ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ПЛАСТИНЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКАХ

Юсупова Надира Кайпбаевна
д-р техн. наук
. DSc, доц. Алмалыкский Государственный технический институт
Республика Узбекистан, г. Алмалык
E-mail: nadira__87@mail.ru
Сарсенбаев Нурлан Тенелбаевич
ассистент, преподаватель
Каракалпакский государственный университет им. Бердаха
Республика Узбекистан, г. Нукус
E-mail: nurlan0595s@gmail.com

Аннотация. *В статье исследована гидродинамическая неравномерность распределения теплоносителя в каналах пластинчатого теплообменника. Рассмотрено влияние общего количества пластин и диаметра распределительных и сборных коллекторов на характер потокораспределения. Для количественной оценки использованы критерии отношения удельного расхода в первом и последнем каналах к среднему идеальному значению, а также отношение расходов в крайних каналах. Проведены расчёты для различного количества пластин и диаметров коллекторов. Установлено, что увеличение количества пластин приводит к росту неравномерности распределения потока, тогда как увеличение диаметра коллекторов способствует выравниванию расходов между каналами. Полученные результаты позволяют определить рациональные конструктивные параметры коллекторной системы и могут быть использованы при совершенствовании пластинчатых теплообменников для повышения их теплогидравлической эффективности.*

Ключевые слова: *пластинчатый теплообменник, потокораспределение, неравномерность потока, коллектор, удельный расход, гидравлическое сопротивление, количество пластин, диаметр коллектора, теплопередача.*

Пластинчатые теплообменники хорошо известны своей превосходной теплопередачей, компактностью и низким уровнем хладагента. Несмотря на ряд преимуществ, они страдают от проблем с неправильным распределением потока. Неправильное распределение потока может ухудшить как теплопередачу, так и перепад давления, что в конечном итоге приводит к снижению эффективности

системы при использовании пластинчатых теплообменников. Проблемы неправильного распределения потока становятся более выраженными, когда размер теплообменника относительно велик, а количество пластин больше, что ограничивает использование пластинчатых теплообменников в крупных промышленных системах. В результате анализ и понимание поведения неправильного распределения потока в пластинчатых теплообменниках, а также поиск способов смягчения проблем, связанных с этим распределением, становятся важными темами [1].

Падение статического давления в каналах достигает максимума в первом канале, уменьшается по осевому направлению и достигает минимума в последнем канале. Соответственно, скорости потока в отдельных каналах также уменьшаются к концу впускного коллектора. Неправильное распределение означает отклонение этих скоростей каналов от идеализированного случая равномерного (теоретического) распределения. Если бы все изменения давления в коллекторах были полностью обратимыми, то статический профиль давления в выхлопном коллекторе повторил бы профиль впускного коллектора. В таком случае не произойдет неправильного распределения и падение статического давления по каждому каналу будет одинаковым [2].

Экспериментальные исследования теплогидродинамических характеристик паяных пластинчатых теплообменников (BPHE) включают одновременное измерение скорости потока и температуры теплоносителей в каналах аппарата с применением инфракрасной термографии поверхности пластин. Использование данного неинвазивного метода позволяет получать пространственно-временную информацию о распределении температуры и выявлять изменения тепловых характеристик теплообменника при его загрязнении. Установлено, что образование отложений приводит к снижению эффективности теплообмена, что проявляется в изменении среднего уровня температуры и увеличении её пространственной неоднородности [3].

Для количественной оценки степени неравномерности потокораспределения использовались три критерия. Первый критерий характеризует отклонение расхода в первом канале от идеального значения:

$$K_1 = \frac{G_1}{G_m} \quad (1)$$

где (G_1) — удельный расход теплоносителя в первом канале, (G_m) — средний удельный расход при равномерном распределении.

Вторым критерием являлось отношение расхода в последнем канале к идеальному значению:

$$K_j = \frac{G_j}{G_m} \quad (2)$$

где (G_J) — удельный расход в наиболее удалённом от входа канале.

Для непосредственной оценки различия расходов между крайними каналами использовалось отношение:

$$K_{1j} = \frac{G_1}{G_j} \quad (3)$$

При полностью равномерном распределении теплоносителя значения (G_1/G_m) и (G_J/G_m) должны стремиться к единице, а отношение (G_1/G_J) должно быть близко к единице. Чем больше отклонение указанных критериев от единицы, тем выше степень неравномерности распределения потока по каналам теплообменника.

Расчётная методика основана на рассмотрении параллельных каналов как гидравлически взаимосвязанных участков, расход которых определяется их гидравлическим сопротивлением и распределением давления в распределительном и сборном коллекторах. При этом учитывалось изменение статического давления вдоль коллекторной зоны, обусловленное потерями на трение, изменением скорости потока и отбором теплоносителя в отдельные каналы.

Таблица 1.

Зависимость отношения удельных расходов в каналах в зависимости от общего числа пластин

Общее число пластин, J	G_1/G_m первого к идеальному	G_J/G_m последнего к идеальному	G_1/G_J первого к последнему
D_y= 40 мм			
10	1,09	1,07	0,98
15	1,25	1,02	1,22
20	1,50	0,91	1,66
23	1,83	0,74	2,46
30	2,14	0,64	3,34
D_y= 50 мм			
10	1,04	1,10	0,94
15	1,16	1,05	1,10
20	1,35	0,97	1,19
25	1,50	0,77	1,57
30	1,86	0,76	1,84
D_y= 65 мм			
10	1,02	1,11	0,91
15	1,10	1,08	1,01
20	1,22	1,03	1,19
25	1,42	0,90	1,57

Общее число пластин, J	G_1/G_m первого к идеальному	G_J/G_m последнего к идеальному	G_1/G_J первого к последнему
30	1,60	0,87	1,84
D_y= 80 мм			
10	1,01	1,12	0,90
15	1,10	1,10	0,97
20	1,15	1,06	1,09
25	1,31	0,95	1,38
30	1,43	0,94	1,53

G_1 – удельный расход в первом канале; G_J - удельный расход в последнем канале; G_m - идеальный (средний) удельный расход.

Анализ данных, представленных в таблице 1 показывает, что с увеличением общего числа пластин J наблюдается существенное перераспределение удельных расходов теплоносителя между крайними каналами теплообменного аппарата. Отношение удельного расхода в первом канале к идеальному значению (G_1/G_m) монотонно возрастает от 1,09 при $J = 10$ до 2,14 при $J = 30$, что свидетельствует о возрастающей неравномерности распределения потока по длине пакета пластин. В то же время отношение удельного расхода в последнем канале к идеальному (G_J/G_m) снижается с 1,07 до 0,64, указывая на дефицит расхода в выходных каналах при увеличении числа пластин. Данная тенденция объясняется ростом гидравлического сопротивления по ходу движения теплоносителя и усилением влияния коллекторных зон на распределение потока.

Наиболее показательным является рост отношения G_J/G_1- от 0,98 до 3,34, что подтверждает резкое усиление неравномерности между первым и последним каналами при больших значениях J. При $J \geq 23$ наблюдается кратное превышение удельного расхода в первом канале над последним, что может приводить к локальным перегревам, снижению тепловой эффективности и ускоренному износу элементов теплообменного аппарата.

Анализируя полученные результаты расчета критериев равенства расходов, следует отметить их максимальное приближение к 1 в условиях принятого максимального числа пластин $J = 30$ и при увеличении диаметра коллекторов до D_y=80 мм (наибольшее значение диаметра коллектора принято в пределах геометрических размеров пластины). При расчетном числе пластин $J = 24$ наблюдается максимальное приближение критериев равенства расхода к 1, также в случае принятия D_y=80 мм.

При расчетном числе пластин $J = 10$ наблюдается стремление к 1 отношения удельного расхода в первом канале к расходу в этом же канале при равномерном распределении потоков, G_1/G_m, в условиях увеличения расчетного

значения D_y, а значения критериев равенства расходов G_1/G_m и G_J/G_m приближаются к 1 при уменьшении диаметра распределительного и сборного коллекторов [4-5].

В результате проведённого исследования установлено, что увеличение количества пластин приводит к усилению неравномерности распределения теплоносителя по каналам пластинчатого теплообменника. Увеличение диаметра распределительных и сборных коллекторов способствует выравниванию расходов и снижению различий между крайними каналами. Полученные результаты подтверждают необходимость учёта конструктивных параметров коллекторной системы при проектировании теплообменных аппаратов. Рациональный выбор количества пластин и диаметра коллекторов позволяет улучшить гидродинамические характеристики и повысить эффективность теплопередачи.

Список литературы:

1. Muneeshwaran M., Kim H. J., Tayyab M., Li W., Nawaz K., Yang C.-M. Flow maldistribution in plate heat exchangers – Impact, analysis, and solutions // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2025. – Vol. 207. – Art. 114905. – DOI: 10.1016/j.rser.2024.114905.

2. Gusew S. Accounting for the impact of maldistribution on pressure drop in a plate heat exchanger [Электронный ресурс]. – Hannover : Independent Scientist, 2025. – 9 p. – DOI: 10.13140/RG.2.2.30014.19521.

3. Berce J., Zupančič M., Može M., Golobič I. Local temperature distribution of a plate heat exchanger undergoing crystallization fouling. Heat and Mass Transfer. – 2025. – Vol. 61. – Article 68. – DOI: 10.1007/s00231-025-03593-1.

4. А.М. Хурмаматов, Н.К. Юсупова, С.Б. Бердимбетов, Н.Т. Сарсенбаев. Определение состава для интенсивной переработки нефтяных шламов // “Вестник Каракалпакского государственного университета им. Бердаха”, № 1 (68), 2025 – С. 19-24.

5. Yusupova N., Khurmamatov A., Sarsenbaev N., Berdimbetov S. Intensification of heat transfer in the condensation process of vapor-gas mixtures using plate heat exchangers // “Science and Education in Karakalpakstan”/2, 2024. – 2024. – № 4. – P. 223–227.