

Итоги исследований Института механики многофазных систем СО АН СССР.— Тюмень, 1990.— № 2.

11. Тапшыкова Л. Ю., Юдина Н. В. Влияние высокомолекулярных компонентов на реологию нефтяных систем // Структура растворов и дисперсий: свойства коллоидных систем и нефтяных растворов.— Новосибирск: Наука, 1988.
12. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред.— М.: Наука, 1982.

г. Тюмень

Поступила 4/XI 1991г.,  
в окончательном варианте —  
17/VI 1992 г.

УДК 536.24

А. И. Гныря, В. И. Терехов, С. П. Третьяков,  
Н. И. Ярыгина

### ТЕПЛОБМЕН ВЫНУЖДЕННОЙ КОНВЕКЦИЕЙ ОТ НАГРЕТОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ПОЛОСТИ, ОБРАЗОВАННОЙ ДВУМЯ ВЫСОКИМИ РЕБРАМИ

Интерес к проблеме исследования отрывных течений обусловлен широкими техническими приложениями таких потоков. Известно [1], что наличие на обтекаемой поверхности макрошероховатостей в виде уступов, ребер, граней, приводящих к отрыву потока, может вызвать как интенсификацию, так и снижение интенсивности конвективного теплообмена. Интенсификация теплообмена вызывается дополнительной турбулизацией течения в вихревых зонах, а также малой толщиной пограничного слоя в зоне его повторного присоединения к стенке и в области его дальнейшего развития вниз по потоку. Снижение же теплоотдачи обусловлено малым значением коэффициента обмена в замкнутых циркуляционных зонах до и после препятствий. Влияние этого фактора возрастает с увеличением высоты препятствий, когда его относительное значение  $h^+ = hv^*/\nu \geq 10^2 \div 10^3$  ( $h$  — высота препятствия,  $v^* = \sqrt{\tau_w/\rho}$  — скорость трения,  $\nu$  — кинематическая вязкость).

Совместное проявление указанных факторов существенно усложняет процесс тепломассообмена, и возможность теоретического решения задачи становится весьма проблематичной. Первостепенное значение при анализе подобных течений приобретает эксперимент.

Несмотря на большое количество работ, посвященных экспериментальному изучению теплообмена в отрывных течениях, механизм переноса тепла в ячейке между двумя высокими ребрами практически не изучен. В [2, 3] исследовалась в основном теплоотдача за одиночным высоким ребром. Большое число работ посвящено экспериментальному изучению гидродинамики и теплообмена при наличии на поверхности элементов шероховатости в виде системы препятствий — ребер небольшой высоты ( $h^+ = 5 \div 50$ ), которые используются для интенсификации теплообмена [4—9]. В целом же течение между препятствиями малой высоты, линейный масштаб которых значительно меньше толщины пограничного слоя, имеет принципиальное отличие от рассматриваемой нами задачи.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию вынужденной конвективной теплоотдачи от нагреваемой поверхности между двумя высокими ребрами. Большое внимание уделено визуализации картины течения.

**1. Экспериментальная установка. Методика измерений.** Опыты проводились в канале дозвуковой аэродинамической трубы сечением  $200 \times 200$  мм. На нижней стенке канала (рис. 1) устанавливались ребра из материала с низкой теплопроводностью (оргстекла) толщиной  $S =$

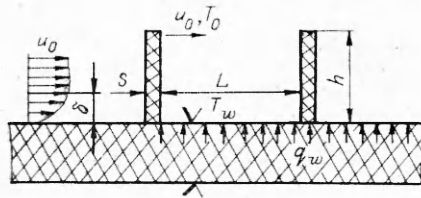


Рис. 1

пластине с внутренней стороны канала. Нагреватель располагался по всей ширине канала в виде непрерывной токопроводящей дорожки шириной 5 мм. Расстояние между соседними дорожками  $\sim 0,5$  мм, а суммарное электрическое сопротивление  $R \approx 7,6$  Ом.

В опытах выполнялось условие  $q_w = \text{const}$ , причем величина  $q_w$  определялась как отношение подводимой электрической мощности ко всей нагреваемой поверхности, включая и промежутки между токопроводящими дорожками, что справедливо в силу их малости. Температура поверхности определялась 36 хромель-копелевыми термопарами с диаметром провода 0,2 мм, размещенными под ленточным нагревателем вдоль одной прямой посередине рабочего участка. Температура воздуха измерялась аналогичной хромель-копелевой термопарой, расположенной в форкамере установки. Максимальная разность между температурой стенки и набегающего воздуха в опытах  $\Delta T = T_w - T_0 \approx 50^\circ$ , так что температурный фактор не превышал  $\psi = T_w/T_0 \leq 1,2$  и течение было близко к изотермическому. При обработке экспериментальных данных влияние температурного фактора не учитывалось, а физические свойства воздуха принимались по среднему значению температуры между стенкой и ядром течения.

Утечки тепла через пластину, на которую нанесен ленточный нагреватель, определялись экспериментально. Для этого с внешней стороны рабочей пластины (см. рис. 1) по всей ее длине заделывались термопары. Утечки тепла в опытах составляли 10—30 % и учитывались при обработке результатов.

Опыты проведены в диапазоне скоростей набегающего потока  $u_0 = 4 - 21$  м/с, так что число Рейнольдса, построенное по расстоянию между ребрами, изменялось в пределах  $Re_L = u_0 L/\nu = 10^4 \div 3 \cdot 10^5$ . Характерная скорость  $u_0$ , по которой определялось значение  $Re_L$ , бралась из измерений потенциального течения над первым ребром. Как показали измерения,  $u_0$  практически не изменялась по длине всей ячейки.

Интенсивность турбулентности в ядре течения  $\sim 1$  %. К месту установки первого ребра на нижней стенке был сформирован турбулентный пограничный слой толщиной  $\delta \approx 7 \div 10$  мм; тепловой пограничный слой начинался непосредственно от первого ребра.

Проведенная серия тестовых испытаний показала, что при отсутствии ребер на поверхности опытные данные по теплоотдаче совпадают с законом теплообмена для плоского турбулентного пограничного слоя. Отклонение их при этом не превышало +10 %.

В работе большое внимание уделено визуализации течения, которая осуществлялась теневым методом с помощью шпирен-прибора ИАБ-451. Поле оптических неоднородностей создавалось за счет нагрева теплообменной поверхности. Кроме того, для получения более качественной визуализационной картины на поверхности ребер на различной высоте устанавливались тонкие нагреваемые электрическим током проволоочки, дающие четкий тепловой след.

Ряд экспериментов по визуализации проведен на плоском гидродинамическом стенде сечением  $3 \times 200$  мм методом оптически активной жидкости. Геометрические размеры ячейки между ребрами полностью соответствовали случаю трехмерного течения, а значения  $Re_L$  были такими же, как и при исследовании теплоотдачи. В целом картины тече-

$= 3$  мм. В данных опытах ребра были одинаковой высоты ( $h = 60$  мм), а расстояние между ними составляло  $L/h = 1; 2; 3$  калибра.

Нижняя стенка канала представляла собой текстолитовую пластину толщиной  $d = 20$  мм. Теплоподвод осуществлялся ленточным нагревателем из алюминиевой фольги толщиной  $\sim 20$  мкм, смонтированным на этой

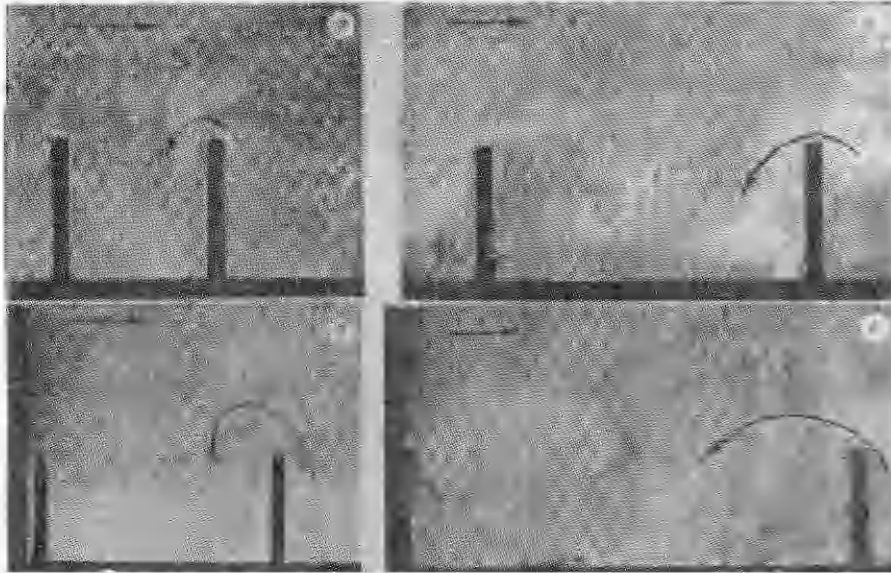


Рис. 2

ния, полученные обоими методами, качественно подобны. Необходимо отметить, что в плоской модели вихреобразование наблюдалось при существенно больших  $Re_L$ .

**2. Экспериментальные результаты и их обсуждение.** Фотографии картины течения в полости между двумя ребрами на плоской модели с оптически активной жидкостью представлены на рис. 2 для четырех значений ширины полости:  $L/h = 1; 2; 3; 4$  отвечает  $a - г$ . Как видно, набегающий поток отрывается от верхней кромки первого ребра, образуя за ним сдвиговый слой подобно тому, как это происходит в прямоугольной траншее-каверне. В пространстве между ребрами создается разрежение, в результате чего образуется вторичное течение, направленное вверх второго ребра навстречу основному потоку. Таких вторичных течений при обтекании траншей и систем ребер малой высоты в литературе не отмечалось, по-видимому, они появляются при взаимодействии потоков с системой высоких ребер.

Наличие вторичных течений существенно сказывается на общей картине течения в межреберном пространстве, определяемой, таким образом, взаимодействием двух встречных потоков. При  $L/h = 1$  встречное вторичное течение достигает первого ребра. Образующийся вихрь имеет направление вращения, противоположное направлению вихря, наблюдаемого при обтекании прямоугольной каверны [10]. С увеличением расстояния между ребрами (рис. 2, б) картина течения становится более сложной. Вторичное течение, проникая в область между ребрами, образует вихрь перед вторым ребром. Часть газа из этого вихря непрерывно отбирается с его внешней границы основным потоком. В области за первым ребром формируется еще один вихрь с тем же направлением вращения, что и у вихря перед вторым ребром. При еще больших расстояниях между ребрами (рис. 2, в) вихри разрываются на ряд более мелких, вторичное течение может достигать теплообменной поверхности между ребрами.

Отмеченные особенности структуры течения в межреберном пространстве сказываются на распределении локальных значений коэффициентов теплоотдачи. Эти данные представлены на рис. 3, где  $\bar{\alpha}$  — среднее интегральное значение коэффициента теплоотдачи в промежутке между ребрами,  $Re_h$  — число Рейнольдса, построенное по высоте ребра.

При  $L/h = 1$  (рис. 3, а) максимум локальной теплоотдачи приходится на область, непосредственно примыкающую к переднему ребру, куда



Рис. 3

вначале проникает холодное вторичное течение. Затем, по мере продвижения ко второму ребру, наблюдается монотонное снижение теплоотдачи. Отметим, что при обтекании траншей с нагретым дном (также при  $L/h = 1$ ) имеет место иная картина в распределении локальной теплоотдачи [10]. Максимальное ее значение достигается у задней по потоку стенки, а минимальное — в окрестности передней стенки. Очевидно, что столь существенную разницу в качественное поведение коэффициента теплоотдачи вносят вторичные течения, характерные для обтекания системы высоких ребер.

С увеличением калибра между ребрами (рис. 3, б,  $L/h = 2$ ) вблизи основания второго ребра локальная теплоотдача начинает возрастать, что обусловлено ослаблением и постепенным разрушением вихря у второго ребра. Таким образом, минимум коэффициента теплообмена смещается внутрь межреберного пространства. При  $L/h = 3$  (рис. 3, в) на расстоянии  $x/h \sim 2$  появляется дополнительный максимум в теплоотдаче, вызванный присоединением встречного возвратного течения к нагреваемой стенке, хорошо наблюдаемый в визуализационных картинах (рис. 2, б, в).

Отметим еще одну важную особенность, характерную для всех исследованных геометрий межреберного пространства. Относительные распределения коэффициентов теплоотдачи  $\alpha/\bar{\alpha}$ , нормированные по средней величине, оказались слабочувствительными к значению  $Re_L$ . Как видно из рис. 3, опытные точки, полученные при различных  $Re_L$ , различаются несущественно.

При обработке экспериментальных результатов по теплоотдаче в качестве определяющих критериев были использованы среднее по полости число Нуссельта  $\bar{Nu}_L = \bar{\alpha}L/\lambda$  и число Рейнольдса, построенное по расстоянию между ребрами,  $Re_L = u_0L/\nu$ . На рис. 4 представлены экспериментальные данные по средней теплоотдаче при обтекании ребер, установленных на различных калибрах ( $L/h = 1; 2; 3$  — точки 1—3). Опытные данные в таком представлении не обобщаются, и с увеличением числа калибров между ребрами интенсивность теплообмена возрастает. Однако характер их поведения при  $L/h = \text{const}$  имеет сходные черты. На рис. 5 показано отношение средней теплоотдачи в полости между ребрами к аналогичной величине, но при отсутствии ребер  $Nu_L/\bar{Nu}_{L, \text{пл}} = f(Re_L)$ . Таким образом, в чистом виде анализировалось влияние ребер на интенсивность теплообмена.

Из рис. 5 следует сделать такие выводы. Экспериментальные кривые, полученные для разных калибров ( $L/h = 1; 3$  — точки 1, 3), подобны между собой. Они имеют две характерные области — ниспадающий прямолинейный участок при низких значениях  $Re_L$ , затем резкое возраста-

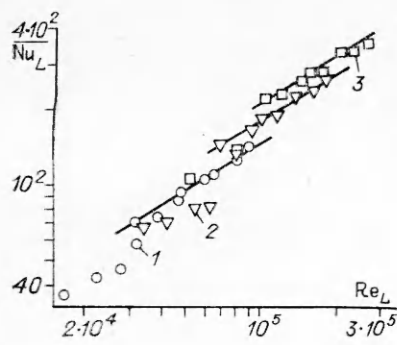


Рис. 4

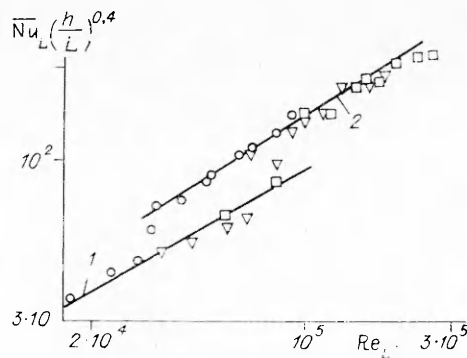


Рис. 6

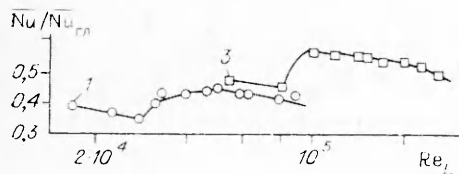


Рис. 5

ние с образованием достаточно пологого максимума. Наиболее интересным с практической точки зрения результатом является то, что средняя теплоотдача между ребрами оказалась в  $1,5 \div 3$  раза ниже, чем при обтекании гладкой поверхности. Как и следовало

ожидать, с увеличением расстояния между ребрами интенсивность процессов теплообмена возрастает.

Экспериментальные данные по средней теплоотдаче для различных значений калибра межреберной ячейки были обобщены с использованием в качестве характерного параметра отношения  $L/h$ . Результаты такого обобщения показаны на рис. 6. Опытные данные группируются относительно двух линий. Линия 1 соответствует уравнению

$$(1) \quad \overline{Nu}_L = 0,306 Re_L^{0,5} (L/h)^{0,4},$$

в котором показатель степени при числе Рейнольдса отвечает ламинарному закону теплообмена. Линия 2, описывающая вторую группу экспериментальных точек, имеет вид

$$(2) \quad \overline{Nu}_L = 0,0668 Re_L^{2/3} (L/h)^{0,4}$$

с показателем степени при числе Рейнольдса, равным  $2/3$ , и характеризует теплоотдачу в отрывных турбулентных течениях [1], когда основной вклад в процессы обмена вносит диффузионный перенос тепла.

Для фиксированного расстояния между ребрами ( $L/h = \text{const}$ ) опытные точки, судя по рис. 6, вначале при малых  $Re_L$  подчиняются ламинарной зависимости (1), затем после переходного процесса — турбулентной зависимости (2). Числа Рейнольдса перехода от ламинарного к турбулентному закону теплообмена не являются фиксированными, а возрастают с увеличением расстояния между ребрами.

Качественно подобный характер опытных результатов по теплообмену установлен при исследовании конвективной теплоотдачи в прямоугольных кавернах с нагреваемым дном [10]. Однако провести детальные сопоставления и выявить общие закономерности теплоотдачи в настоящее время не представляется возможным прежде всего из-за существенных отличий в аэродинамических картинах, формирующихся при обтекании каверн и полости между двумя ребрами. Неясным остается механизм образования встречных течений, проникающих в полость между ребрами. Для выяснения его необходимо детальное экспериментальное изучение аэродинамики течения. Кроме того, представляется целесообразным в дальнейшем расширить область исследований по теплоотдаче в межреберной полости для других значений  $L/h$ , изменяя при этом и абсолютные значения высоты ребер  $h$ .

Важным моментом является изучение влияния толщины ребра  $S$  на аэродинамику отрывных течений в ячейке с целью определения условий перехода зависимостей, описывающих теплообмен в межреберном пространстве, к аналогичным соотношениям для прямоугольной каверны.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Чжен П. Отрывные течения.— М.: Мир, 1973.— Т. 3.
2. Кгалхерман М. Г. Теплоотдача к пластине за препятствиями // ПМТФ.— 1966.— № 5.
3. Гныря А. И. Внешний тепло- и массообмен при бетонировании с электроразогревом смеси.— Томск: ТГУ, 1977.
4. Гомелаури В. И., Канделаки Р. Д., Кипшидзе М. Е. Интенсификация конвективного теплообмена под воздействием искусственной шероховатости // Вопросы конвективного теплообмена и чистоты водяного пара: Сборник.— Тбилиси: Мецнипереба, 1970.
5. Калинин Э. Б., Ярхо С. А., Дрейцер Г. А. Интенсификация теплообмена в каналах.— М.: Машиностроение, 1972.
6. Ибрагимов М. Х., Субботин В. И., Бобков В. П. и др. Структура турбулентного потока и механизм теплообмена в каналах.— М.: Атомиздат, 1978.
7. Дурст Ф., Растогн А. К. Турбулентное течение за двумерными перегородками // Турбулентные сдвиговые течения. 2: Сборник.— М.: Машиностроение, 1983.
8. Дурст Ф., Фаунти М. Экспериментальное и численное исследование двумерного течения в канале с двумя последовательно расположенными перегородками // Тр. Амер. о-ва инж.-мех. Теорет. основы инж. расчетов.— 1988.— № 4.
9. Лю, Чжан, Хуан. Экспериментальное и численное исследование турбулентного течения в канале с двумя парами турбулизаторов на стенках // Современное машиностроение. Сер. А.— 1991.— № 2.
10. Ямамото, Секи, Фукусако. Теплоотдача вынужденной конвекцией от нагретого дна полости // Тр. Амер. о-ва инж.-мех. Теплопередача.— 1979.— Т. 101, № 3.

г. Новосибирск

Поступила 8/IV 1992 г.

УДК 536.24

В. Г. Горобец

### СОПРЯЖЕННЫЙ КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН КОЛЬЦЕВЫХ РЕБЕР ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ИХ ОБТЕКАНИИ

Один из методов интенсификации теплообмена гладких поверхностей состоит в применении оребрения. В зависимости от условий течения поток внешнего теплоносителя направлен вдоль ребра, нормально к его поверхности или имеет угол атаки  $\gamma$ , отличный от нуля ( $0 < \gamma < 90^\circ$ ). Для двух последних случаев, как правило, наблюдаются отрывы внешнего потока и наличие за ребристым элементом возвратных течений. Изучение условий теплообмена развитых поверхностей при отрывных течениях проводилось в [1—3]. Отметим, однако, что в имеющихся работах рассматривались поверхности с постоянной температурой. Для реальных теплообменных устройств температура меняется по поверхности и в наиболее полной постановке задачу следует рассматривать как сопряженную, т. е. с учетом совместного распространения тепла как в теплоносителе, так и в обтекаемой поверхности.

В настоящей работе при сопряженной постановке задачи изучены условия теплообмена и определена тепловая эффективность ребер при поперечном их обтекании ( $\gamma = 90^\circ$ ) для некоторых режимов течения и геометрии оребренной поверхности. Рассматриваются поверхности с кольцевым или плоским оребрением (рис. 1, где  $a$  и  $b$  — внутреннее и внешнее кольцевое оребрение), геометрия и условия обтекания которых таковы, что в межреберном пространстве образуется одиночный вихрь (рис. 2,  $a$ ). Указанные условия реализуются при достаточно больших

© В. Г. Горобец, 1993