

Статья поступила в редакцию: 31.08.2026

Статья принята к публикации: 06.09.2026

Статья опубликована: 28.09.2026

УДК 536.2+621.694

DOI: 10.32743/UniTech.2026.150.9.23379

Влияние числа пластин и диаметра портов на распределение теплоносителя в пластинчатом теплообменнике

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

The effect of the number of plates and port diameter on heat carrier distribution in a plate heat exchanger

Yusupova Nadira Kajpbaевна

Dr. Sci. (Tech.), DSc, Associate Professor, Almalyk State Technical Institute

Republic of Uzbekistan, Almalyk

Sarsenbaev Nurlan Tenelbaevich

Assistant, Lecturer

Berdakh Karakalpak State University

Republic of Uzbekistan, Nukus

Аннотация

В работе исследована равномерность распределения теплоносителя по параллельным каналам пластинчатого теплообменника и установлено влияние конструктивных параметров аппарата на характер потокораспределения. Проведён расчётно-теоретический анализ гидравлического режима теплообменника при различном общем количестве пластин и значениях условного диаметра портов. Для количественной оценки неравномерности распределения расхода использованы отношения удельного расхода в первом и последнем каналах к среднему значению, а также отношение расходов в крайних каналах. Установлено, что увеличение числа пластин усиливает неравномерность распределения теплоносителя: расход в первых каналах возрастает, а в наиболее удалённых снижается. При $J = 30$ и $D_y =$

Библиографическое описание: Юсупова Н.К., Сарсенбаев Н.Т. Влияние числа пластин и диаметра портов на распределение теплоносителя в пластинчатом теплообменнике // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 9(150). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23379>

40 мм отношение расходов первого и последнего каналов достигает 3,34. Показано, что увеличение диаметра портов способствует выравниванию расходов между каналами. Наиболее равномерное распределение в исследованном диапазоне получено при $D_y = 80$ мм. Полученные результаты подтверждают необходимость учёта количества пластин и геометрических параметров портов при проектировании пластинчатых теплообменников. Предложенная методика позволяет оценивать степень неравномерности потокораспределения и определять рациональные конструктивные параметры аппарата для повышения эффективности теплообмена и надёжности его эксплуатации в заданных условиях.

Abstract

The study investigates the uniformity of heat-transfer fluid distribution through the parallel channels of a plate heat exchanger and evaluates the influence of the apparatus design parameters on flow distribution. A theoretical and computational analysis of the hydraulic regime was performed for different total numbers of plates and values of the nominal port diameter. To quantitatively assess flow maldistribution, the ratios of the specific flow rates in the first and last channels to the average value, as well as the ratio of flow rates in the extreme channels, were used. It was established that increasing the number of plates intensifies flow maldistribution: the flow rate in the first channels increases, while that in the most distant channels decreases. At ($J = 30$) and ($D_y = 40$) mm, the ratio of the flow rates in the first and last channels reaches 3.34. Increasing the port diameter promotes more uniform flow distribution. The most uniform distribution within the investigated range was obtained at ($D_y = 80$) mm. The results confirm the need to consider the number of plates and port geometry when designing plate heat exchangers. The proposed method enables the assessment of flow maldistribution and determination of rational design parameters to improve heat-transfer efficiency and operational reliability under specified conditions.

Ключевые слова: пластинчатый теплообменник, теплоноситель, потокораспределение, гидродинамика, удельный расход, число пластин, диаметр портов, равномерность потока.

Keywords: plate heat exchanger, heat carrier, flow distribution, hydrodynamics, specific flow rate, plate number, port diameter, flow uniformity.

Введение

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 [7].

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 [5].

Экспериментальные исследования теплогидродинамических характеристик паяных пластинчатых теплообменников (ВРНЕ) 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].

В работе исследовано влияние геометрии входного и выходного коллекторов пластинчатого теплообменника на равномерность распределения потока между отдельными каналами. В качестве исходной конструкции рассматривался коллектор постоянного диаметра 10 мм без сужения. Число Рейнольдса изменяли в диапазоне от 2100 до 276636 за счёт изменения массового расхода на входе. Результаты численного моделирования показали, что с увеличением числа Рейнольдса степень неравномерности распределения потока между пластинами возрастает [8].

Результаты моделирования показали, что геометрия коллектора оказывает существенное влияние не только на равномерность распределения теплоносителя между каналами, но и на величину гидравлического сопротивления аппарата. Изменение площади поперечного сечения коллектора вдоль направления движения потока позволяет управлять локальными скоростями и статическим давлением, вследствие чего изменяется расход через отдельные каналы пластинчатого теплообменника. При этом использование более сложных профилей коллектора позволяет рассматривать компромисс между уменьшением неравномерности распределения потока и снижением потерь давления [9].

Авторы экспериментально исследовали особенности распределения теплоносителя по каналам пластинчатых теплообменников с малым и большим числом пластин. В экспериментах рассматривались аппараты, содержащие 20 и 80 каналов, при изменении числа Рейнольдса в диапазоне от 1000 до 17 000. Установлено, что характер неравномерности потокораспределения определяется величиной перепада давления и зависит от расхода теплоносителя, площади поперечного сечения распределительных портов и количества каналов. Показано, что с увеличением общего гидравлического сопротивления теплообменника неравномерность распределения потока по каналам усиливается. Кроме того, авторами введен безразмерный параметр, характеризующий относительное отклонение расхода в отдельном канале от его среднего значения по пакету пластин [4].

Авторы провели экспериментальное и теоретическое исследование влияния неравномерности распределения теплоносителя от портов к каналам на тепловые характеристики пластинчатого теплообменника. Авторы установили, что интенсивность потокораспределения определяется расходом теплоносителя, числом каналов и размером портов. Увеличение неравномерности распределения приводит к росту гидравлического сопротивления и снижению тепловой эффективности аппарата. Полученные результаты показывают необходимость учета характеристик портов и количества каналов при проектировании пластинчатых теплообменников [10].

Методы и материалы

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.

Для каждого варианта геометрии определялись значения удельных расходов во всех каналах теплообменника. Полученные результаты использовались для построения диаграмм распределения расхода и последующего сравнительного анализа. Расчёты выполнялись для различных сочетаний количества пластин и диаметра коллекторов, что позволило установить закономерности изменения гидродинамической неравномерности при изменении конструктивных параметров аппарата.

В качестве основного критерия эффективности рассматриваемой конструкции принималась степень приближения фактических расходов в крайних каналах к среднему значению. На основании этого проводилась оценка рациональности выбранного диаметра коллекторов и количества пластин. Такой подход позволяет определить диапазон конструктивных параметров, обеспечивающих максимально равномерное распределение теплоносителя по параллельным каналам пластинчатого теплообменника.

Предложенная методика расчёта может быть использована для проведения параметрической оценки и последующей оптимизации гидравлической схемы пластинчатого теплообменного аппарата без необходимости изготовления экспериментального образца на начальной стадии проектирования.

Результаты и обсуждения

На диаграмме распределения теплоносителя по каналам теплообмена пластинчатого теплообменника (рис.1) показано равномерное распределение удельного расхода по каналам G_m , что характеризует одно из допущений при тепловом и гидравлическом расчете пластинчатых теплообменников [8]. Согласно полученным зависимостям, расход теплоносителя зависит от удаленности канала по расположению относительно неподвижной плиты. При этом динамика распределения потоков по каналам значительно отличается от условия равномерного распределения (рисунок 1). Значение удельного расхода в канале №24 (наиболее удаленный) ниже относительно канала №1 примерно в 2 раза.

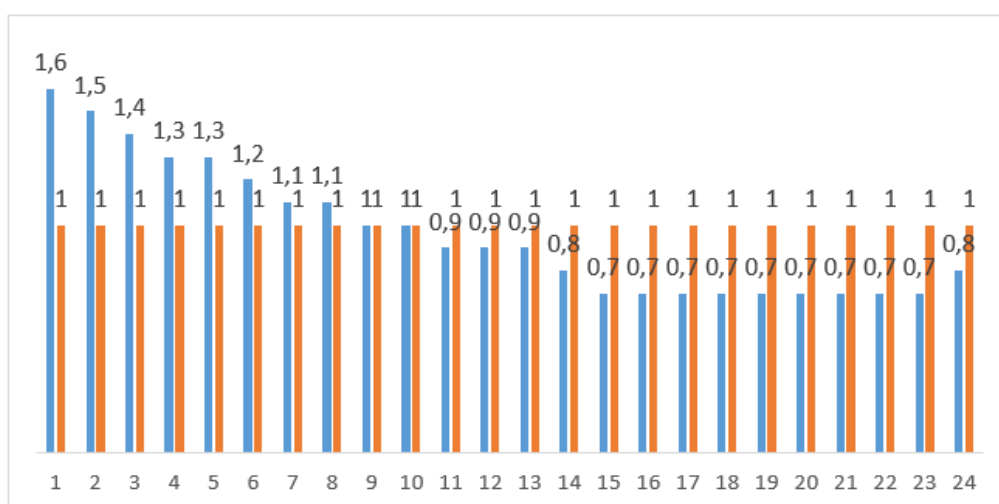


Рисунок 1. Диаграмма распределения удельных расходов теплоносителя по каналам теплообмена пластинчатого теплообменника

- ■ - удельный расход по каналам с учетом удаленности от входа, G ; - ■ - удельный расход по каналам при равномерном распределении, G_m

Типоразмерный ряд пластинчатых теплообменников имеет определенные технические характеристики как эксплуатационные, так и геометрические. Так каждому типу пластин по габаритным данным соответствует диапазон минимального и максимального количества возможного набора пластин, кроме того указывается диаметр условного прохода портов D_y [6], образованных угловыми отверстиями пластин.

На основании зависимостей по определению расходов в параллельных каналах можно предположить, что величина диаметра распределительного и сборного коллекторов оказывает влияние на равномерность потокораспределения [2].

В таблице 1 представлены полученные результаты расчета влияния общего числа пластин и величины диаметра коллектора на равномерность распределения расходов по каналам теплообмена. В качестве критерия оценки равенства расходов между каналами приняты отношения:

- удельного расхода в первом канале к расходу в последнем канале, G_1/G_J ;
- удельного расхода в первом канале к расходу в этом же канале при равномерном распределении потоков, G_1/G_m ;
- удельного расхода в последнем канале к расходу в этом же канале при равномерном распределении потоков, G_J/G_m

Равномерность потокораспределения по параллельным участкам будет характеризоваться наименьшей величиной расхождения удельных расходов между первым и последним каналами, а также стремлением предложенных критериев к 1.

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
30	1,60	0,87	1,84

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
$D_y = 80$ 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 [9].

Заключение

Таким образом, согласно предлагаемой методике расчета гидравлического режима пластинчатых теплообменных аппаратов, возможно проведение оптимизационных расчетов по определению рациональных геометрических параметров с целью достижения максимально возможных условий равенства расходов теплоносителя по всем каналам.

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.

Список литературы

1. А.М. Хурмамаев, Н.К. Юсупова, С.Б. Бердимбетов, Н.Т. Сарсенбаев. Определение состава для интенсивной переработки нефтяных шламов // “Вестник Каракалпакского государственного университета им. Бердаха”. – 2025. – № 1 (68). – С. 19–24.
2. Н.К. Юсупова, Н.Т. Сарсенбаев, Ж.Қ. Мирзаев. Зависимость эффективности конденсации от концентрации твердой фазы в парогазовой смеси // “Журнал экспериментальных исследований”. – 2024. – № 5.
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. Bobbili, P.R., Sundén, B., Das, S.K. An experimental investigation of the port flow maldistribution in small and large plate package heat exchangers // Applied Thermal Engineering. – 1926. – T. 26, № 16. – P. 1919–1926. – DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2006.01.015.
5. Gusew S. Accounting for the impact of maldistribution on pressure drop in a plate heat exchanger [Электронный ресурс]. – Hannover: Independent Scientist. – 2025. – 9 с. – DOI: 10.13140/RG.2.2.30014.19521.
6. Lee J.K., Yoon S.H., Park H.C. Performance Evaluation of Welded Plate Heat Exchangers for Bitumen Cooling and Heating // Applied Thermal Engineering. – 2023. – T. 220. – Art. 118456.
7. 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. – T. 207. – Art. 114905. – DOI: 10.1016/j.rser.2024.114905.
8. Rahman M.M., Jakkala S.G., Bénard A. Influence of Header Configuration on Flow Distribution within a U-Type Plate Heat Exchanger // Proceedings of the 8th Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC). – 2023. – P. 1463–1472. – DOI: 10.1615/TFEC2023.hex.046080.
9. Rahman M.M., Bénard A. Reduced-Order Model for Flow Distribution in Plate Heat Exchangers with Novel Header Designs [Электронный ресурс] / M.M. Rahman, A. Bénard. – SSRN. – 2025. – 45 с. – DOI: 10.2139/ssrn.5698471.
10. Rao, B.P., Sundén, B., Das, S.K. An experimental and theoretical investigation of the effect of flow maldistribution on the thermal performance of plate heat exchangers // Journal of Heat Transfer. – 2005. – T. 127, № 3. – P. 332–343. – DOI: 10.1115/1.1860568.

11. 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. – № 4.

References

1. A.M. Xurmamatov, N.K. Yusupova, S.B. Berdimbetov, N.T. Sarsenbayev. Opredeleeniye sostava dlya intensivnoy pererabotki neftyanix shlamov // “Bestnik Karakalpaksogo gosudarstvennogo universiteta im. Berdaxa”. – 2025. – No. 1 (68).
2. [Yusupova, N.T. Sarsenbaev, Zh.Q. Mirzaev. Dependence of condensation efficiency on the concentration of solid phase in a vapor-gas mixture] // “Zhurnal eksperimental'nykh issledovaniy”. – 2024. – No. 5. (In Russ.)
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, No. 8. – DOI: 10.1007/s00231-025-03593-1.
4. Bobbili P.R., Sundén, B., Das S.K. An experimental investigation of the port flow maldistribution in small and large plate package heat exchangers // Applied Thermal Engineering. – 1926. – Vol. 26, No. 16. – P. 1919–1926. – DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2006.01.015.
5. Gusew S. Accounting for the impact of maldistribution on pressure drop in a plate heat exchanger – Hannover: Independent Scientist. – 2025. – 9 c. – DOI: 10.13140/RG.2.2.30014.19521.
6. Lee J.K., Yoon S.H., Park H.C. Performance Evaluation of Welded Plate Heat Exchangers for Bitumen Cooling and Heating // Applied Thermal Engineering. – 2023. – Vol. 220. – Art. 118456.
7. 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.
8. Rahman M.M., Jakkala S.G., Bénard A. Influence of Header Configuration on Flow Distribution within a U-Type Plate Heat Exchanger // Proceedings of the 8th Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC). – 2023. – P. 1463–1472. – DOI: 10.1615/TFEC2023.hex.046080.
9. Rahman M.M., Bénard A. Reduced-Order Model for Flow Distribution in Plate Heat Exchangers with Novel Header Designs – SSRN. – 2025. – 45 c. – DOI: 10.2139/ssrn.5698471.
10. Rao B.P., Sundén, B., Das S.K. An experimental and theoretical investigation of the effect of flow maldistribution on the thermal performance of plate heat exchangers // Journal of Heat Transfer. – 2005. – Vol. 127, No. 3. – P. 332–343. – DOI: 10.1115/1.1860568.
11. 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. – No. 4. (In Russ.)