

$v_{\text{ср}}$. Эти данные представлены на фиг. 6 участками горизонтальных линий 1, длина которых равна L . На фиг. 6 нанесены также значения $v_{\text{ср}}$ (точки), полученные методом визуальной обработки, и результаты измерения скорости 2 лазер-доплеровским методом с прямым спектральным анализом [13]. Следует отметить удовлетворительное согласие данных, полученных двумя методами обработки многоэкспозиционных фотографий (различие не превышает 4%). Совпадение этих результатов с данными ЛДИС подтверждает достоверность полученной информации и свидетельствует о перспективности использования метода многоэкспозиционной фотоскоростной регистрации для исследования высокоскоростных двухфазных течений.

Поступила 30 III 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. Папырин А. Н., Солоухин Р. И. Развитие методов лазер-доплеровских измерений скорости с прямым спектральным анализом.— В кн.: Методы лазерной диагностики однофазных и многофазных течений. Материалы междунар. школы-семинара. Минск: изд. ИТМО АН БССР, 1978.
2. Соу С. Гидродинамика многофазных систем. М.: Мир, 1974.
3. Кутателадзе С. С., Миронов Б. П., Накоряков В. Е., Хабахпашева Е. М. Экспериментальное исследование пристенных турбулентных течений. Новосибирск: Наука, 1975.
4. Бакуров А. О., Ертанова О. Н. и др. Голографический метод определения поля скоростей дисперсионной фазы двухфазного потока.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1980, т. 1, № 1.
5. Iwata K., Nakoshima T., Nagata R. Measurement of flow velocity distribution by means of double exposure holographic interferometry.— J. Opt. Soc. Amer., 1977, vol. 67, N 8.
6. Ewan V. C. R. Holographic particle velocity measurement in the Fraunhofer plane.— Appl. Opt., 1979, vol. 18, N 5.
7. Алхимов А. П., Папырин А. Н., Предеин А. Л. Особенности применения оптических методов визуализации для исследования высокоскоростных двухфазных потоков.— В кн.: Методы лазерной диагностики однофазных и многофазных течений. Минск: изд. ИТМО БССР, 1978.
8. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику. М.: Мир, 1970.
9. Франсон. Оптика спеклов. М.: Мир, 1980.
10. Necht G. I., Steel G. V., Oppenheim A. K. High-speed stroboscopic photography using a Kerr cell modulated laser source.— ISA Transactions, 1966, vol. 5, N 2.
11. Кузовкова Т. А., Нилов Е. В. и др. Исследование импульсного ОКГ на неодимовом стекле в режиме периодической модуляции добротности.— ЖТФ, 1974, т. 44, № 4.
12. Бойко В. М., Клишкин В. Ф. Лазерный источник света с периодической модуляцией добротности электрооптическим затвором Керра.— В кн.: Оптические методы исследования газовых потоков. Материалы II Всесоюз. конф. по методам аэрофизических исследований. Минск, 1979.
13. Яценко П. Н., Солоухин Р. И., Папырин А. П., Фомин В. М. Сверхзвуковые двухфазные течения в условиях скоростной неравности частиц. Новосибирск: Наука, 1980.

УДК 532.529.6 : 541.12

КОНВЕКТИВНЫЙ ПЕРЕНОС МАССЫ МЕЖДУ ТВЕРДОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ЧАСТИЦЕЙ И ЖИДКОСТЬЮ ПРИ БОЛЬШИХ ЧИСЛАХ ПЕКЛЕ

М. С. Исаков, В. Е. Накоряков

(Новосибирск)

Введение. Массообмен между твердой частицей и жидкостью является основным производительным фактором во многих отраслях химической технологии и микробиологии. Этот процесс сложен и зависит от многих факторов: радиальной диффузии, вынужденной конвекции, свободной конвекции, формы частицы, физических свойств жидкости и частицы и т. д. В реальных условиях эти факторы действуют одновременно, и, как правило, многие исследователи ограничивались изучением массообмена в

условиях однородного набегающего потока, где наибольший вклад в перенос массы принадлежит вынужденной конвекции. Это объясняется относительной простотой исследования такого рода процессов как теоретически, так и экспериментально.

Все экспериментальные методики, используемые при исследовании массообмена в системах жидкость — твердое тело, можно разделить на две большие группы, в которых используются: растворение твердых тел в потоках жидкости; химические превращения, происходящие на поверхности металлических электродов под воздействием электрического тока. Достоинствами первой группы являются простота методики проведения эксперимента, возможность формирования нужной гидродинамической картины с большой степенью точности, наличие широкого класса веществ, пригодных для такого эксперимента, что позволяет варьировать физическими свойствами жидкости и тел в широких диапазонах. Основным недостатком состоит в том, что отсутствует фиксированная поверхность раздела фаз, вследствие чего гидродинамика обтекания частицы постоянно меняется. Электрохимические методы свободны от такого недостатка, поскольку процессы, происходящие на электродах, протекают во взаимнообратных направлениях и поверхность датчика всегда чистая, но существует техническая проблема закрепления датчика и уменьшения влияния подводящих контактов.

Известен ряд работ, посвященных исследованию интенсивности массообмена в однородных потоках. В [1] отмечено хорошее совпадение результатов, полученных электрохимическим методом, с данными других авторов при $Re = 400-12500$. Опытные данные, опубликованные в [2], охватывают гораздо более широкий диапазон чисел $Re = 2-23000$. Аппроксимационная кривая, обобщающая данные при $2 < Re < 20$,

$$Nu = 1,032 Re^{0,385} Pr^{1/3}$$

хорошо согласуется с теоретическими зависимостями, полученными в [3, 4]. Но, к сожалению, имеется очень мало экспериментальных работ, выполненных в диапазоне чисел $Re < 1$, так как только здесь можно провести сравнение с существующими теоретическими зависимостями. В работе [5] данные представлены для диапазона чисел $0 < Re < 2,5$ и хорошо описываются аппроксимационной кривой в виде

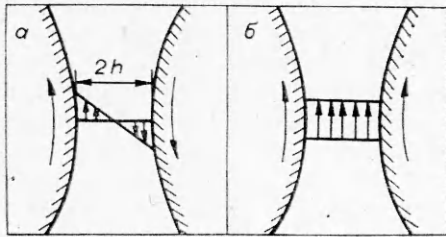
$$Nu = 1,10 Re^{1/3} Pr^{1/3}.$$

В [3] в приближении пограничного слоя получено выражение для интенсивности массообмена сферы с жидкостью в условиях однородного набегающего потока жидкости при $Re \ll 1$, $Pe \gg 1$:

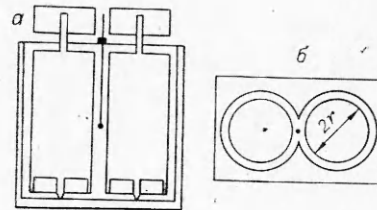
$$(1) \quad Nu = 1,075 Pe^{1/3}.$$

Там же проведено экспериментальное подтверждение этого соотношения путем растворения шара из прессованной бензойной кислоты в растительном масле ($Re = 0,1-2,5$). Величина коэффициента из эксперимента получилась равной 1,4, что близко к теоретическому 1,075.

Однако гораздо больший интерес представляет изучение массообмена в системе жидкость — твердое тело при наличии поперечного градиента скорости. Начало этому положено в работе [6], где рассматривалась диффузия массы от мгновенного точечного источника в горизонтальном потоке, скорость которого меняется по вертикали линейно. В ней получено выражение для распределения концентрации в окрестности источника. Дальнейшим шагом было решение задачи [7] о переносе тепла и массы от сферы и цилиндра, находящихся во взвешенном состоянии в потоке с градиентом скорости (со сдвигом). Причем в случае $Pe_* \ll 1$ решение получено как для цилиндра, так и для сферы, для $Pe_* \gg 1$ — только для цилиндра. Трудности, возникающие при решении задачи для сферы, объясняются трехмерностью картины обтекания. В [8] результаты, полученные ранее для цилиндра, подтверждены экспериментально. Взвешенное состояние моделировалось тем, что цилиндр помещался на нулевой линии тока между двумя стенками, двигающимися в противоположных направлениях. В [9] решена задача о массообмене между жидкостью и сферой, свободно вращающейся с угловой скоростью, равной ротору скорости жидкости, и получено соотношение $Nu = 9,0$. Решение имеет такой вид, поскольку в этом случае вокруг сферы образуется область с замкнутыми линиями тока, через которую перенос массы осуществляется



Ф и г. 1



Ф и г. 2

посредством диффузии. Наконец, в [10] получено решение задачи о диффузии к стационарной сфере в сдвиговом потоке вязкой жидкости при $Re_* \gg 1$. В наиболее полной постановке эта задача решена в [11]. Уравнение конвективной диффузии

$$\mathbf{v} \cdot \nabla c = D \nabla^2 c$$

с граничными условиями $c = c_0$ на поверхности, $c = c_\infty$ вдали от сферы, где скорость \mathbf{v} меняется с расстоянием линейно, было решено для двух предельных случаев. Для $Re_* \ll 1$ получено выражение вида

$$Nu = \alpha Nu_0^2 Pe_*^{1/2},$$

где Nu_0 — число Нуссельта при $Re_* = 0$ ($Re_* = \varepsilon d^2/D$, ε — величина градиента скорости). При $Re_* \gg 1$ выражение для интенсивности массообмена имеет вид

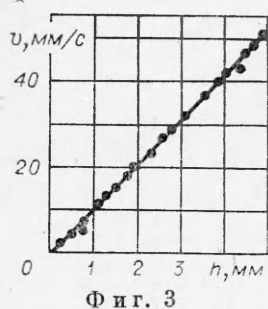
$$(2) \quad Nu = \beta Pe_*^{1/3},$$

где $\beta = 1,134$ для любого типа линейного поля скорости.

Пока известна единственная попытка экспериментальной проверки полученных зависимостей. В [12] исследован процесс теплообмена между твердой сферической частицей и жидкостью в условиях двумерного чисто деформационного течения, которое моделировалось вращением четырех круговых цилиндров. Сферический датчик представлял собой еще и нагреватель, тепло от которого распространялось по всему объему жидкости. Он устанавливался в центре рабочего объема. Данные при $Re = 0,33$ — $24,0$ качественно совпадают с теоретической зависимостью Бэтчелора для $Re_* \ll 1$, количественно же имеется некоторое расхождение.

Как видно из обзора, количество экспериментальных работ, посвященных рассматриваемому вопросу, не очень велико. Поэтому трудно судить о справедливости той или иной теории, необходима тщательная и многократная проверка имеющихся теоретических зависимостей.

Экспериментальная установка. Главная трудность при подготовке эксперимента заключалась в выборе способа получения соответствующих гидродинамических условий, на реализацию которого потребовались бы небольшие затраты и конструкция которого не была бы сложной. В результате была реализована идея о моделировании плоского течения Куэтта, когда стенки двигаются в противоположных направлениях, с помощью цилиндров достаточно большого по сравнению с исследуемым объектом размера. Если большие цилиндры расположить рядом в плоскости, проходящей через их оси вращения, и вращать их в одинаковом направлении, то получится картина, изображенная на фиг. 1, а, т. е. течение типа плоского течения Куэтта с линейным профилем скорости v . При вращении цилиндров в противоположных направлениях между ними формируется однородный профиль скорости, представленный на фиг. 1, б. Естественно, что это справедливо лишь в некоторой области, величину которой можно увеличить увеличением диаметра вращающихся цилиндров. Размеры такой области имеют в нашем случае порядок размера промежутка между цилиндрами и гораздо больше размера исследуемого объекта — сферы.



Фиг. 3

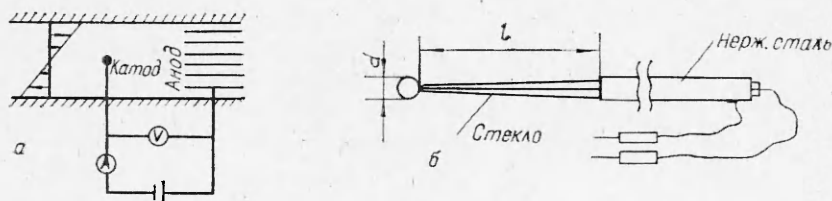
Практически это воплотилось в экспериментальную установку, схема которой представлена на фиг. 2, где *a* — вид сбоку, *b* — вид сверху. Вся экспериментальная установка выполнена из органического стекла, что обеспечивает прозрачность и устойчивость по отношению к активным средам, каковой является рабочая жидкость. Цилиндры имеют высоту $2 \cdot 10^{-1}$ м, диаметр $2r = 10^{-1}$ м, минимальное расстояние между ними $2h = 10^{-2}$ м. Период вращения цилиндров регистрировался с помощью фотодиодов и изменялся в диапазоне $T = 8,0 - 130,0$ с. Погрешность измерения составляла 2—3% при самых больших значениях *T*. Во избежание влияния свободной конвекции из-за градиента температур рабочий участок был полностью погружен в кожух с жидкостью, где поддерживалась температура 20°C с точностью 0,1°C при помощи термостата. Чтобы избежать возмущающего влияния дна, было сделано следующее: в нижней части цилиндров сделаны полости, которые при наполнении рабочего объема жидкостью оставались заполненными воздухом. Таким образом, создавался эффект, как будто и снизу имеется свободная поверхность и источником возмущений является только острая кромка, а не вся нижняя часть цилиндров.

Важным моментом является возможность получения необходимой гидродинамической обстановки между вращающимися цилиндрами. С этой целью при помощи метода стробоскопической визуализации получены профили скорости жидкости, один из которых изображен на фиг. 3. Для получения каждого профиля скорости потребовалось приблизительно 200 точек, причем точки брались из области, представляющей собой квадрат со сторонами, равными 10^{-2} м. Поскольку измеренные значения скорости из обеих частей профиля изображены на одном графике, картина течения между цилиндрами симметрична и нулевая линия тока для любого плоского сечения находится в центре промежутка. Добавим, что средняя относительная погрешность измерения скорости таким способом в данном эксперименте равнялась 3%. Однако при определенных периодах вращения цилиндров в системе образовывались вихри Тейлора, механизм переноса массы резко менялся, вызывая скачкообразное увеличение интенсивности массообмена. Поэтому в таких режимах измерения не проводились.

В случае, когда цилиндры вращаются в противоположных направлениях, по линии, соединяющей их оси вращения, был промерен профиль интенсивности массообмена. Для каждого фиксированного значения *T* значение *Nu* с точностью около 5% было постоянным. Из этого следует, что между цилиндрами реализуется однородное течение жидкости.

Следует обязательно отметить тот факт, что линии тока вокруг цилиндров являются приблизительно круговыми, поэтому необходимые условия выполняются лишь в ограниченной области. Но отношение размеров цилиндра и исследуемой твердой сферической частицы очень велико; в зависимости от размеров датчика-сферы оно менялось в диапазоне 100—200. Тогда в некоторой окрестности сферы линии тока можно считать прямыми. Как показал эксперимент, это предположение полностью оправдалось.

Методика эксперимента. Измерение интенсивности массообмена между сферической частицей и жидкостью осуществлялось электрохимическим методом [13]. Суть ее состоит в измерении скорости окислительно-восстановительной реакции, протекающей на электроде в диффузионном режиме. Исследование процессов массообмена электрохимическим методом очень удобно, поскольку вид реакции таков, что поверхность датчика всегда чистая. Кроме того, исследуемый объект сам является датчиком, что существенно упрощает конструкцию измерительной части установки.



Ф и г. 4

Электрохимическая ячейка, использованная в опыте, изображена схематично на фиг. 4, а. Сферический датчик располагался в центре промежутка между цилиндрами, т. е. на нулевой линии тока. Положение центра определялось по минимуму интенсивности массообмена перемещением датчика по линии, соединяющей центры цилиндров. Электрохимический датчик имеет вид, приведенный на фиг. 4, б, и выполнен по следующей технологии: платиновая проволока диаметром $1,5 \cdot 10^{-4}$ м оплаивалась с конца при помощи газовой горелки до тех пор, пока не получалась сфера требуемого размера и нужной формы. Затем проволока, которая в данном случае служит подводным контактом, покрывалась химически стойким стеклом толщиной порядка нескольких десятков микрон и постепенно утолщалась, а на расстоянии $2 \cdot 10^{-2}$ м достигала диаметра $1,5 \cdot 10^{-3}$ м. Далее датчик вклеивался в трубку из нержавеющей стали диаметром $2,5 \cdot 10^{-3}$ м, при этом подводный контакт тщательно изолировался. Отметим, что металлическая трубка в этом случае служит анодом, отношение площадей анода и катода изменялось в зависимости от размера датчика в диапазоне 100—500.

Интенсивность массообмена в эксперименте определялась по формуле

$$(3) \quad Nu = Id / (FSc_fD),$$

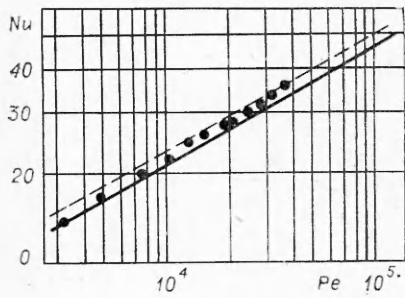
где I — величина диффузионного тока; d — диаметр сферического датчика; F — константа Фарадея; S — площадь сферы; c_f — концентрация реагирующих ионов; D — коэффициент диффузии реагирующих ионов. Измерение величины c_f проводилось методом потенциометрического титрования, и значение c_f определялось по формуле $c_f = V_k c_k / V$, где V — объем взятого для титрования раствора; V_k — объем прилитого до точки эквивалентности раствора кобальта концентрации c_k . Этот метод довольно точен, погрешность его не более 0,5%. Коэффициент вязкости раствора измерялся при помощи стандартного вискозиметра. Для определения значений коэффициента диффузии D использована формула

$$\mu D / t = 2,36 \cdot 10^{-15} \text{ кг} \cdot \text{м} / \text{с}^2 \cdot \text{К},$$

полученная в [14] для того же самого электролита. Погрешность этой формулы подсчитана в самой статье и не превышает 4%. Это соотношение использовано также для растворов с весовой концентрацией глицерина в электролите до 40%, соответственно диапазон чисел $Pr = \nu / D : 1700$ — $18\,400$. Измерение диаметра сферического датчика проводилось измерительным микроскопом с ценой деления шкалы 10^{-6} м, и разность между максимальным и минимальным значениями диаметров любого использованного датчика не превышала 10^{-5} м. В расчетах за истинное значение диаметра принималось среднее.

Чтобы убедиться в правильности полученных результатов для массообмена в потоках с градиентом скорости, обработку полученных результатов проводили двумя независимыми способами. В первом случае обработка проводилась по формуле (3), в другом — использовалась тарировочная кривая, полученная в однородном потоке. Справедливость теоретической формулы из [4]

$$(4) \quad Nu = 0,991 Re^{1/3}$$



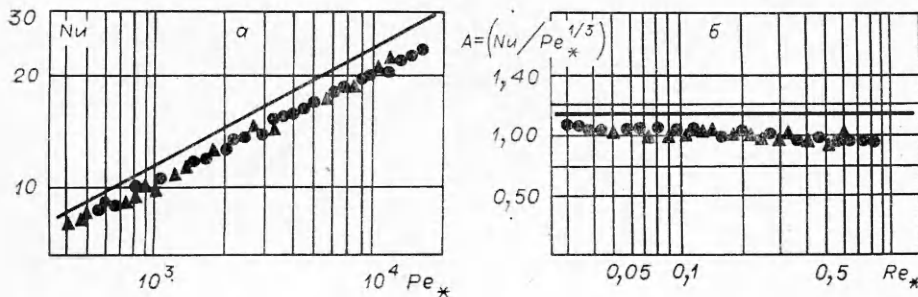
Ф и г. 5

не вызывает сомнений, так как она подтверждена экспериментально многократно, в том числе и в данной работе. Тогда для однородного потока были построены графические зависимости типа $Nu = f(I)$, затем в потоке с поперечным градиентом скорости по величине диффузионного тока определялась интенсивность массообмена, т. е. число Nu .

Обсуждение результатов. Данная работа посвящена экспериментальному изучению влияния поперечного градиента скорости на массообмен между стационарно закрепленной сферической частицей и жидкостью. Кроме того, проводились измерения интенсивности массообмена между сферой и жидкостью, которые носили вспомогательный характер, так как они дают возможность судить о правильности результатов для течений жидкости с градиентом скорости. Данные для однородного потока приведены на фиг. 5 и соответствуют $Re = 0,4 - 20$; тем не менее на графике очевидно хорошее согласие их с теоретическими зависимостями (1) и (4) (соответственно штриховая и сплошная линии). Видно, что экспериментальные данные лежат в промежутке между этими кривыми. Отсюда следует вывод, что при практических расчетах с погрешностью $\pm 4\%$ можно с одинаковым успехом пользоваться той и другой формулой. Здесь безразмерные комплексы выбраны следующим способом: $Pe = RePr$, $Re = vd/\nu$, где $v = 2\pi r/T$.

На фиг. 6, а приведены данные по измерению интенсивности массообмена между сферой и жидкостью в потоке с поперечным градиентом скорости. Простейший анализ на основе этого графика позволяет сделать следующий вывод: теоретическая зависимость (2), полученная Бэтчелором, и экспериментальные данные настоящей работы достаточно хорошо согласуются между собой. Следовательно, диапазон чисел Re_* , реализованный в опыте, удовлетворяет тем допущениям, которые были приняты в теории. Однако углы наклона у этих кривых в логарифмическом масштабе разные, что свидетельствует о влиянии Re_* .

Поскольку теория получена для «ползущего» режима обтекания частиц, то с уменьшением Re_* экспериментальная и теоретическая зависимости почти совпадают. Тенденция к сближению теоретической и экспериментальной кривых с уменьшением $Re_* = \varepsilon d^2/\nu$ (где $\varepsilon = v/h$ — величина градиента скорости) хорошо видна на фиг. 6, б. Для $Re_* < 0,1$ средняя величина отклонения коэффициента A от прямой, соответствующей $A = 1,134$, меньше 6—7%. К сожалению, расширить интервал за счет дальнейшего уменьшения Re_* не было возможности, так как содержание глицерина в электролите больше 40% приводит к неустойчивости раствора. С другой стороны, нельзя далее уменьшать размеры датчика, ибо подводящие провода имеют конечный размер и возмущающее влияние их при



Ф и г. 6

уменьшении сферы увеличивается. В использованных датчиках площадь контакта подводных проводов и сферического датчика не превышала 2% всей площади сферы. Для этого случая $Re_* = 0,03-1,0$.

Выше уже упоминалось о том, что для потоков с градиентом скорости обработка измеренных величин проводилась двумя независимыми способами, поэтому на фиг. 6 представлены два типа точек. Из графиков видно, что с большой степенью точности оба вида точек ложатся на одну кривую.

Таким образом, полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с теоретическими зависимостями для интенсивности массообмена от одиночной сферы к жидкости в однородном потоке и в течении типа простого сдвига, полученными в приближении пограничного слоя.

Авторы выражают искреннюю признательность Дж. Бэтчелору за плодотворные консультации и обсуждение данной проблемы.

Поступила 13 IV 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. Gibert H., Couderc J. P., Angelino H. Etude des transferts de matière entre une sphere et un liquide en convection forcée.— Chem. Eng. Sci., 1972, vol. 27, N 1.
2. Sandoval-Robles J. G., Riba J. P., Couderc J. P. Mass transfer around sphere.— Trans. I. Chem. E., 1980, vol. 58, N 2.
3. Аксельруд Г. А. Диффузия от поверхности шара.— ЖФХ, 1953, т. 27, вып. 10.
4. Acrivos A., Taylor T. D. Heat and mass transfer from single spheres in Stokes flow.— Phys. Fluids, 1962, vol. 5, N 4.
5. Linton W. H., Sherwood T. K. Mass transfer from solid shapes to water in streamline and turbulent flow.— Chem. Engng Progr., 1950, vol. 46, N 5.
6. Новиков В. Е. О турбулентной диффузии в потоке с поперечным градиентом скорости.— ПММ, 1958, т. 22, вып. 3.
7. Frankel N. A., Acrivos A. Heat and mass transfer from small spheres and cylinders freely suspended in shear flow.— Phys. Fluids, 1968, vol. 11, N 9.
8. Robertson C. R., Acrivos A. Low Reynolds number shear flow past rotating circular cylinder. Pt 2. Heat transfer.— J. Fluid Mech., 1970, vol. 40, N 4.
9. Acrivos A. Heat transfer at high Péclet number from a small sphere freely rotating in a simple shear flow field.— J. Fluid Mech., 1971, vol. 46, N 2.
10. Гупало Ю. П., Рязанцев Ю. С. Диффузия к частице в случае сдвигового течения вязкой жидкости. Приближение диффузионного пограничного слоя.— ПММ, 1972, т. 36, вып. 3.
11. Batchelor G. K. Mass transfer from a particle suspended in fluid with a steady linear ambient velocity distribution.— J. Fluid Mech., 1979, vol. 95, N 2.
12. Purcell E. M. The effect of fluid motion on the absorption of molecules by suspended particles.— J. Fluid Mech., 1978, vol. 84, N 3.
13. Болдарев А. М., Бурдуков А. И. и др. Изучение процессов тепломассопереноса при колебательном движении среды и тела с применением электрохимического метода.— ИФЖ, 1970, т. 19, № 1.
14. Gordon St. L., Newman J. S., Tobias Ch. W. The role of ionic migration in electrolytic mass transport; diffusivities of $[Fe(CN)_6]^{3-}$ and $[Fe(CN)_6]^{4-}$ in KOH and NaOH solutions.— Ber. Buns. Gesel. Phys. Chemie, 1966, Bd 70, N 4.

УДК 533.6.071.08.632.57

СМЕШЕНИЕ ИСПАРЯЮЩИХСЯ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ СО СНОСЯЩИМ ПОТОКОМ ГАЗА

В. И. Гаркуша, В. М. Кузнецов, Г. В. Набережная,
А. Л. Стасенко

(Москва)

В ряде задач аэрогазодинамики возникает необходимость введения мелкодисперсных частиц в газовый поток. Такие задачи связаны, например, с проектированием перспективных криогенных и высокоэнтальпийных аэродинамических труб [1, 2], визуализирующих устройств [3, 4], ускорителей макроскопических частиц для исследования эрозии поверхностей, создания активной среды газодинамических лазеров с использованием многофазного перемешивания [5, 6] и т. д. При этом могут быть выставлены определенные требования на распределение параметров в зоне смешения, напри-