

03

Теплоотдача при дискретном нагреве стенки канала

© И.А. Давлетшин, Н.И. Михеев, Р.Р. Шакиров

Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ „Казанский научный центр РАН“, Казань, Россия
E-mail: davlet60@mail.ru

Поступило в Редакцию 25 марта 2026 г.

В окончательной редакции 21 апреля 2026 г.

Принято к публикации 21 апреля 2026 г.

Проведено экспериментальное исследование теплоотдачи при дискретном (по направлению потока) нагреве стенки канала прямоугольного сечения. Получены распределения коэффициента теплоотдачи при различных соотношениях площадей нагреваемых и ненагреваемых участков в развитых турбулентных режимах течения воздуха. Выявлено, что организация дискретного теплообмена приводит к повышенным значениям коэффициента теплоотдачи по сравнению со случаем непрерывного нагрева теплообменной поверхности.

Ключевые слова: дискретный нагрев, начальный участок, тепловой пограничный слой.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.14.63309.20692

Распределения тепловых потоков на теплообменных стенках в общем случае являются неравномерными. В частности, начальный участок теплоотдачи характеризуется повышенными значениями коэффициента теплоотдачи (КТО) [1]. Вниз по потоку величины КТО уменьшаются и при достижении числа калибров $x/d \sim 50$ достигают стабилизированных значений. Такое положение характерно и для ламинарных, и для турбулентных режимов течения теплоносителей. В частности, осредненные на длине $x/d = 1$ непосредственно за входным сечением значения КТО превышают соответствующие стабилизированные величины (до $\sim 90\%$ для ламинарных режимов и до $\sim 65\%$ для турбулентных) [2]. При этом можно ожидать, что непосредственно вблизи входной кромки это превышение может достигать кратных величин [3].

На практике многие виды интенсификаторов теплоотдачи (выступы, лунки) базируются на принципе разрушения теплового пограничного слоя [4–7]. С этой же точки зрения может быть рассмотрен дискретный нагрев (охлаждение) стенки: каждый следующий участок нагрева будет формировать свой тепловой пограничный слой с увеличенными значениями КТО. Такая организация теплоотдачи может быть характерной, например, в электронике, когда необходимо охлаждать дискретно расположенные источники тепла [8]. В современных условиях эта задача является особенно масштабной и актуальной для центров хранения и обработки данных (дата-центров) [9]. Таким образом, настоящая работа направлена на выявление особенностей теплоотдачи при дискретном (прерывистом) нагреве теплообменной стенки канала.

Исследования проводились на экспериментальной установке (рис. 1), которая представляла собой плоский канал прямоугольного сечения шириной 180 mm и высотой $H = 20$ mm. Гидравлический диаметр канала при этом составлял $d_h = 36$ mm. Канал состоял из пред-

включенного 1 и теплообменного 3 участков с длинами $L_0 = 2.5$ m и $L_T = 455$ mm соответственно. Наличие предвключенного участка длиной $L_0/d_h \approx 70$ позволяло сформировать на входе в теплообменный участок развитый турбулентный профиль скоростей. На противоположной (верхней) стенке теплообменного участка имелось прозрачное в инфракрасном диапазоне окно 2 диаметром 120 mm, предназначенное для оптических измерений температуры стенки, которые выполнялись при помощи стационарного тепловизора VarioCAM HD head. Таким образом, имелась возможность получать информацию и о температурном состоянии как нагреваемых, так и ненагреваемых участков стенки.

Расход воздуха в установке создавался турбокомпрессором, работающим на отсос. Между каналом и турбокомпрессором был установлен сопловой блок с набором критических сопел. Значения расхода (скорости U) воздуха устанавливались открытием набора сопел с различными проходными диаметрами. Расширенная относительная неопределенность расхода через сопла при коэффициенте охвата 2 не превышала 0.25 %. Таким образом, воздух поступал в рабочий участок экспериментальной установки из окружающей среды (помещения лаборатории). Никаких иных воздействий на поступающий воздух в экспериментах не оказывалось. Перед входным устройством находилось свободное пространство большого объема с неподвижным воздухом.

Измерения температуры T_f поступающего из окружающей среды воздуха проводились платиновым термометром сопротивления Pt100, который был установлен на входе в канал. Для организации процесса теплообмена между стенкой и потоком воздуха в экспериментах производился нагрев измерительной стенки постоянным электрическим током от аккумуляторов с ЭДС $E = 24$ V.

Измерение локальных значений коэффициента теплоотдачи $\alpha = q_w / (T_w - T_f)$ выполнялось с использованием методики, позволяющей осуществлять нагрев

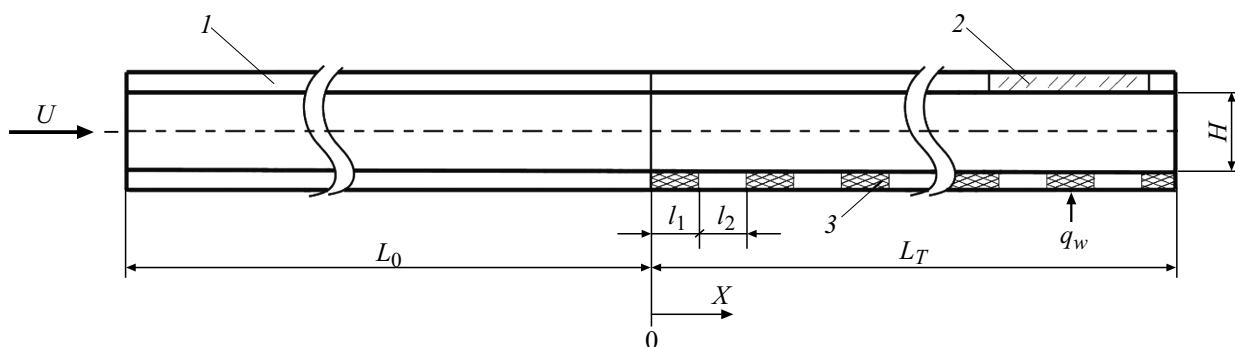


Рис. 1. Экспериментальная установка. 1 — предвключенный участок, 2 — оптическое окно, 3 — теплообменный участок.

теплообменной поверхности с одновременным определением ее локальных температур T_w на основе измерения связанных с ней электрических сопротивлений нагревательных элементов. Для этого нижняя часть стенки рабочего участка представляла собой печатную плату длиной 455 мм, шириной 180 мм и толщиной 1.5 мм. На стороне платы, обращенной внутрь канала, медное покрытие было вытравлено в виде зигзагообразных дорожек. Дорожки были локализованы на прямоугольных участках размером 3×150 мм. Количество таких участков, расположенных плотно друг за другом в продольном направлении с шагом 3 мм, составляло 150 штук. Каждая дорожка имела свои токовводы, что позволяло подключать их к источнику тока по последовательной или параллельной схеме. В предельном случае каждый элемент мог подключаться к своему источнику тока. Центральные части дорожек размером 3×80 мм имели электрические отводы, проходящие по обратной стороне платы, для измерений падения напряжения на участке цепи. Измерения электрических напряжений проводились с целью определения тепловыделений и электрических сопротивлений участков дорожек и далее температур соответствующих участков стенки по температурной зависимости сопротивлений. Для минимизации потерь тепла наружная поверхность теплообменной стенки имела теплоизоляцию. Предел погрешности измерений коэффициента теплоотдачи составлял $\pm 5\%$. Подробное описание метода измерений КТО представлено в работе [3].

Эксперименты проводились в различных конфигурациях нагрева стенки. Сначала были проведены измерения теплоотдачи при непрерывном нагреве стенки. Дискретный нагрев стенки был исследован в двух вариантах:

— вариант 12-12: длины нагреваемых участков $l_1 = 12$ мм, ненагреваемых $l_2 = 12$ мм (этот вариант показан на рис. 1, нагреваемые участки стенки заштрихованы);

— вариант 12-24: $l_1 = 12$ мм, $l_2 = 24$ мм.

Во всех вариантах ширина нагреваемых участков стенки составляла 150 мм. Эксперименты проводились в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = Ud_h/\nu = (0.63-6.50) \cdot 10^4$.

Значения $Nu = \alpha d_h/\lambda$ как при непрерывном, так и при дискретном нагреве были получены путем усреднения локальных значений на участке стенки длиной 12 мм по оси x . При дискретном нагреве значения Nu соответствуют средней теплоотдаче нагреваемых элементов, а при непрерывном нагреве — усредненным локальным значениям для элементов такой же площади. В качестве температуры стенки использовалась средняя по площади температура упомянутых элементов. Полученные результаты для трех вариантов нагрева теплообменной стенки приведены на рис. 2. Данные нормированы по значению Nu_0 для развитого турбулентного течения в канале

$$Nu_0 = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4}. \quad (1)$$

Как видно из рис. 2, при непрерывном нагреве локальный КТО на начальном участке теплового пограничного слоя, формирующегося в условиях развитого динамического пограничного слоя, весьма быстро снижается, уже на расстоянии $x/d_h = 10$ приближаясь к Nu_0 . При дискретном нагреве КТО нагреваемых участков тоже снижается с увеличением x , но темп снижения гораздо ниже, особенно при большей из длин ненагреваемых участков (24 мм). С увеличением x видна тенденция к стабилизации Nu , но при уровне много выше Nu_0 . Полученное в опытах изменение Nu по продольной координате согласуется с нашими представлениями о формировании теплового пограничного слоя на участке дискретного нагрева. Толщина теплового пограничного слоя ниже точки начала нагрева непрерывно увеличивается вплоть до смыкания пограничных слоев, а при одностороннем нагреве — до величины, соответствующей высоте канала, при которой должна произойти стабилизация КТО. В случае же дискретного нагрева на необогреваемом участке в пристеночной области температура теплоносителя снижается, что в условиях теплоизолированной снаружи стенки происходит преимущественно за счет конвективного переноса теплоты из пристеночной зоны в ядро потока. Роль теплопроводности стенки по сравнению с конвекцией невелика: согласно расчетной оценке, перенос теплоты от нагреваемого участка по стенке более чем на порядок ниже конвективного теплового потока. Эта оценка, выполненная на

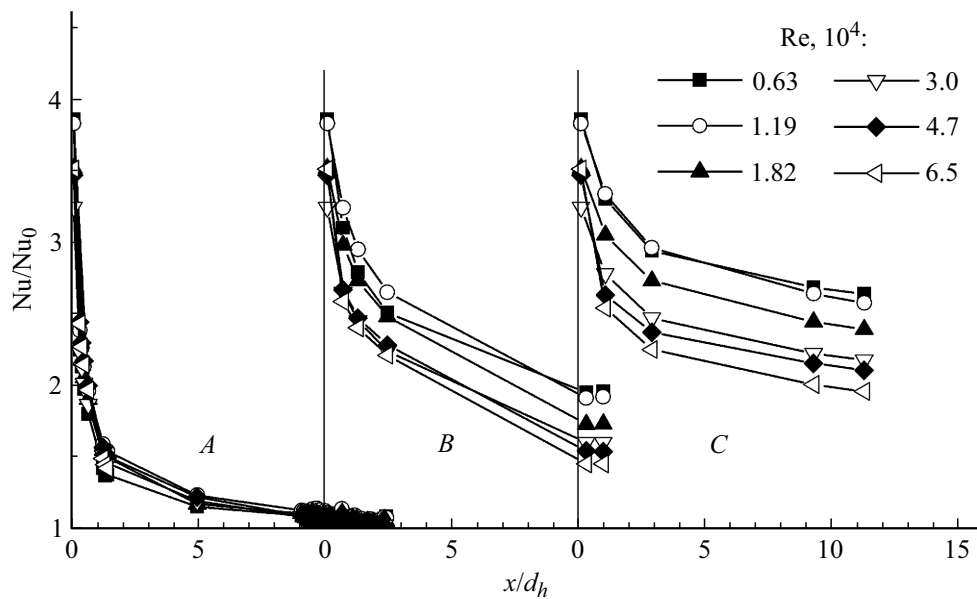


Рис. 2. Распределения коэффициента теплоотдачи на начальном тепловом участке канала при различных вариантах нагрева стенки: *A* — непрерывный, *B* — 12-12, *C* — 12-24.

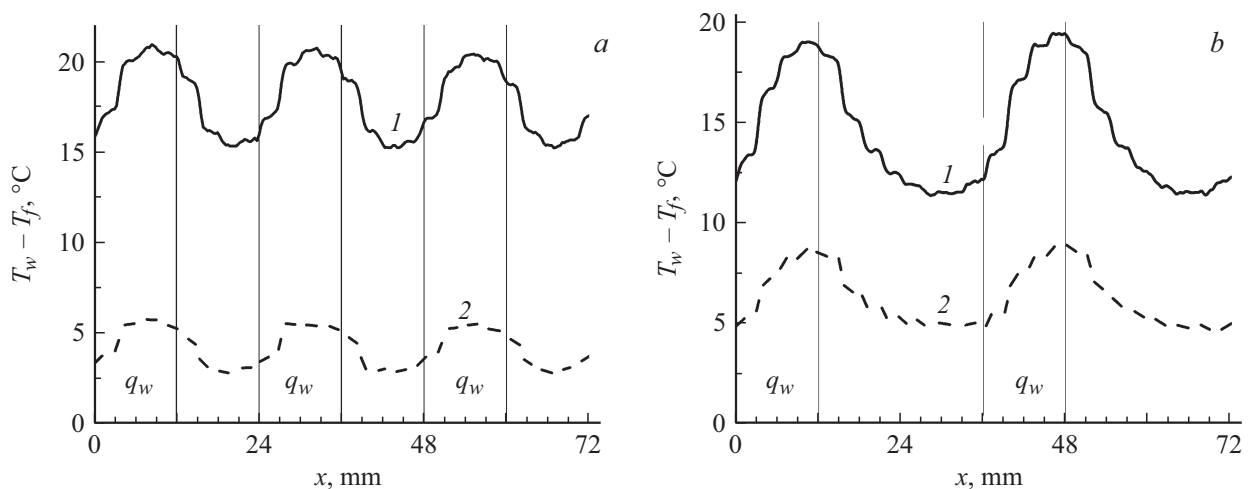


Рис. 3. Температура стенки при вариантах нагрева 12-12 (*a*) и 12-24 (*b*) для различных режимов по Re . $Re = 0.63 \cdot 10^4$ (1) и $6.5 \cdot 10^4$ (2).

основе закона Фурье с привлечением данных рис. 3 для определения градиента температуры стенки, показала, что доля теплоты, перенесенной теплопроводностью по стенке от нагреваемого участка к ненагреваемому, находится в пределах $\sim 5\%$ от теплоты, переносимой от стенки к потоку на нагреваемом участке. Таким образом, при дискретном нагреве тепловой пограничный слой в пристеночной области остается неравновесным даже после формирования теплового пограничного слоя по всей высоте канала. Это означает, что на очередном нагреваемом элементе начинает формироваться новый тепловой пограничный слой, который на участке без нагрева вновь частично разрушается. Чем дальше удалены друг от друга нагреваемые участки, тем в более

полной мере создаются условия обновления теплового пограничного слоя на каждом из них.

Поскольку интенсивность конвективного теплообмена связана с толщиной и состоянием теплового пограничного слоя, характер изменения КТО по продольной координате можно было предсказать еще до проведения опытов. Эксперимент позволил получить количественные характеристики. При принятой в работе длине участка для усреднения КТО $l_1 = d_h/3$ значение Nu/Nu_0 для первого по потоку нагреваемого участка в области низких опытных значений числа Рейнольдса составило 3.9. При увеличении числа Рейнольдса это отношение монотонно снижалось до 3.4. Очевидно, что при дискретном нагреве в пределе при $l_2 \gg l_1$ можно ожидать таких же значений

Nu/Nu_0 . Как следует из рис. 2, уже при $l_2 = 2 l_1$ отношение Nu/Nu_0 довольно близко приближается к указанным выше значениям. При этом сохраняется тенденция к снижению Nu/Nu_0 с увеличением числа Рейнольдса. Следует отметить, что и в классическом начальном участке канала с одновременным формированием динамического и теплового пограничных слоев влияние числа Рейнольдса на отношение Nu/Nu_0 происходит в этом же направлении [2].

Результаты тепловизионных измерений температуры стенки при дискретном нагреве приведены на рис. 3. Измерения проводились в конечной части теплообменной стенки $x/d_h > 10$. Данные представлены в виде температурного напора $(T_w - T_f)$, распределение которого при постоянном значении температуры потока T_f может рассматриваться как распределение температуры стенки T_w . Система координат $(0x)$ здесь связана лишь с измерительным участком. На нагреваемых участках (их границы представлены вертикальными линиями) показано наличие теплового потока q_w . Из распределений видно, что температуры ненагреваемых участков имеют промежуточные значения (от температуры потока до температур нагреваемых участков). Наиболее высокая температура стенки соответствует концу (по потоку) нагреваемого участка, где реализуется минимальный локальный коэффициент теплоотдачи вследствие наибольшей толщины вновь сформировавшегося теплового пограничного слоя. Газ в ближайшей к стенке струйке имеет температуру стенки, но сама эта струйка высокотемпературного газа на необогреваемом участке постепенно размывается, при этом снижаются температура в пристеночной зоне и соответственно температура ненагреваемой стенки.

При дискретном нагреве определенный интерес представляют и усредненные по всей площади значения КТО $\langle \alpha \rangle = \langle q_w \rangle / (\langle T_w \rangle - T_f)$, где $\langle q_w \rangle = q_w l_1 / (l_1 + l_2)$ — усредненная по площади плотность теплового потока, $\langle T_w \rangle$ — среднеинтегральная температура стенки, полученная на основе усреднения результатов измерений тепловизором для нагреваемых и ненагреваемых участков. Значения $\langle Nu \rangle / Nu_0$ ($\langle Nu \rangle = \langle \alpha \rangle d_h / \lambda$) в области почти стабилизированных значений при $x/d_h > 10$ оказались достаточно близкими к единице, причем для схемы нагрева $l_2 = l_1$ во всем диапазоне чисел Рейнольдса. Однако схема нагрева $l_2 = 2l_1$ по среднему КТО соответствовала непрерывному нагреву только в области минимальных чисел Рейнольдса по условиям опытов, а с увеличением числа Рейнольдса отношение $\langle Nu \rangle / Nu_0$ плавно снижалось вплоть до значения 0.72 при максимальном опытном значении числа Рейнольдса. Очевидно, что при дальнейшем увеличении отношения l_2/l_1 отношение $\langle Nu \rangle / Nu_0$ продолжит снижение.

Таким образом, за счет обновления теплового пограничного слоя при дискретном нагреве локальная теплоотдача нагреваемых элементов существенно повышается по сравнению со случаем непрерывного нагрева. При малых l_2/l_1 и низких числах Рейнольдса в области

стабилизированной теплоотдачи это повышение близко к величине $Nu/Nu_0 = (l_1 + l_2)/l_1$, при которой уменьшение фактической площади нагрева полностью компенсируется повышением теплоотдачи от нагреваемых элементов. В целом интегральный КТО при дискретном нагреве оказался близким к величине КТО при непрерывном нагреве, но проигрывает ему, причем проигрыш проявился только для схемы $l_2 = 2l_1$ и нарастает с увеличением числа Рейнольдса.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (№ 22-19-00507-П).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Н.Л. Кафенгауз, М.И. Федоров, *Атомная энергия*, **27** (3), 552 (1969).
- [2] М.А. Михеев, *Основы теплопередачи* (Госэнергоиздат, М., 1949).
- [3] I.A. Davletshin, N.I. Mikheev, A.A. Paereliy, I.M. Gazizov, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **129**, 74 (2019). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.066
- [4] Э.К. Калинин, Г.А. Дрейцер, И.З. Копп, А.С. Мякочин, *Эффективные поверхности теплообмена* (Энергоатомиздат, М., 1998).
- [5] I.A. Davletshin, N.S. Dushin, N.I. Mikheev, R.R. Shakirov, *Int. J. Therm. Sci.*, **204**, 109202 (2024). DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2024.109202
- [6] В.И. Терехов, Н.И. Ярыгина, Я.И. Смольский, *Теплофизика и аэромеханика*, **15** (2), 219 (2008). <https://www.sibran.ru/upload/iblock/493/493bcd07c69095f8a44b2685b5df580f.pdf> [V.I. Terekhov, N.I. Yarygina, Ya.I. Smulsky, *Thermophys. Aeromech.*, **15** (2), 205 (2008). DOI: 10.1134/S0869864308020042].
- [7] S.A. Isaev, M.S. Gritckevich, A.I. Leontiev, O.O. Milman, D.V. Nikushchenko, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **145**, 118737 (2019). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118737
- [8] C.J. Ho, J.Y. Chang, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **37** (6), 917 (1994). DOI: 10.1016/0017-9310(94)90217-8
- [9] А.А. Арбатский, В.С. Глазов, *Вестн. МЭИ*, № 4, 36 (2018). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-4-36-43