

## ЛАМИНАРНАЯ СВОБОДНАЯ КОНВЕКЦИЯ ЖИДКОСТИ В ОРЕБРЕННОЙ ЩЕЛИ

*Н. В. Мухина*

(Новосибирск)

Свободноконвективные течения в вертикальных зазорах технических аппаратов и конструкций часто осуществляются в условиях сложной геометрии стенок слоя. Поперечные выступы на одной или двух стенках жидкостной или газовой прослойки могут перекрывать часть ширины слоя. Очевидно, что наличие таких выступов может привести к изменению картины течения в зазоре и к изменению теплоотдачи от горячей к холодной стенке.

Для проведения исследований свободноконвективного течения в вертикальном канале с выступами использовалась установка, схема которой приведена на фиг. 1. Стенками служили медные пластины 1 (толщина пластины 15 мм), установленные в контейнер 2 с рабочей жидкостью — этиловым спиртом ( $Pr = 16$ ). Во всех экспериментах использовался канал с высотой  $H = 342$  мм и глубиной  $B = 56$  мм. Ширина его изменялась при помощи калиброванных по толщине вставок из оргстекла, зажимаемых между рабочими поверхностями пластин. Температура каждого из теплообменников поддерживалась постоянной прокачиванием воды из термостатов через полость, расположенную позади рабочих пластин. Контроль за постоянством температуры пластины по высоте осуществлялся пятью нихром-константановыми термопарами 0,2 мм, заделанными заподлицо с рабочей поверхностью.

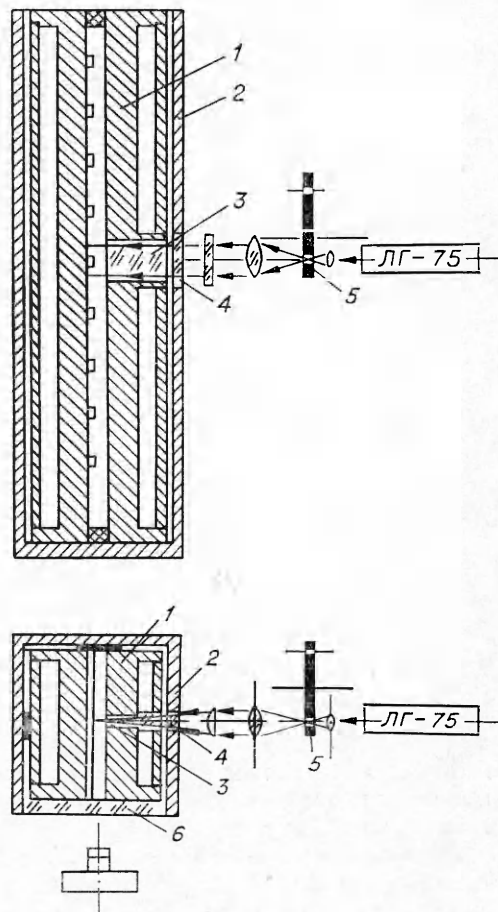
Для измерений температуры в слое использовалась нихром-константановая термопара  $\varnothing 0,06$  мм. Термопарные провода в хлорвиниловой изоляции располагались в тонкостенном капилляре из нержавеющей стали вдоль заднего вертикального торца слоя, который наружным координатником перемещался в вертикальном направлении с точностью отсчета 0,1 мм. Через отогнутый конец капилляра спай термопары вносился в середину слоя по глубине. Перемещение спая в зафиксированной горизонтальной плоскости осуществлялось за счет поворота металлического капилляра. Координаты термопары определялись катетометром КМ-6 с точностью 0,03 мм. ЭДС термопар определялась низкоомным потенциометром постоянного тока Р 348 класса 0,002. Тарировка термопар производилась по образцовому платиновому термометру сопротивления с точностью до 0,01°C в интервале температур 15—60°C.

Для гидродинамических исследований применялся метод стробоскопической визуализации. В качестве меток использовалась алюминиевая пудра в виде шариков с размерами 5 мк. Визуальные наблюдения и фотографирование структуры течения производились в отраженном свете через прозрачную стенку контейнера 6. Участок слоя около середины по высоте освещался сбоку через узкую 2 мм вертикальную стеклянную вставку 3 в одной из пластин и прозрачное окно 4 в боковой стенке контейнера. Освещающий поток формировался из светового луча лазера ЛГ-75 при помощи системы линз, которая сначала преобразовывала его в параллельный пучок диаметром 2,5 см, а затем цилиндрической линзой обращала в вертикальный сходящийся пучок, сфокусированный на противоположную от окна пластину. Таким образом, через окно освещался плоский вертикальный участок слоя. В плоскости, где световой луч имел

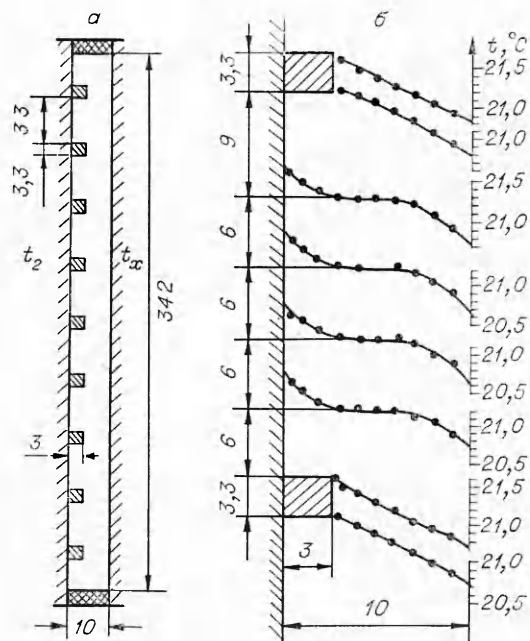
наименьшее сечение, он проходил через систему отверстий, равномерно расположенных по диаметру вращающегося с постоянной скоростью диска 5, т. е. поток с алюминиевыми частицами освещался световыми импульсами с заданной скважностью.

Первоначально было рассмотрено течение в слое с одним выступом на горячей стенке. Слой высотой  $H = 342$  мм и шириной  $L = 10$  мм имел на середине высоты по всей глубине слоя поперечный выступ из текстолита толщиной 0,5 мм. Размер выступа по ширине слоя составлял 2,4 и 5 мм. Качественная картина течения одинакова для всех величин выступов: на общее циркуляционное движение, существующее в канале, накладываются вихревые структуры, формирующиеся в верхней и нижней частях щели. Анализ расходов жидкости на единицу глубины слоя в восходящем и нисходящем течениях, проведенный при ширине выступа 5 мм, показал, что в сечении выступа расходы в 2,5 раза меньше, чем на расстоянии 5 мм от него. Таким образом, большая часть жидкости участвует в вихревых движениях выше и ниже уступа и меньшая — в общециркуляционном движении. Экспериментальные значения максимальной величины вертикальной составляющей скорости на небольшом расстоянии от выступа на 25% ниже теоретического [1] максимума скорости, рассчитанного для относительной высоты слоя  $h = H/L$ , равной половине общей высоты канала.

Затем рассматривались течения в слое при наличии нескольких поперечных ребер, расположенных на одной из стенок слоя на равном расстоянии друг от друга по высоте. Выступы имели вид прямоугольных ребер, проложенных горизонтально по всей глубине слоя. Рабочим материалом выступов служил дюралюминий. Первая рассмотренная группа выступов имела размеры, показанные на фиг. 2. На фиг. 3 показана картина течения в районе одного из средних выступов, качественно похожая на ту, которая наблюдалась в случае одиночного выступа: наличие общециркуляционного течения в слое с наложенными на него вихревыми структурами, образующимися между выступами. Распределение температуры между выступами в среднем по глубине сечения для этого режима приведено на фиг. 2. Экспериментальный безразмерный коэффициент теплоотдачи определялся по замеренному градиенту температуры около стенки. В среднем сечении между выступами число Нуссельта  $Nu = 1,6$ , а при том же числе



Ф и г. 1



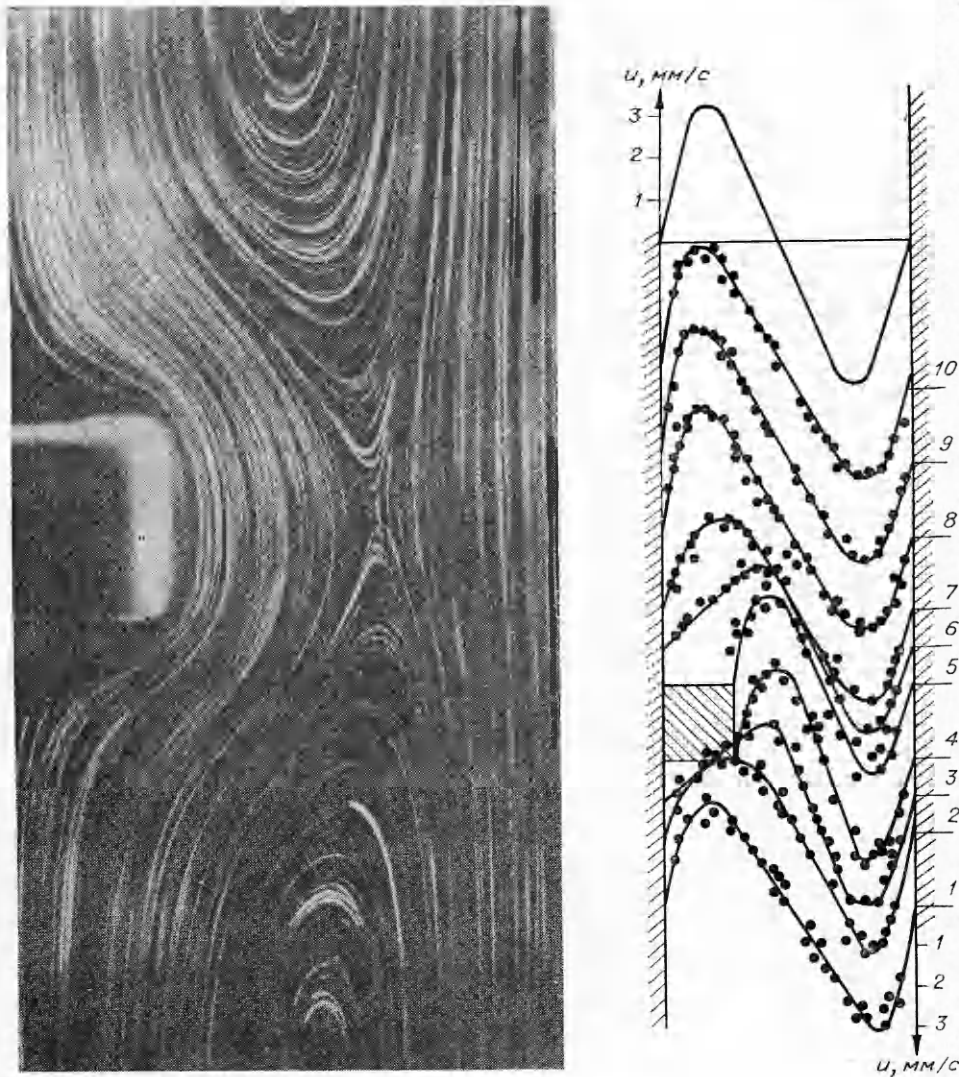
Ф и г. 2

Рэля  $Ra$  в канале без выступов  $Nu$ , экспериментальное значение которого совпадает с расчетным, определенным дифференцированием выражения для температуры [1] на стенке, равен 2. Наличие поперечных ребер на поверхности приводит к затормаживанию потока, уменьшению количества жидкости, участвующей в общециркуляционном движении, и к уменьшению теплоотдачи. Частичное замыкание течения между ребрами способствует местному увеличению продольного градиента температуры на этих участках. На фиг. 3 приведены профили вертикальной составляющей скорости  $u$  в ряде горизонтальных сечений около уступа, верхний экспериментальный профиль относится к среднему сечению между двумя выступами. Теоретический профиль скорости, приведенный над экспериментальными, рассчитан для всей высоты слоя и имеет максимальное значение на 25% выше экспериментального. Были подсчитаны расходы жидкости в восходящих и нисходящих течениях через обозначенные на фиг. 3 сечения. Размер сечения по глубине слоя принимался равным 1 мм. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

В районе выступа профиль симметричен, отношение расходов в этих течениях  $K = 0,98$ . На относительном расстоянии, равном 1 (расстояние

Таблица 1

Номер сечения замера	Расход в восходящем потоке, мм <sup>3</sup> /с	Расход в нисходящем потоке, мм <sup>3</sup> /с	Отношение расходов $K$	Параметры режима
1	14,2	15,0	0,94	$t_2 = 21,68^\circ\text{C}$ $t_x = 20,75^\circ\text{C}$ $Ra = 7,2 \times 10^4$
2	12,3	13,6	0,90	
3	11,8	12,2	0,97	
4	9,3	9,42	0,99	
5	8,6	8,9	0,97	
6	11,4	10,0	1,14	
7	12,9	11,3	1,14	
8	15,2	14,0	1,08	
9	15,2	14,5	1,05	
10	14,9	14,4	1,03	
Середина выступа	0,63	0,71	0,89	$t_2 = 25,44^\circ\text{C}$ $t_x = 20,30^\circ\text{C}$ $Ra = 4,5 \times 10^4$
Середина между выступами	1,12	1,34	0,83	
Середина выступа	0,385	0,78	0,49	$t_2 = 21,48^\circ\text{C}$ $t_x = 20,58^\circ\text{C}$ $Ra = 1,7 \times 10^4$
Середина между выступами	0,965	1,07	0,9	



Ф и г. 3

от уступа до рассматриваемого сечения относится к высоте уступа),  $K = 1,14$ . Такое несоответствие расходов в восходящем и нисходящем течениях говорит о том, что течение приобретает трехмерную структуру. Трехмерный характер вихревых течений за уступами при вынужденном движении известен давно [2—4], при свободной конвекции трехмерный характер вихревых образований не наблюдался.

Для исследования течения при меньших значениях  $Ra$  использовался слой, геометрически подобный предыдущему: в слое шириной  $L = 5$  мм выступы высотой 1,6 мм и толщиной 1,5 мм прикреплялись к горячей пластине с шагом 16 мм по высоте между ними. Качественная картина течения сохраняет прежний характер, но несоответствие расходов в восходящих и нисходящих потоках увеличивается. Соотношения расходов в этих течениях приведены во второй части табл. 1.

Таблица 2

Сечение замеров	Расход в восходящем потоке, мм <sup>3</sup> /с	Расход в нисходящем потоке, мм <sup>3</sup> /с	Отношение расходов $K$	Параметры режима
Нижний выступ	1,1	1,57	0,7	$t_2=21,41^\circ\text{C}$
Середина между выступами	1,09	1,98	0,55	$t_x=20,23^\circ\text{C}$
Верхний выступ	1,29	1,84	0,7	$Ra=10^4$
Нижний выступ	0,75	1,14	0,65	$t_2=20,99^\circ\text{C}$
Середина между выступами	0,88	1,26	0,7	$t_x=20,21^\circ\text{C}$
Верхний выступ	0,74	1,16	0,63	$Ra=6,6 \times 10^3$
Нижний выступ	0,543	1,41	0,38	$t_2=20,67^\circ\text{C}$
Середина между выступами	0,81	1,47	0,55	$t_x=20,20^\circ\text{C}$
Верхний выступ	0,6	1,31	0,46	$Ra=3,9 \times 10^3$

Влияние уменьшения шага между выступами на течение было проверено в слое шириной 5 мм, где ребра поперечного сечения  $1 \times 1$  мм располагались с шагом 3,5 мм по высоте, т. е. относительное расстояние между ними уменьшалось в 3 раза по сравнению с предыдущим случаем. Течение сохранило в явные структуры между выступами на фоне общециркуляционного течения. Характеристики указанных потоков в таком слое и их соотношения в области двух соседних выступов приведены в табл. 2.

Трехмерная картина течения между выступами при меньшем шаге между ними еще более ярко выражена: во всех сечениях профили скорости в потоках не одинаковы, отношение расходов  $K$  в большинстве сечений меньше 0,7. Табличные данные также подтверждают, что уменьшение  $Ra$  сопровождается усилением явления трехмерности течения.

Таким образом, наличие поперечного оребрения на одной из стенок вертикального конвектирующего слоя жидкости вызывает появление трехмерного течения. Наличие этого явления в потоке исключает возможность расчета параметров течения методами, применяемыми для плоскопараллельных течений, и требует специального изучения.

Автор выражает благодарность А. Г. Кирдяшкину за постановку задачи исследования.

Поступила 18 VII 1978

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Предтеченский А. А., Кирдяшкин А. Г., Бердников В. С. Устойчивость свободноконвективного течения жидкости в плоском наклонном слое. — В кн.: Современные проблемы тепловой гравитационной конвекции. Минск, изд. Ин-та тепломассообмена АН БССР, 1974.
2. Фидман Б. А. Поле скоростей в водном потоке при внезапном увеличении глубины. — «Изв. АН СССР. Отдел. техн. наук», 1953, № 4.
3. Mulls E. D. On the closed motion of a fluid in a square cavity. — «J. of the Royal Aero. Soc.», 1965, vol. 69, p. 116.
4. Богатырев В. А., Дубнищев Ю. Н. и др. Экспериментальное исследование течения в траншее. — ПМТФ, 1976, № 2.