

6. Kreith F., Margolis D. Heat transfer and friction in turbulent vortex flow // Appl. Scient. Res., sect. A.— 1959.— V. 8, N 6.
7. Гостинцев Ю. А., Зайцев М. В. и др. О теплоотдаче в трубе с разрушающимися стенками при течении вращающегося газа // Изв. АН СССР. МЖГ.— 1967.— № 5.
8. Мигай В. К. Трение и теплообмен в закрученном потоке внутри трубы // Изв. АН СССР. Энергетика и трансп.— 1966.— № 5.
9. Smithberg E., Landis F. Friction and forced convection heat transfer characteristics in tubes with twisted tape swirl generators // Trans. ASME. Ser. C. J. Heat Transfer.— 1964.— V. 86, N 1. Рус. пер. // Тр. Америк. о-ва инж.-мех. Теплопередача.— 1964.— Т. 86, № 1.
10. Зозуля Н. В., Шкуратов Н. Я. Влияние спиральных вставок на теплоотдачу при движении вязкой жидкости внутри трубы // Теплофизика и теплотехника.— Киев: Наук. думка, 1964.
11. Koch R. Druckverlust und Wärmeübergang Strömung // VDI-Forschungsheft 469. Ser. B.— 1958.— V. 24.
12. Волчков Э. П., Спотарь С. Ю., Терехов В. И. Турбулентный теплообмен в начальном участке трубы при закрутке потока // Материалы VI Всесоюз. конф. по теплообмену.— Минск: ИТМО АН БССР, 1980.— Т. 1, ч. 3.
13. Гостинцев Ю. А. Тепло- и массообмен и гидравлическое сопротивление при течении по трубе вращающейся жидкости // Изв. АН СССР. МЖГ.— 1968.— № 5.
14. Волчков Э. П., Дворников Н. А., Терехов В. И. Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое закрученного потока.— Новосибирск, 1983.— (Препринт/ИТФ СО АН СССР; № 107—83).
15. Дворников Н. А., Терехов В. И. О переносе импульса и тепла в турбулентном пограничном слое на криволинейной поверхности // ПМТФ.— 1984.— № 3.
16. Мигай В. К., Голубев Л. К. Трение и теплообмен в турбулентном закрученном потоке с переменной круткой в трубе // Изв. АН СССР. Энергетика и трансп.— 1969.— № 6.
17. Холодкова О. Ю., Фафурин А. В. Экспериментальное исследование теплоотдачи в цилиндрическом канале при наличии начальной закрутки и вдуве различных газов // Тр. КИАИ.— 1974.— Вып. 178.
18. Щукин В. К., Халатов А. А. Теплообмен, массообмен и гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах.— М.: Машиностроение, 1982.
19. Seban R. A., Hunsbedt A. Friction and heat transfer in the swirl flow of water an annulus // Intern. J. Heat and Mass Transfer.— 1973.— V. 16, N 2.
20. Bradshaw P. The analogy between streamline curvature and buoyancy in turbulent shear flow // J. Fluid Mech.— 1969.— V. 36, pt 1.
21. Гинзбург И. П. Теория сопротивления и теплоотдача.— Л.: Изд-во ЛГУ, 1970.
22. Кутателадзе С. С., Леонтьев А. И. Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое.— М.: Энергия, 1972.
23. Jonston J. P., Eide S. A. Turbulent boundary layer on centrifugal compressor blades: prediction on of the effects of surface curvature and rotation // Trans. ASME. Ser. B.— 1976.— V. 98, N 3. Рус. пер. // Тр. Америк. о-ва инж.-мех. Теор. основы инж. расчетов.— 1976.— № 3.

Поступила 27/1 1986 г.

УДК 532.517.4 + 536.242

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И МАССООБМЕНА В ОБЪЕМЕ ОДНОРОДНОЙ ЖИДКОСТИ С ИСКУССТВЕННО СОЗДАВАЕМОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТЬЮ

В. Д. Жак, М. С. Искаков, О. Н. Кашинский, В. Е. Накоряков

(Новосибирск)

Массообмен между твердыми частицами и жидкостью лежит в основе многих процессов химической технологии. Интенсификация массообмена возможна за счет создания организованного среднего движения жидкости либо за счет ее интенсивной турбулизации. Повышение уровня турбулентности — эффективное средство увеличения коэффициентов массоотдач. Задача обтекания частицы сильно турбулизированным потоком чрезвычайно сложна, и в настоящее время в литературе имеется весьма ограниченная информация о механизме турбулентного переноса и общем влиянии турбулентности на процессы переноса.

Один из наиболее просто реализуемых способов создания высокой интенсивности турбулентности — возбуждение жидкости в сосуде с помощью осциллирующей решетки. Исследованию гидродинамики такого течения посвящен ряд работ, в которых частота колебаний осциллирующей решетки изменялась в пределах $f=1-6$ Гц. В [1] показано, что после приведения решетки в движение в измерительном объеме, находящемся на некотором расстоянии от осциллирующей решетки, среднеквадратичные пульсации скорости жидкости вначале резко возрастают, затем медленно уменьша-

ются до стационарного значения. Безразмерное время установления стационарного режима

$$(1) \quad \tau = ft \approx 5000.$$

Измерения [2, 3], проведенные в стационарных условиях, для такого же диапазона частот показали, что величина среднеквадратичной скорости пульсаций u зависит от расстояния до осциллирующей решетки z , частоты и амплитуды S колебаний решетки. Однако при увеличении частоты осциллирующей решетки до 10 Гц эта зависимость нарушается и величина u становится постоянной [4]. Поэтому определенный интерес представляет изучение поведения u при дальнейшем увеличении частоты колебаний решетки.

На основании опытных данных [3, 5] можно сделать вывод об изотропности турбулизованной жидкости уже на расстоянии 50–60 мм от осциллирующей решетки. Отметим, что исследование закономерностей массообмена между твердой сферической частицей и турбулизованной жидкостью при указанном способе турбулизации жидкости ранее не проводилось. Наиболее часто для массообменных процессов используются установки с мешалками [6], иногда для турбулизации потока применяются сетки и пористые пластины [7], помещенные в каналах с протекающей жидкостью.

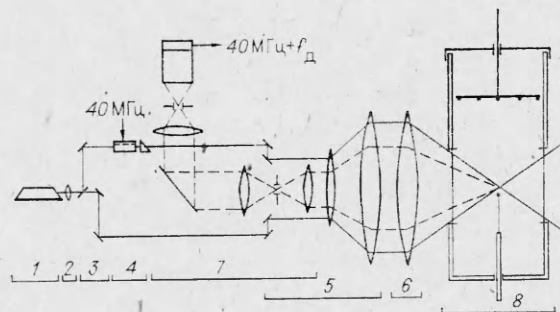
Экспериментальная установка, методика измерения. Экспериментальная установка 8 (рис. 1) представляет собой оргстеклянный сосуд размерами $230 \times 230 \times 500$ мм, заполненный рабочей жидкостью (электролитом) до фиксированной отметки 430 мм. В верхней части сосуда на расстоянии 70 мм от поверхности жидкости расположена решетка, изготовленная из никелевых трубок диаметром 3,6 мм, с размерами ячейки 35×45 мм. Более подробно экспериментальная установка описана в [8]. Турбулентные пульсации в жидкости создавались с помощью синусоидальных колебаний решетки, частота и амплитуда которой изменялись в пределах $f = 6-20$ Гц, $S = 1,5-11$ мм. Под амплитудой понимается расстояние между двумя крайними положениями осциллирующей решетки. Измерение интенсивности массообмена производилось электрохимическим методом с использованием сферического датчика [9] диаметром 0,55 мм. Коэффициент массоотдачи β определяется по формуле

$$(2) \quad \beta = I/(FAc),$$

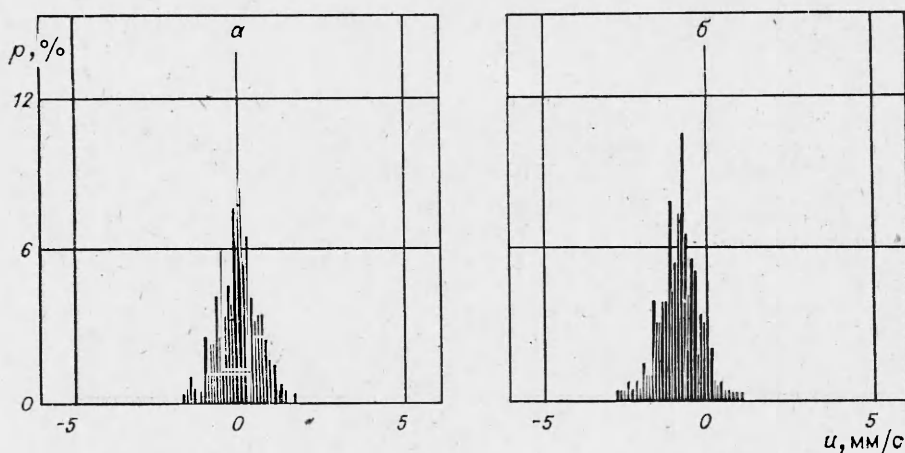
где I — величина диффузионного тока; F — константа Фарадея; A — площадь датчика — сферы; c — концентрация ионов феррицианида калия.

Среднеквадратичные пульсации горизонтальной составляющей скорости u измерялись лазерно-доплеровским измерителем скорости (ЛДИС), собранным по дифференциальной схеме с обратным рассеянием (рис. 1). Мощность аргонового лазера I варьировалась в опытах от 70 до 130 мВт. Акустооптическая сдвиговая ячейка 4, установленная в одном плече светоделителя 3, сдвигала один из лучей по частоте на 40 МГц, что позволило определить направление скорости и работать при больших углах между вектором скорости и его горизонтальной составляющей. Коллиматор 2 применялся для компенсации расходимости лазерного луча и его фокусировки в измерительном объеме. Модуль приемной оптики 7 с полевыми диафрагмами, осуществляющими пространственную фильтрацию рассеянного излучения, устанавливался между сдвиговой ячейкой и расширителем лучей 5. В фокальной плоскости фокусирующей линзы 6 формировался измерительный объем диаметром 35 мкм и длиной 8 мм при угле пересечения лучей $\alpha \approx 3,2^\circ$. В качестве рассеивающих частиц использовалась естественная замутненность рабочей жидкости — электролита.

Доплеровский сигнал с выхода фотоумножителя обрабатывался одновременно электроникой следящего и счетного типа. Аналоговый сигнал со следящего демодулятора — спектроанализатора [10],



Р и с. 1



Р и с. 2

разработанного в ИТФ СО АН СССР, записывался на магнитофон «Шлюмбурже» в режиме частотной модуляции при длине реализации 100 с и обрабатывался на ЭВМ типа «Электроника-60». При счетном методе обработки доплеровский сигнал с выхода фотоумножителя ($40 \text{ МГц} + f_d$) поступал на смеситель, преобразовывался в промежуточную частоту 20—50 кГц и поступал на счетную электронику фирмы TSI модели 1980, где осуществлялась фильтрация сигнала в полосе 1—100 кГц и его обработка по 8 или 16 циклам. С выхода счетной электроники сигнал вводился в ЭВМ типа Apple II. На ЭВМ проводился сбор 256 или 512 доплеровских сигналов, отбираемых подряд в течение ~ 100 с, вычислялись среднеквадратичные пульсации и строились гистограммы процесса (рис. 2).

Методика работы такова. Приводилась в движение осциллирующая решетка, и измерения начинались в стационарном режиме, время установления которого вычислялось по формуле (1) и контролировалось по постоянству величины диффузионного тока датчика. Измерение интенсивности массообмена между твердой сферической частицей и турбулизованной жидкостью, а также среднеквадратичных пульсаций горизонтальной компоненты скорости u производилось одновременно на расстоянии 200 мм от осциллирующей решетки в центре сосуда. Электрохимический датчик массоотдачи и измерительный объем ЛДИС находились на расстоянии 3 мм друг от друга, что позволило предположить соответствие получаемого коэффициента массоотдачи β значению среднеквадратичной скорости пульсаций жидкости. В каждом режиме записывалось в среднем не менее 10 реализаций по 100 с каждая как для интенсивности массообмена, так и при получении среднеквадратичной пульсации скорости жидкости. Затем вычислялось среднее. Таким образом, минимальное общее время осреднения 15 мин.

Минимальное общее время осреднения выбиралось из следующих соображений. В экспериментах с длительностью измерения 3000—4000 с производилось промежуточное осреднение измеряемых величин по каждому 1000 с, и полученные значения по окончании эксперимента сравнивались со средней величиной, вычисленной за полное время измерения. Оказалось, что для первого и второго уровней отклонение промежуточных средних значений от полного среднего $\pm 5\%$, а для третьего уровня $\pm 3\%$. С такой погрешностью можно считать, что длительность интервала осреднения в 1000 с достаточна.

После этого действие турбулизатора прекращалось и жидкость успокаивалась. Время успокоения при максимальных мощностях перемешивания достигало 1,5 ч. Процесс контролировался по величине диффузионного тока I . Затем изменяли частоту либо амплитуду колебаний решетки, и решетка снова приводилась в действие.

№ п/п	I, мкА		u, мм/с		U, мм/с	
	*	**	*	**	*	**
1	10,7	7,0	3,45	0,73	1,88	1,01
2	9,4	6,2	2,91	1,02	-1,7	-1,25
3	9,25	6,3	3,04	0,61	-1,14	-0,16
4	9,35	6,2	3,25	0,92	5,25	1,3
5	10,3	6,95	2,19	1,11	0,51	-0,3
6	9,1	6,35	6,28	0,81	3,35	1,24
7	10,55	6,4	2,71	0,99	-3,5	-0,08
8	9,3	6,85	3,89	1,1	2,4	-1,67
9		7,2	2,19		2,79	
10		6,75	5,55		1,4	
11			4,38		-1,52	

Средние значения

| 9,74 | 6,62 | 3,83 | 0,93 | 0,88 | 0,09

* — $f = 15$ Гц, $S = 9,5$ мм;
 ** — $f = 10$ Гц, $S = 10,5$ мм.

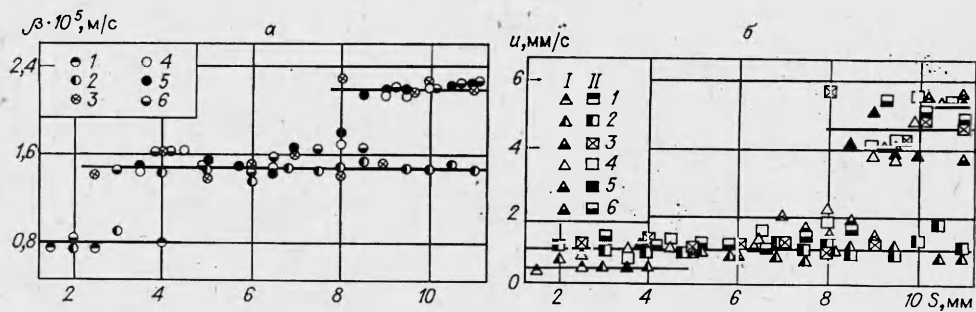
Обсуждение результатов. Анализ гистограмм процесса, получаемых при обработке, позволяет сделать некоторые выводы о структуре перемешиваемой жидкости. Так, на рис. 2, а изображена гистограмма для режима с частотой $f = 8$ Гц и амплитудой $S = 3$ мм. Видно, что наибольшую вероятность имеют скорости, близкие к нулевой, и такая картина характерна для небольших интенсивностей перемешивания жидкости, т. е. при малых значениях f из исследованного диапазона частот осциллирующей решетки. По-видимому, происходит распространение возмущений от решетки при отсутствии так называемых вторичных течений. Визуализация потока [4], проведенная при небольших интенсивностях перемешивания, подтверждает этот факт. В таких условиях величина среднеквадратичных пульсаций горизонтальной составляющей скорости жидкости определяется, например, по формуле [2]

$$(3) \quad u = 1,4fS^{2,5}z^{-1,5}.$$

При увеличении мощности, затрачиваемой на перемешивание жидкости (либо с возрастанием частоты осциллирующей решетки), на расстояниях $z > 100$ мм появляются средние циркуляционные течения, сравнимые по величине с размерами сосуда. Появление таких течений, имеющих вихревую структуру, приводит к нарушению зависимости типа (3), что выражается в появлении на графике участка, на котором значения среднеквадратичных пульсаций скорости не зависят от мощности, затрачиваемой на перемешивание всего объема жидкости. В [4], где впервые обнаружено такое явление, величина u оставалась постоянной с возрастанием частоты осциллирующей решетки от 6 до 10 Гц при фиксированной амплитуде и наличие крупномасштабных вихревых образований выявлено при помощи визуализации.

На рис. 2, б представлена гистограмма для режима с параметрами $f = 10$ Гц и $S = 10,5$ мм; мощность, затрачиваемая на перемешивание жидкости, гораздо выше, чем на рис. 2, а. Результаты измерений для этого случая приведены в таблице (строка 3). Для сравнительно небольшого промежутка времени (~ 100 с), в течение которого производилось измерение скорости, имеет место ненулевое среднее значение скорости, что также может свидетельствовать о наличии крупномасштабных вихревых образований (наряду с визуализацией потока в [4]).

Из таблицы видно, что значение средней скорости U часто меняет знак. Это, по-видимому, говорит о медленном перемещении вихревых образований в перемешиваемой жидкости, за исключением области, непосредственно примыкающей к осциллирующей решетке и занимающей приблизительно треть всего объема. Что же касается визуализации [2—4], то она производилась путем фотографирования с малыми временами



Р и с. 3

экспонирования, поэтому на основании таких данных трудно судить о медленном перемещении вихревых образований в пространстве. Это можно обнаружить лишь по наблюдениям за большие промежутки времени.

На рис. 3, а, б приведены данные эксперимента по одновременному измерению интенсивности массообмена между твердой сферической частицей и турбулизованной жидкостью и величины среднеквадратичных пульсаций u горизонтальной компоненты скорости жидкости. Точками 1—6 показаны режимы, для которых частота колебаний решетки имела значения 8, 10, 13, 15, 16 и 17 Гц соответственно. Коэффициент массоотдачи вычислялся по формуле (2). Калибровка датчика, проводимая всякий раз перед опытом и после, показала, что за время эксперимента физические свойства рабочей жидкости не меняются и концентрация ионов феррицианида калия остается постоянной.

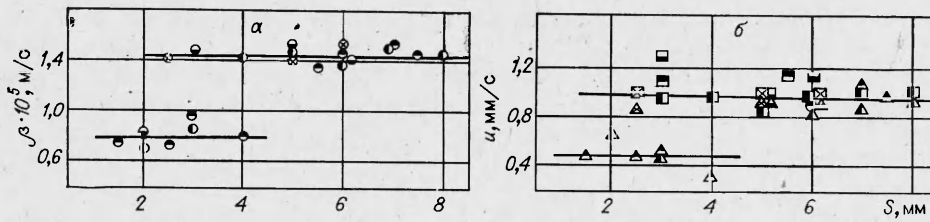
Имеются три явно выраженных уровня интенсивности массообмена, каждый из которых не зависит от мощности, затрачиваемой на перемешивание жидкости. Например, в режимах с $f = 13$ Гц экспериментальная точка с $S = 2,5$ мм находится на втором уровне. Дальнейшее увеличение амплитуды колебаний решетки с шагом 1 мм (следовательно, и мощности, с которой перемешивается жидкость) до 9 мм не вызывает изменения интенсивности массообмена между твердой сферической частицей и жидкостью, она остается постоянной. При следующем значении амплитуды, равном 9,5 мм, интенсивность массообмена меняется скачком и коэффициент массоотдачи соответствует третьему уровню. Дальнейшее возрастание амплитуды до 11,0 мм также не вызывает увеличения интенсивности массообмена.

Затем режим с параметрами $f = 17$ Гц и $S = 8$ мм повторялся, но коэффициент β соответствовал третьему уровню. Это может быть своеобразным гистерезисом, но специальных исследований для выяснения детальной картины перехода с более высокого уровня на низкий не проводилось, хотя аналогичный факт зафиксирован и в других режимах. Подобная картина имеет место, например, при переходе к турбулентному течению в круглой трубе и при обратном переходе с уменьшением числа Рейнольдса.

Данные, полученные для режимов с $f = 17$ Гц, отличаются тем, что при изменении амплитуды от 2 до 11 мм последовательно получены все три уровня интенсивности массообмена.

Отметим, что первый уровень интенсивности массообмена в исследованном диапазоне изменения определяющих параметров f и S реализовывался крайне редко, только при малых значениях частоты и амплитуды. Как правило, датчик фиксировал наличие второго уровня интенсивности массообмена, и при достижении некоторого критического значения амплитуды происходило резкое изменение коэффициента с переходом на третий уровень.

Величина u ведет себя аналогичным образом, т. е. также обнаружено три уровня среднеквадратичных пульсаций скорости жидкости, причем имеется соответствие изменения u и β , что выражается в совпадении



Р и с. 4

интервалов, на которых эти величины не зависят от изменения определяющих параметров. Переход значений среднеквадратичных пульсаций скорости жидкости и интенсивности массообмена на другой уровень происходит одновременно.

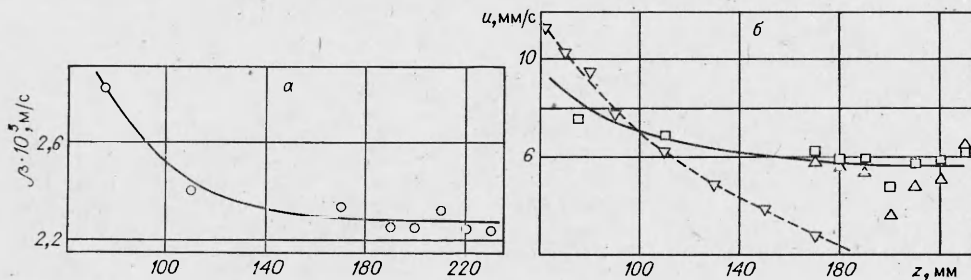
На рис. 3, б приведены два типа точек: I — получены с помощью ЛДИС со счетной электроникой, II — со следящим фильтром-анализатором.

Видно, что оба способа обработки лазерно-доплеровского сигнала дают удовлетворительное совпадение, причем для первого и второго уровней разброс экспериментальных данных минимальный. Он увеличивается для третьего уровня, что обусловлено особенностями гидродинамики жидкости при больших мощностях перемешивания, видимо, в этих режимах велика интенсивность вторичных течений. На основе анализа графика можно утверждать, что результаты, полученные одним из методов, не имеют систематического отклонения от данных, полученных другим способом обработки сигнала. Первый уровень среднеквадратичных пульсаций скорости удалось получить лишь с помощью счетной электроники. Наличие гистерезиса при переходе между уровнями зафиксировано и для u .

На рис. 4 представлены значения u и β для малых интенсивностей перемешивания. Можно явно выделить расслоение этих величин на два уровня. Обозначения те же, что и на рис. 3.

Таким образом, интенсивность массообмена между твердой сферической частицей и турбулизованной жидкостью зависит от величины среднеквадратичных пульсаций скорости жидкости. Этот вывод можно сделать на основе имеющейся корреляции между коэффициентом массоотдачи и среднеквадратичной скоростью пульсаций. Другая важная гидродинамическая характеристика — значение осредненной скорости потока, по всей видимости, для такого случая не может определять процессы переноса, поскольку она меняет знак и диапазон изменения ее абсолютной величины намного превышает соответствующий диапазон для коэффициента массообмена β (см. таблицу).

На рис. 5 представлены экспериментальные результаты по измерению интенсивности массообмена и u на разных расстояниях от нижнего края осциллирующей решетки. Весь объем можно условно поделить на две области по характеру изменения измеряемых величин. Первая — объем жидкости, непосредственно примыкающей к осциллирующей ре-



Р и с. 5

сетке и занимающей приблизительно треть всего объема. В ней происходит значительное изменение измеряемых величин. Вторая область занимает оставшуюся часть перемешиваемого объема жидкости и характеризуется практически постоянными интенсивностью массообмена и значением среднеквадратичных пульсаций скорости жидкости. Опытные данные, полученные в этой области, приведены на рис. 3 и 4.

Сравнение (рис. 5, б) с имеющимися экспериментальными результатами [2], полученными при $f = 2-5$ Гц, $S = 10-14$ мм, показывает, что в отсутствие средних циркуляционных течений закономерность изменения величины среднеквадратичных пульсаций скорости с увеличением расстояния от осциллирующей решетки отлична от полученной в настоящей работе. В этом случае во всем объеме турбулизованной жидкости происходит резкое уменьшение u до своего минимального значения около свободной поверхности (в эксперименте [2] реализована схема с осциллирующей решеткой, расположенной вблизи дна сосуда).

В заключение авторы выражают благодарность В. И. Титкову за помощь в проведении опытов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воропаев С. И., Гаврилин Б. Л. и др. Лабораторное исследование углубления перемешиваемого слоя в однородной жидкости // Изв. АН СССР. ФАО.— 1980.— № 2.
2. Thompson S. M., Turner J. S. Mixing across an interface due to turbulence generated by an oscillating grid // J. Fluid Mech.— 1975.— V. 67, pt 2.
3. Hopfinger E. J., Toly M.-A. Spatially decaying turbulence and its relation to mixing across density interface // J. Fluid Mech.— 1976.— V. 78, pt 1.
4. McDougall T. J. Measurements of turbulence in a zero-mean-shear mixed layer // J. Fluid Mech.— 1979.— V. 94.
5. Hopfinger E. J., Linden P. F. Formation of thermoclines in zero-mean-shear turbulence subjected to a stabilizing buoyancy flux // J. Fluid Mech.— 1982.— V. 114.
6. Николаишвили Е. К., Барабаш В. М. и др. Растворение твердых частиц при перемешивании в аппаратах без отражательных перегородок // ТОХТ.— 1980.— Т. 14, № 4.
7. Sandoval-Robles J. S., Delmas H., Couderc J. P. Influence of turbulence on mass transfer between a liquid and a solid sphere // AIChE J.— 1981.— V. 27, N 5.
8. Искаков М. С., Капинский О. Н., Накоряков В. Е. Исследование пульсационных характеристик процесса массообмена между твердой сферической частицей и турбулизованной жидкостью // ПМТФ.— 1986.— № 6.
9. Kutateladze S. S., Nakoryakov V. E., Iskakov M. S. Electrochemical measurements of mass transfer between a sphere and liquid in motion at high Péclet numbers // J. Fluid Mech.— 1982.— V. 125.
10. Титков В. И., Томсонс Я. Я., Данилов Н. С. Лазерный доплеровский измеритель скорости (ЛДИС) // Экспериментальные методы и аппаратура для исследования турбулентности: Тр. III Всесоюз. совещ.— Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1980.

Поступила 20/1 1986 г.

УДК 551.466.81

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛЯ ВНУТРЕННИХ ВОЛН, ГЕНЕРИРУЕМЫХ ЛОКАЛЬНЫМ ИСТОЧНИКОМ ВОЗМУЩЕНИЙ В ПОТОКЕ ДВУХСЛОЙНОЙ ЖИДКОСТИ

В. Е. Веденьков, В. Ф. Санников

(Севастополь)

В [1] описан способ расчета точного (в линейной постановке) решения задачи об установившихся пространственных волнах, генерируемых локальным источником возмущений в стратифицированном потоке. Примеры вычислений выполнены для жидкости с постоянной частотой Вэйсяля — Брента с использованием приближения Буссинеска и условия «твердой крышки» на верхней границе жидкости. Проведенное в [1] исследование показало, что отличие точного решения задачи от известных приближенных [2, 3] существенно в окрестностях передних фронтов отдельных мод в случае, когда скорость потока превышает скорости распространения волн соответствующих мод. Построенные в [4] асимптотики согласуются с результатами [1]. В этой ра-