериальным моделям считаются результатом плохо контролируемых условий проведения экспериментов — состоянием теплообменной поверхности, влиянием условий ввода потоков, начальных участков и т.п.

Поэтому, целью нашей работы являлось проведение экспериментов в водо-водяном трубчатом теплообменнике при нормальных давлениях и температурах, и сравнении полученных результатов с результатами расчетов по некоторым хорошо известным критериальным моделям.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Теплотехнические эксперименты проводились на лабораторных трубчатых теплообменниках типа “труба в трубе” с гладкими медными трубками трех различных диаметров и длин. В том числе теплообменник с трубкой с внутренним диаметром  $D = 0.008$  м, длиной  $L = 0.53$  м и безразмерной длиной  $L/D = 66.25$  (Т08), теплообменник с трубкой  $D = 0.014$  м и безразмерной длиной  $L/D = 78$  (Т14), теплообменник с трубкой  $D = 0.02$  м и  $L/D = 76.2$  (Т20).

Греющими каналами могли быть как трубные, так и межтрубные. Входную температуру теплоносителей греющих каналов стремились поддерживать постоянной и равной приблизительно  $70^\circ\text{C}$ , а входная температура теплоносителей нагреваемых каналов определялась температурой воды в водопроводной сети.

Измерения экспериментальных параметров проводили по разработанной нами ранее методике в узлах двумерной сетки расходов трубного  $G_{\text{тр}}$  и межтрубного  $G_{\text{мт}}$  каналов, что в конечном итоге позволяет построить (точнее, приблизить) продольные профили теплотехнических параметров. Сущность этой методики, вкратце, заключается в следующем. Зафиксировав входные температуры теплоносителей трубного  $t_{\text{тр, вх}}$  и межтрубного  $t_{\text{мт, вх}}$  каналов (т.е., две из четырех независимых переменных теплообмена), для двух других независимых переменных, а именно, расходов каналов  $G_{\text{тр}}$  и  $G_{\text{мт}}$  можно построить уравнение теплового потока  $Q = Q(G_{\text{тр}}, G_{\text{мт}})$ . Анализ которого, позволяет из коэффициента теплопередачи  $K$  выделить коэффициенты теплоотдачи трубного  $\alpha_{\text{тр}}$  и межтрубного  $\alpha_{\text{мт}}$  каналов, а в предположении, что изменения коэффициентов теплоотдачи каналов по их длине могут быть приближены какой-либо подходящей функцией, например, полиномом, позволяет найти коэффициенты этой самой функции и построить продольные распределения искомых теплотехнических параметров. Средние значения параметров, при этом, могут быть получены осреднением этих самых распределений.

Таким образом, построение зависимостей теплотехнических параметров от расходов, например,  $\alpha_{\text{тр}} = f(G_{\text{тр}}, G_{\text{мт}})$ , или, произведя замену переменных,  $\alpha_{\text{тр}} = f(\text{Re}_{\text{тр}}, \text{Re}_{\text{мт}})$ , позволяет построить математическую модель процесса теплообмена, теплотехнические параметры которого могут быть представлены как средними их значениями,

так и распределениями по длине. Подробнее о методике смотри в [1], а о ее применении, например, в [2].

Распределения параметров по длине канала позволяют более детально описать процесс теплообмена, увеличив при этом и объем определяемых данных, и область их определения  $\text{Re}-\text{Pr}$ . Очевидно, что использование распределений параметров наиболее эффективным может быть для длинных теплообменных каналов, т.е., таких, у которых безразмерная длина  $L/D$  достаточно велика, и может составлять величину вплоть до нескольких сотен единиц. Обычно, это промышленные, а не лабораторные теплообменники.

Конструктивные параметры теплообменных аппаратов Т08, Т14 и Т20 представлены в табл. 1. Там же приведены режимные и расходные параметры проведенных экспериментов, а также расчетов характеристик теплообмена для условий турбулентного режима течения теплоносителя трубного канала.

На рисунке 1 в качестве иллюстрации приведены зависимости тепловых потоков  $Q = Q(G_{\text{тр}}, G_{\text{мт}})$  для случаев греющего и нагреваемого трубных каналов теплообменника Т20 при минимальных и максимальных расходах теплоносителей по межтрубному каналу. В каждой точке экспериментальной сетки расходов проводились по три измерения, среднее значение из которых представлено на графиках. Среднее среднеквадратичное относительное отклонение  $oQ$  теплового потока  $Q$  определялось по этим осредненным значениям. Значения  $oQ$  для всех шести проведенных экспериментов с разными теплообменниками представлены в табл. 1.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для представления экспериментальных данных с помощью решения уравнения для теплового потока мы использовали сетку задаваемых расходов  $G_{\text{тр}} \times G_{\text{мт}}$ , состоящую из  $5 \times 5$  равноотстоящих узлов, что принято с целью не слишком большого увеличения объема рассматриваемых данных. При этом, все задаваемые расходы принадлежали непосредственно областям изменения расходов, имевших место быть в эксперименте, но выбирались такими образом, чтобы получаемые значения теплообменных параметров принадлежали только турбулентному режиму течения теплоносителя в трубном канале. Средние значения рассчитываемых таким образом параметров, определялись как значения, получаемые осреднением продольных распределений параметров по длине канала теплообменника.

Рассчитывались также значения параметра  $(\text{Pr}/\text{Pr}_w)^{0.25}$ , который, как это предполагается (напр., в [5]), достаточно хорошо учитывает зави-

**Таблица 1.** Параметры конструктивные теплообменников, режимные<sup>1)</sup> эксперимента и расходные для расчета турбулентного режима

№ п/п	Теплообменник	L, м	D, м	D <sub>н</sub> , м	D <sub>к</sub> , м	Трубный канал	t <sub>вх</sub> , °С	Эксперимент				Расчет		
								G <sub>min</sub> , л/с	G <sub>max</sub> , л/с	Сетка расходов G <sub>тр</sub> × G <sub>мт</sub>	oQ, кВт	G <sub>min</sub> , л/с	G <sub>max</sub> , л/с	Сетка расходов G <sub>тр</sub> × G <sub>мт</sub>
1	2	3	4		5	6	7	8	9	10	11	12	13	15
1	Т08	0.53	0.008	0.01	0.022	Греющий	70.2	0.012	0.111	8 × 8	0.0229	0.038	0.11	5 × 5
							9.6	0.062	0.214		0.11	0.21		
						Нагреваемый	3.3	0.034	0.218	8 × 8	0.0175	0.11	0.21	5 × 5
							70.7	0.02	0.112		0.038	0.11		
2	Т14	1.092	0.014	0.016	0.022	Греющий	69.9	0.025	0.332	8 × 8	0.0149	0.17	0.33	5 × 5
							3.5	0.107	0.365		0.18	0.36		
						Нагреваемый	3.4	0.052	0.364	8 × 8	0.016	0.18	0.36	5 × 5
							70	0.09	0.332		0.17	0.33		
3	Т20	1.524	0.02	0.024	0.035	Греющий	70	0.04	0.25	8 × 8	0.0128	0.11	0.25	5 × 5
							4.8	0.108	0.377		0.23	0.37		
						Нагреваемый	7.6	0.074	0.377	7 × 7	0.0141	0.23	0.37	5 × 5
							70	0.102	0.25		0.11	0.25		

Примечания. <sup>1)</sup> В ячейках, содержащих две строки данных, данные первой строки относятся к трубному каналу, второй – к межтрубному.

симось теплоотдачи от направления теплового потока. Полученные результаты для случаев минимальных и максимальных расходов теплоносителей представлены в качестве иллюстрации в табл. 2.

Найденные по экспериментальным данным значения критериальных чисел  $Nu = Nu(Re, Pr)$  соотносились со значениями  $Nu_{KM} = Nu_{KM}(Re, Pr)$  рассчитываемыми по критериальным моделям, в качестве которых рассматривались следующие.

Критериальная модель 1 (**КМ1**) – модель Б.С. Петухова-Кириллова, область применения которой определена как  $-4 \times 10^3 < Re < 5 \times 10^6$  и  $0.5 < Pr < 5 \times 10^5$  [см., напр., 3]:

$$Nu = \frac{\zeta Re Pr}{8 + 7200/Re + 35.9\sqrt{\zeta}(Pr^{2/3} - 1)}. \quad (1)$$

Критериальная модель 2 (**КМ2**) – модель С.С. Кутателадзе, которая может быть использована для газов и неметаллических жидкостей в стабилизированном потоке при  $Pr > 0.5$  [4]:

$$Nu = \frac{0.14 Pr Re \sqrt{\zeta}}{\ln Re \sqrt{\zeta} + 2 \ln \frac{1 + 5Pr}{1 + 0.2 Pr} + 2.4 Pr f(Pr) - 6.638}, \quad (2)$$

где функция  $f(Pr)$  может быть представлена графически.

Критериальная модель 3 (**КМ3**) – модель Нуссельта–Кроуссоляда, которая, по мнению [4], дает неплохие результаты при  $0.5 < Pr < 5$ :

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}. \quad (3)$$

Критериальная модель 4 (**КМ4**) – модель академика М.А. Михеева, получившая ныне, пожалуй, наиболее широкое распространение для проведения теплотехнических расчетов (см., напр., [3, 4, 6]):

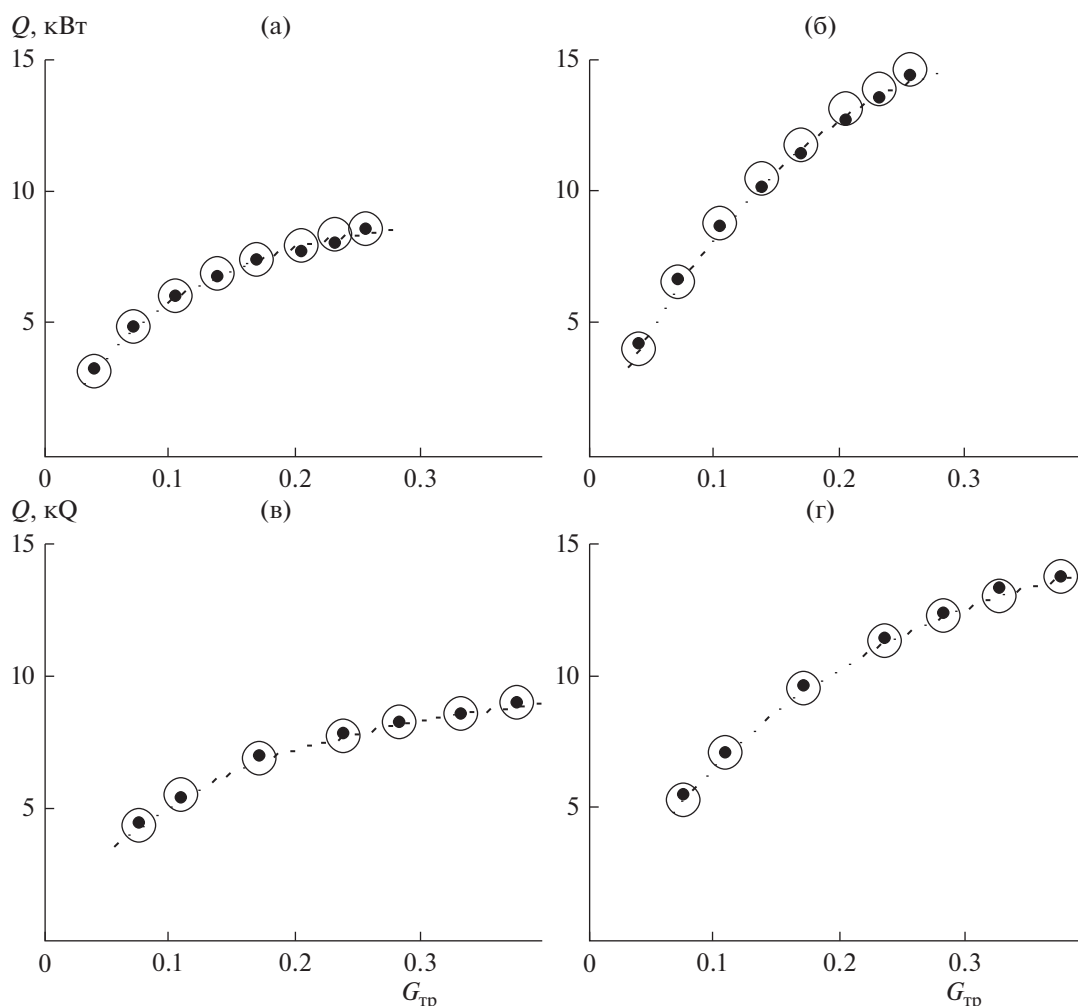
$$Nu = 0.021 Re^{0.8} Pr^{0.43}. \quad (4)$$

Кроме того, значения  $Nu$ , найденные из экспериментов, мы непосредственно аппроксимировались степенной функцией, той самой, которая послужила основой для двух последних рассматриваемых нами моделей (3)–(4):

$$Nu(a, b, c) = a Re^b Pr^c, \quad (5)$$

коэффициенты  $a$ ,  $b$  и  $c$  для которой находились с точностью до 2-х, и с точностью до 5-ти значащих цифр. Эти аппроксимации обозначим как аппроксимационная модель 2 (**АМ2**), и аппроксимационная модель 5 (**АМ5**) соответственно.

Значения чисел  $Nu$ , найденные из экспериментальных данных посредством расчетов как по средним значениям параметров теплообмена, так и по значениям их продольных профилей, соотносились со значениями  $Nu_{KM}$ , рассчитываемым по моделям (1)–(5), в соответствующих для каждого проведенного эксперимента областях определения ( $Re_{min} \leq Re \leq Re_{max}$ )–( $Pr_{min} \leq Pr \leq Pr_{max}$ ) искомым параметрам. Полученные результаты  $Nu/Nu_{KM} = Nu/Nu_{KM}(Re, Pr)$  представлены в табл. 3 в виде соответствующих средних значений  $Srd$  и



**Рис. 1.** Теплообменник Т20, тепловой поток  $Q(G_{\text{тр}}, G_{\text{мт}})$ , в зависимости от расходов  $G_{\text{тр}}$  при минимальных и максимальных расходах  $G_{\text{мт}}$ : осредненные по трем измерениям экспериментальные значения трубного (точки) и межтрубного (кружки) каналов, и аппроксимирующие (штрих-пунктирные) кривые; (а) – трубный канал греющий,  $G_{\text{мт}} = 0.108$ , (б) – то же,  $G_{\text{мт}} = 0.376$ , (в) – трубный канал нагреваемый,  $G_{\text{мт}} = 0.102$ , (г) – то же,  $G_{\text{мт}} = 0.25$  л/с.

среднеквадратичных отклонений  $\sigma S$  от среднего значения  $S_{\text{рд}}$ , а также среднеквадратичных отклонений  $\sigma I$  от значения, равного 1. Кроме того, эти результаты были аппроксимированы двумерной параболой, и среднеквадратичное отклонение аппроксимации  $\sigma a$  также приведено в табл. 3.

Вычисление продольных распределений теплообменных параметров по длине трубного канала позволяют увеличивать не только объем получаемых из эксперимента данных (см., табл. 2), но и области их определения  $Re-Pg$  (см. табл. 3). Так даже для наших теплообменников при сравнительно небольших длинах теплообменных каналов, увеличение, как это следует из приведенных в таблице 3 данных, диапазона по числу Рейнольдса составляет для греющих каналов 1.11–1.24, для нагреваемых – 1.19–1.51 раза. По числу же Прандтля увеличение диапазона изменения

гораздо больше, и составляет для греющих каналов 3.26–4.41, для нагреваемых – 3.06–3.93 раза.

Из приводимых в таблице 3 данных следует, что результаты расчетов по средним значениям параметров теплообмена и по продольным их профилям весьма близки. Несколько возрастают средние значения  $S_{\text{рд}}$ , на доли процента, а также отклонения  $\sigma S$  от значения  $S_{\text{рд}}$ , величины которых при этом не превышают 7% (см. табл. 3). Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о применимости методики построения продольных профилей к оценке экспериментальных данных.

Наименьшее расхождение с результатами экспериментов во всех случаях имеют результаты расчетов по модели КМ1, наибольшее – по модели КМ4, результаты же расчетов по моделям КМ2 и КМ3 занимают промежуточное положение, а

**Таблица 2.** Распределения параметров теплообмена по длине трубного канала теплообменника<sup>1)</sup> и средние их значения при минимальных и максимальных расходах теплоносителей

Теплообменник	Трубный канал греющих										Трубный канал нагреваемый									
	$l/L$	$G_{гр}$ , л/с	$G_{лт}$ , л/с	$t$ , °C	$K$ , кВт/(м <sup>2</sup> К)	$Re \times 10^{-3}$	$Pr$	$\alpha$ , кВт/(м <sup>2</sup> К)	$Nu$	$Pr/P_{гв}$	$G_{гр}$ , л/с	$G_{лт}$ , л/с	$t$ , °C	$K$ , кВт/(м <sup>2</sup> К)	$Re \times 10^{-3}$	$Pr$	$\alpha$ , кВт/(м <sup>2</sup> К)	$Nu$	$Pr/P_{гв}$	
Т08	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
	0	0.038	0.11	58.73	2.11	12.42	3.02	5.84	71.09	0.899	0.11	0.038	3.3	1.77	10.91	12.09	9.13	131	1.12	
	0.25			61.54	2.06	12.96	2.89	5.68	68.74	0.898			4.21	1.8	11.23	11.7	9.52	136.1	1.119	
	0.5			64.38	2.02	13.51	2.76	5.52	66.52	0.896			5.17	1.83	11.57	11.3	9.94	141.5	1.118	
	0.75			67.26	1.97	14.07	2.64	5.36	64.42	0.895			6.17	1.87	11.94	10.9	10.37	147	1.117	
	1			70.2	1.93	14.65	2.53	5.22	62.45	0.894			7.23	1.9	12.34	10.5	10.82	152.7	1.116	
	<i>Srd</i>			64.41	2.02	13.52	2.77	5.52	66.61	0.897			5.2	1.83	11.59	11.3	9.95	141.6	1.118	
	0	0.11	0.21	62.71	3.83	38.16	2.83	14.65	177.1	0.926	0.21	0.11	3.3	3.15	20.83	12.09	18.21	261.3	1.116	
	0.25			64.59	3.75	39.21	2.75	14.41	173.7	0.927			4.2	3.19	21.44	11.7	18.91	270.3	1.113	
	0.5			66.46	3.67	41.28	2.67	14.18	170.5	0.928			5.13	3.23	22.07	11.31	19.62	279.4	1.11	
0.75			68.32	3.59	41.34	2.6	13.96	167.5	0.928			6.09	3.26	22.74	10.94	20.35	288.6	1.107		
1			70.2	3.51	42.4	2.53	13.75	164.6	0.929			7.1	3.29	23.43	10.56	21.1	297.9	1.104		
<i>Srd</i>			66.45	3.67	40.28	2.68	14.19	170.6	0.928			5.15	3.23	22.09	11.32	19.63	279.5	1.11		
Т14	0	0.17	0.18	58.68	2.65	31.73	3.03	7.47	159	0.898	0.18	0.17	3.4	2.7	10.24	12.04	5.71	143.3	1.243	
	0.25			61.5	2.63	33.11	2.86	7.35	155.7	0.9			6.06	2.79	11.13	10.94	6.04	149.9	1.229	
	0.5			64.31	2.61	34.5	2.76	7.23	152.7	0.902			8.82	2.89	12.1	9.94	6.39	156.6	1.215	
	0.75			67.12	2.6	35.9	2.65	7.12	149.8	0.904			11.69	2.98	13.14	9.02	6.75	163.4	1.201	
	1			69.9	2.59	37.33	2.54	7.02	147.2	0.905			14.67	3.07	14.26	8.2	7.12	170	1.188	
	<i>Srd</i>			64.31	2.62	34.51	2.77	7.24	152.8	0.902			8.9	2.89	12.15	10	6.4	156.6	1.215	
	0	0.33	0.36	59.85	4.51	62.7	2.97	13.32	283	0.902	0.36	0.33	3.4	4.76	20.47	12.04	10.75	269.8	1.233	
	0.25			62.38	4.47	65.11	2.85	13.13	278	0.904			5.79	4.89	22.07	11.05	11.3	280.8	1.221	
	0.5			64.9	4.44	67.53	2.74	12.96	273.3	0.906			8.25	5.03	23.79	10.13	11.87	291.9	1.209	
	0.75			67.41	4.42	69.98	2.64	12.79	268.9	0.907			10.79	5.17	25.62	9.29	12.46	302.9	1.197	
1			69.9	4.39	72.46	2.54	12.63	274.8	0.909			13.42	5.3	27.57	8.53	13.07	313.8	1.185		
<i>Srd</i>			64.89	4.45	67.55	2.74	12.96	273.5	0.906			8.31	5.03	23.87	10.19	11.89	291.9	1.209		
Т20	0	0.11	0.23	52.39	1.34	13.02	3.37	2.82	86.6	0.863	0.23	0.11	7.6	1.31	10.43	10.37	3.33	117.1	1.169	
	0.25			56.55	1.33	13.91	3.14	2.75	83.92	0.861			9.39	1.35	11	9.74	3.47	121.2	1.169	
	0.5			60.87	1.32	14.86	2.92	2.69	81.45	0.859			11.35	1.39	11.64	9.12	3.62	125.4	1.168	
	0.75			65.36	1.31	15.86	2.72	2.63	79.18	0.857			13.47	1.43	12.35	8.52	3.79	129.8	1.167	
	1			70	1.3	16.93	2.54	2.58	77.13	0.855			15.76	1.47	13.13	7.93	3.96	134.5	1.166	
	<i>Srd</i>			60.99	1.32	14.9	2.93	2.69	81.6	0.859			11.47	1.39	11.69	9.13	3.63	125.5	1.168	
	0	0.25	0.37	56.14	2.3	31.41	3.16	5.81	177.4	0.884	0.37	0.25	7.6	2.21	16.77	10.37	5.22	183.9	1.195	
	0.25			59.5	2.3	33.07	2.99	5.72	173.7	0.884			9.63	2.27	17.82	9.66	5.46	190.6	1.189	
	0.5			62.93	2.3	34.8	2.82	5.63	170.2	0.885			11.79	2.34	18.96	8.99	5.71	197.4	1.183	
	0.75			66.43	2.3	36.6	2.67	5.55	167	0.885			14.06	2.4	20.19	8.36	5.97	204.3	1.177	
1			70	2.29	38.47	2.54	5.48	164.1	0.885			16.46	2.47	21.5	7.76	6.24	211.3	1.171		
<i>Srd</i>			62.98	2.3	34.85	2.83	5.64	170.4	0.885			11.87	2.34	19.03	9.02	5.72	197.5	1.183		

Примечания. <sup>1)</sup> Начало координат совмещено со входом в теплообменник нагреваемого теплоносителя.

Таблица 3. Сравнение данных, полученных из экспериментов, с расчетами по критериальным моделям  $Nu/Nu_{KM}$  для трубчатого канала в турбулентном режиме

Теплообменник	Прешии канал	Критериальная модель	Расчет по средним значениям параметров теплообмена							Расчет по значениям продольных профилей параметров теплообмена								
			$n$	$10^{-3} Re$	Pr	$Srd$	$\alpha S$	$\alpha l$	$\alpha a$	$n$	$10^{-3} Re$	Pr	$Srd$	$\alpha S$	$\alpha l$	$\alpha a$		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17		
Т08	Трубный	КМ1	25	13.3–40.79	2.63–2.82	1.009	0.008	0.012	0.0029	125	12.02–42.41	2.52–3.14	1.009	0.054	0.055	0.0071		
		КМ2				1.021	0.012	0.024	0.0022				1.022	0.054	0.058	0.0042		
		КМ3				1.094	0.013	0.095	0.0010				1.097	0.059	0.113	0.0015		
		КМ4				1.163	0.014	0.164	0.0010				1.165	0.061	0.176	0.0016		
		AM2 <sup>1)</sup>				1.003	0.009	0.010	0.0008				0.995	0.052	0.052	0.0013		
		AM5 <sup>7)</sup>				1.0000	0.0011	0.0011	0.0003				1.0000	0.010	0.010	0.0009		
		Межтрубный			25	11.58–22.1	10.85–11.64	1.25	0.053	0.255	0.0078	125	10.9–23.43	9.68–12.1	1.246	0.069	0.256	0.0079
Т14	Трубный	КМ1	25	33.69–68.96	2.67–2.85	1.06	0.013	0.061	0.0082	125	30.24–72.46	2.53–3.19	1.068	0.05	0.085	0.0117		
		КМ2				1.085	0.011	0.086	0.0047				1.092	0.05	0.104	0.0069		
		КМ3				1.177	0.013	0.177	0.0005				1.18	0.059	0.189	0.0017		
		КМ4				1.25	0.014	0.25	0.0005				1.253	0.061	0.26	0.0018		
		AM2 <sup>3)</sup>				0.997	0.009	0.009	0.0004				0.996	0.047	0.047	0.0014		
		AM5 <sup>9)</sup>				1.0000	0.0007	0.0007	0.0003				1.0000	0.015	0.015	0.0014		
		Межтрубный			25	12.14–23.87	9.48–10.7	1.269	0.02	0.269	0.0048	125	10.23–27.58	7.41–12.05	1.276	0.03	0.278	0.0085
		КМ2				1.325	0.027	0.327	0.0038				1.334	0.027	0.335	0.0067		
		КМ3				1.402	0.035	0.403	0.0003				1.408	0.05	0.411	0.0013		
		КМ4				1.432	0.035	0.434	0.0003				1.439	0.055	0.442	0.0013		
AM2 <sup>4)</sup>				0.996	0.018	0.018	0.0002				1.001	0.033	0.033	0.0009				
AM5 <sup>10)</sup>				1.0000	0.0002	0.0002	0.0001				1.0000	0.015	0.015	0.0008				

Таблица 3. Окончание

Теплообменник	Греющий канал	Критерияльная модель	Расчет по средним значениям параметров теплообмена				Расчет по значениям продольных профилей параметров теплообмена									
			$n$	$10^{-3} \text{ Re}$	$Pr$	$Strd$	$oS$	$oI$	$oa$	$n$	$10^{-3} \text{ Re}$	$Pr$	$Strd$	$oS$	$oI$	$oa$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Т20	Грубый	КМ1	25	14.65–35.44	2.77–2.99	1.152	0.01	0.153	0.0041	125	12.6–38.47	2.53–3.5	1.165	0.069	0.179	0.0094
			КМ2			1.169	0.009	0.169	0.0029				1.179	0.069	0.192	0.0057
			КМ3			1.26	0.013	0.26	0.0008				1.266	0.08	0.277	0.0017
			КМ4			1.337	0.014	0.337	0.0009				1.343	0.081	0.352	0.0018
			АМ2 <sup>5)</sup>			0.998	0.006	0.007	0.0006				0.992	0.06	0.061	0.0013
		АМ5 <sup>11)</sup>			1.0000	0.0007	0.0007	0.0004			1.0000	0.0013	0.0013	0.0012	0.0012	
	Межтрубный	КМ1	25	11.68–19.02	8.65–9.47	1.103	0.016	0.105	0.0054	12.5	10.42–21.51	7.16–10.38	1.109	0.025	0.111	0.0072
		КМ2				1.141	0.019	0.142	0.0041				1.146	0.022	0.148	0.0048
		КМ3				1.212	0.024	0.214	0.0001				1.216	0.037	0.219	0.0010
		КМ4				1.243	0.024	0.244	0.0001				1.247	0.04	0.25	0.0011
		АМ2 <sup>6)</sup>				1.003	0.016	0.016	0.0001				1.006	0.03	0.031	0.0009
		АМ5 <sup>12)</sup>				1.0000	0.0003	0.0003	0.0001				1.0000	0.0013	0.0013	0.0008

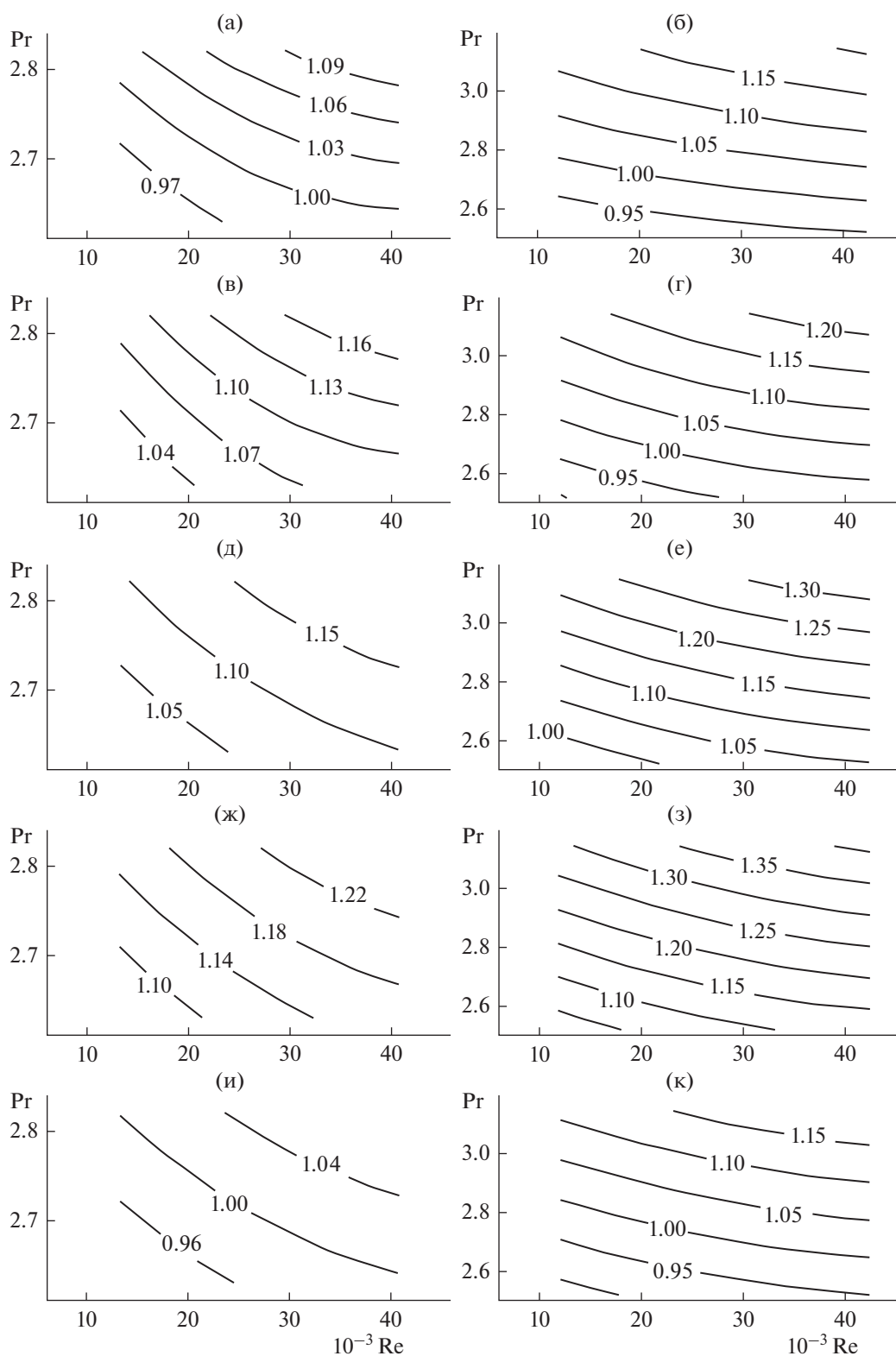
Примечания.

расчет по средним значениям:

- 1) –  $Nu_{AM2} = 0.022Re^{0.81}Pr^{0.43}$ ;
- 2) –  $Nu_{AM2} = 0.023Re^{0.82}Pr^{0.45}$ ;
- 3) –  $Nu_{AM2} = 0.021Re^{0.82}Pr^{0.44}$ ;
- 4) –  $Nu_{AM2} = 0.022Re^{0.83}Pr^{0.44}$ ;
- 5) –  $Nu_{AM2} = 0.023Re^{0.82}Pr^{0.43}$ ;
- 6) –  $Nu_{AM2} = 0.021Re^{0.82}Pr^{0.44}$ ;
- 7) –  $Nu_{AM5} = 4.3231 \times 10^{-3}Re^{0.8712}Pr^{1.442}$ ;
- 8) –  $Nu_{AM5} = 6.7622 \times 10^{-3}Re^{1.0561}Pr^{0.008289}$ ;
- 9) –  $Nu_{AM5} = 4.5366 \times 10^{-3}Re^{0.87692}Pr^{1.3407}$ ;
- 10) –  $Nu_{AM5} = 1.0709 \times 10^{-2}Re^{0.91431}Pr^{0.39338}$ ;
- 11) –  $Nu_{AM5} = 5.7577 \times 10^{-3}Re^{0.87746}Pr^{1.19111}$ ;
- 12) –  $Nu_{AM5} = 8.625 \times 10^{-3}Re^{0.92685}Pr^{0.37831}$ ;

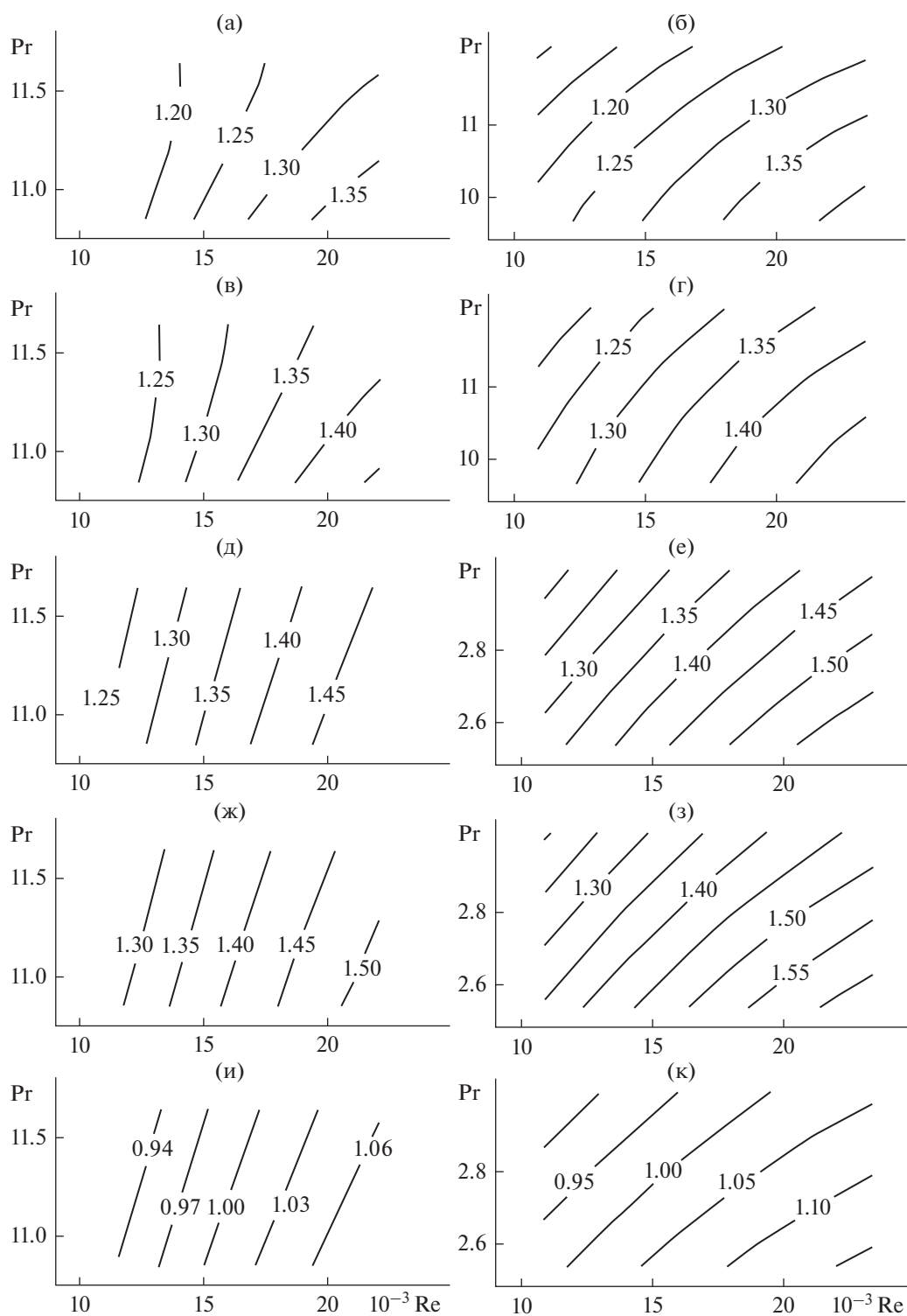
расчет по значениям продольных профилей:

- $$Nu_{AM2} = 0.022Re^{0.81}Pr^{0.44};$$
- $$Nu_{AM2} = 0.023Re^{0.82}Pr^{0.45};$$
- $$Nu_{AM2} = 0.023Re^{0.81}Pr^{0.46};$$
- $$Nu_{AM2} = 0.022Re^{0.83}Pr^{0.44};$$
- $$Nu_{AM2} = 0.023Re^{0.82}Pr^{0.44};$$
- $$Nu_{AM2} = 0.021Re^{0.82}Pr^{0.44};$$
- $$Nu_{AM5} = 4.114 \times 10^{-3}Re^{0.87164}Pr^{1.4886};$$
- $$Nu_{AM5} = 6.4301 \times 10^{-3}Re^{1.0633};$$
- $$Nu_{AM5} = 5.0777 \times 10^{-3}Re^{0.87176}Pr^{1.2869};$$
- $$Nu_{AM5} = 1.2693 \times 10^{-2}Re^{0.91914}Pr^{0.30126};$$
- $$Nu_{AM5} = 6.2645 \times 10^{-3}Re^{0.87185}Pr^{1.1692};$$
- $$Nu_{AM5} = 1.0034 \times 10^{-2}Re^{0.93229}Pr^{0.28686}$$

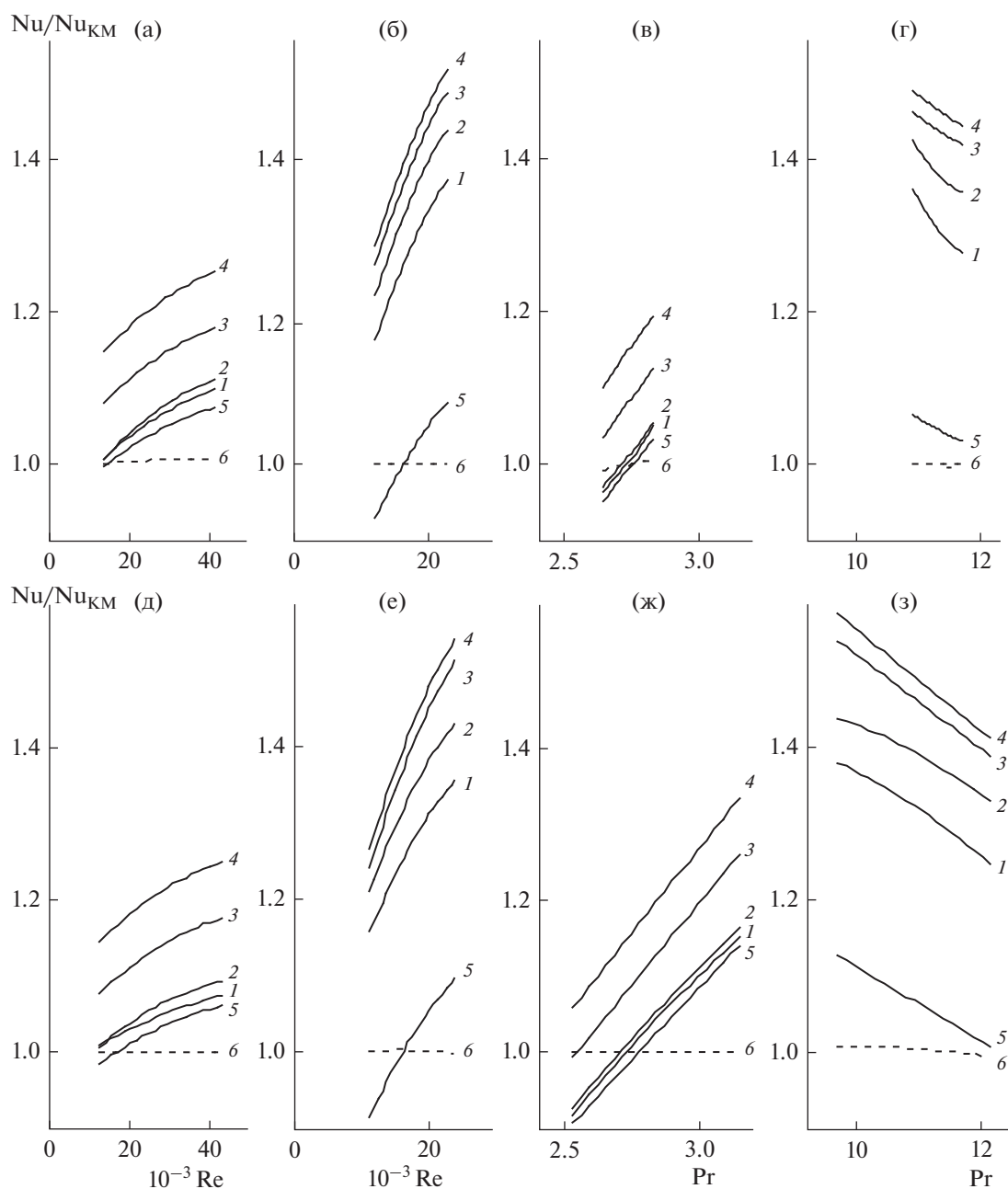


**Рис. 2.** Теплообменник Т08, трубный канал греющий. Теплоотдача относительная  $Nu/Nu_{KM}$ : (а, в, д, ж, и) – расчет по средним значениям параметров теплообмена, область их определения –  $10^{-3} Re = 13.3-40.79$ ,  $Pr = 2.63-2.82$ ; (б, г, е, з, к) – расчет по значениям продольных профилей параметров теплообмена, область их определения –  $10^{-3} Re = 12.02-42.41$ ,  $Pr = 2.52-3.14$ ; (а, б) –  $Nu/Nu_{KM1}$ , (в, г) –  $Nu/Nu_{KM2}$ , (д, е) –  $Nu/Nu_{KM3}$ , (ж, з) –  $Nu/Nu_{KM4}$ , (и, к) –  $Nu/Nu_{AM2}$ .





**Рис. 3.** Теплообменник Т08, трубный канал нагреваемый. Теплоотдача относительная  $Nu/Nu_{KM}$ : (а, в, д, ж, и) – расчет по средним значениям параметров теплообмена, область их определения –  $10^{-3} Re = 11.58–22.1$ ,  $Pr = 10.85–11.64$ ; (б, г, е, з, к – расчет по значениям продольных профилей параметров теплообмена, область их определения –  $10^{-3} Re = 10.9–23.43$ ,  $Pr = 9.68–12.1$ ; (а, б) –  $Nu/Nu_{KM1}$ , (в, г) –  $Nu/Nu_{KM2}$ , (д, е) –  $Nu/Nu_{KM3}$ , (ж, з) –  $Nu/Nu_{KM4}$ , (и, к) –  $Nu/Nu_{AM2}$ .



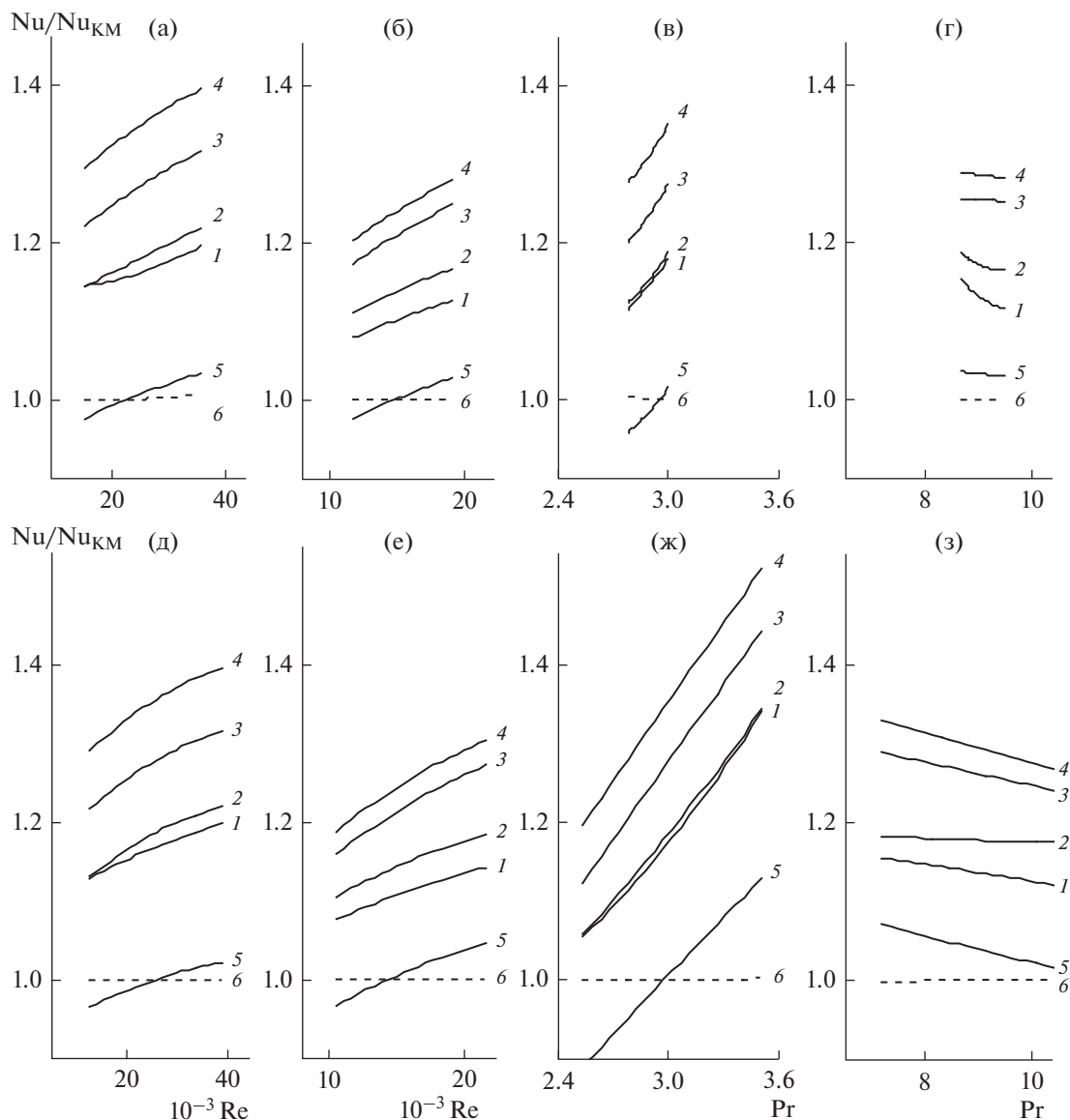
**Рис. 4.** Теплообменник Т08. Теплоотдача относительная  $Nu/Nu_{KM}$  трубного канала зависимости от чисел  $Re$  и  $Pr$ : (а–г) – расчет по средним значениям параметров теплообмена; (д–з) – расчет по значениям продольных профилей параметров теплообмена; (а, в, д, ж) – греющий канал; (б, г, е, з) – нагреваемый канал; (а, д) –  $Pr = 2.8$ ; (б, е) –  $Pr = 11$ ; (в–г, ж–з) –  $10^{-3} Re = 20$ ; 1 –  $Nu/Nu_{KM1}$ ; 2 –  $Nu/Nu_{KM2}$ ; 3 –  $Nu/Nu_{KM3}$ ; 4 –  $Nu/Nu_{KM4}$ ; 5 –  $Nu/Nu_{AM2}$ ; 6 –  $Nu/Nu_{AM5}$ .

среднеквадратичные отклонения от среднего значения составляют лишь несколько процентов (см. табл. 3).

Аппроксимации экспериментальных данных моделями AM2 и AM5 приводят, естественным образом, к повышению точности при определении средних значений параметра  $Nu/Nu_{KM}$ , что отражается в уменьшении величины параметра  $\sigma I$ , характеризующего расхождение между экспери-

ментом и расчетами. Коэффициенты модели AM2 весьма близки по величине к коэффициентам моделей KM3–KM4, в то время, как коэффициенты модели AM5 отличаются достаточно сильно, но они же и значительно точнее описывают эксперимент (см. табл. 3).

На рис. 2 и 3 в виде контурных графиков приведены аппроксимации значений  $Nu/Nu_{KM}$  для



**Рис. 5.** Теплообменник Т20. Теплоотдача относительная  $Nu/Nu_{KM}$  трубного канала зависимости от чисел  $Re$  и  $Pr$ : (а–г) – расчет по средним значениям параметров теплообмена; (д–з) – расчет по значениям продольных профилей параметров теплообмена; (а, в, д, ж) – греющийся канал; (б, г, е, з) – нагреваемый канал; (а, д) –  $Pr = 2.9$ ; (б, е) –  $Pr = 9$ ; (в–г, ж–з) –  $10^{-3} Re = 18$ ; 1 –  $Nu/Nu_{KM1}$ ; 2 –  $Nu/Nu_{KM2}$ ; 3 –  $Nu/Nu_{KM3}$ ; 4 –  $Nu/Nu_{KM4}$ ; 5 –  $Nu/Nu_{AM2}$ ; 6 –  $Nu/Nu_{AM5}$ .

критериальных моделей КМ1–КМ4 и модели АМ2 двумерной параболой.

Из анализа приводимых данных следует, что рассогласования между экспериментом и расчетами по моделям носят скорее системный, а не случайный характер. Так во всех экспериментах и с греющим, и с нагреваемым трубными каналами, и для всех моделей, включая АМ2, с ростом числа  $Re$  расхождения увеличиваются. Это означает, что в нашем эксперименте теплоотдача растет быстрее, чем это следует из рассматриваемых моделей, в том числе и из модели АМ2.

С ростом числа Прандтля ситуация в случае греющего канала аналогична, а в случае нагреваемого – противоположна (см. рис. 2–3). Это означает, что с ростом числа Прандтля при малых его значениях теплоотдача в эксперименте растет быстрее, а при больших – медленнее, чем в расчетах по моделям, а также то, что зависимость  $Nu/Nu_{KM} = Nu/Nu_{KM}(Re = \text{const}, Pr)$  имеет экстремум.

Эти обстоятельства указывают на то, значения коэффициентов критериальных моделей конвективного теплообмена, определяемых из экспери-

ментов, зависят от условий проведения этих экспериментов и способов обработки их данных.

На рисунках 4–5 приведены сечения аппроксимаций  $Nu/Nu_{KM}$  для теплообменников T08 и T20, еще более наглядно демонстрирующие сделанные выше заключения. Для сравнения приводятся сечения модели AM5, демонстрирующие, практически, отсутствие зависимости значений  $Nu/Nu_{KM5}$  от изменений чисел Рейнольдса или Прандтля.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, из представленных результатов можно сделать вывод о том, что из рассмотренных критериальных моделей теплоотдачу трубчатых водо-водяных теплообменников при нормальном давлении и умеренных температурах наиболее точно описывает критериальная модель Б.С. Петухова-Кириллова, а наименее точно – модель М.А. Михеева. Связано это, по-видимому, с тем, что на определение эмпирических коэффициентов модели влияние оказывают не только условия проведения экспериментов (начальные участки, штуцеры, состояние теплообменной поверхности и т.д.), но и с областью их определения  $Re-Pr$ .

Как показывает сравнение результатов аппроксимации одних и тех же данных одной и той же функцией, но с различной точностью искомых коэффициентов (модели AM2 и AM5) повышение точности коэффициентов аппроксимации и, по-видимому, учет их зависимостей от определяющих критериев может заметно повысить точность расчетов параметров конвективного теплообмена по критериальным моделям.

### ОБОЗНАЧЕНИЯ

$D$	диаметр трубки внутренний, характерный размер, м
$D_n$	диаметр трубки наружный, м
$D_k$	диаметр кожуха внутренний, м
$G$	расход теплоносителя, л/с
$K$	коэффициент теплопередачи, кВт/(м <sup>2</sup> К)
$L$	длина теплообмена, м
$l$	текущая длина теплообмена, м
$n$	число точек
$Nu$	критерий Нуссельта

$oa$	среднеквадратичное отклонение аппроксимации
$oQ$	среднеквадратичное относительное отклонение теплового потока
$oS$	среднеквадратичное отклонение от среднего значения
$oI$	среднеквадратичное отклонение от значения, равного 1
$Pr$	критерий Прандтля
$Q$	тепловой поток, кВт
$Re$	критерий Рейнольдса
$Srd$	среднее значения
$t$	температура, °С
$\alpha$	коэффициент теплоотдачи, кВт/(м <sup>2</sup> К)
$\zeta$	коэффициент гидродинамического сопротивления

### ИНДЕКСЫ

max	максимальное значение
min	минимальное значение
w	значение на стенке
KM	критериальная модель
mt	межтрубный канал
tr	трубный канал

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коноплев А.А., Алексанян Г.Г., Рытов Б.Л., Берлин Ал.Ал. Расчет локальных параметров интенсифицированного теплообмена // Теорет. основы хим. технологии. 2007. Т. 41. № 6. С. 692.
2. Коноплев А.А., Алексанян Г.Г., Рытов Б.Л., Берлин Ал.Ал. Об эффективности интенсификации теплообмена глубоким профилированием // Теорет. основы хим. технологии. 2012. Т. 46. № 1. С. 24.
3. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Под Ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. М.: Энергоиздат, 1982.
4. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидравлическое сопротивление: Справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1990.
5. Михеев М.А. Теплоотдача при турбулентном движении жидкости в трубах. Известия АН СССР, ОТН. 1952. № 10. С. 1448–1454.
6. Михеев М.А. Средняя теплоотдача при движении жидкости в трубах: Сборник “Теплопередача и тепловое моделирование”. М.: Изд-во АН СССР, 1959.