

туры газового компонента в диапазоне расстояний $H = 10-20$ по данным [3] (высокотемпературная струя аргона, несущая примесь титана) может быть дву- и трехкратным (по сравнению с однофазной струей). Горение дисперсной примеси возможно благодаря интенсивной эжекции воздуха в струю из затопленного пространства. Расчеты, выполненные по методике [10], показывают, что при $H = 10$ для условий настоящего эксперимента содержание воздуха на оси однофазной струи переменного состава достигает 75—80%.

Таким образом, присутствие в высокотемпературной струе дисперсного компонента существенно увеличивает теплообмен в окрестности точки торможения даже при малых значениях начальной массовой расходной концентрации примеси. При этом коэффициент усиления теплообмена для точки торможения может достигать значительных величин и зависит (в рамках проведенного исследования) от κ_a , рода материала частиц, удаления среза сопла от преграды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гиршович Т. А., Картушинский А. И. и др. Экспериментальное исследование турбулентной струи, несущей тяжелые примеси.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1981, № 5.
2. Мельников В. К., Бете В. В. Экспериментальное исследование миграций частиц в высокотемпературном струйном потоке.— Изв. АН ЛатвССР. Сер. физ. и техн. наук, 1981, № 5.
3. Мельников В. К. Теплообмен в гетерогенных высокотемпературных струях.— Изв. АН ЛатвССР. Сер. физ. и техн. наук, 1977, № 3.
4. Лаатс М. К. Некоторые задачи и проблемы расчета струи с тяжелыми частицами.— В кн.: Турбулентные двухфазные течения/Под ред. М. К. Лаатса. Таллин: Изд-во АН ЭССР, 1982.
5. Shimizu A., Echigo R., Hasegawa S. Нихон кикай гаккай ромбунсю.— Trans. Jap. Soc. Mech. Engng, 1980, В 46, N 409.
6. Горшков Г. Ф. К расчету теплообмена в окрестности точки торможения при обтекании преграды плазменными потоками.— Физика и химия обработки материалов, 1982, № 6.
7. Панкратов Б. М., Полежаев Ю. В., Рудько А. К. Взаимодействие материалов с газовыми потоками/Под ред. В. С. Зуева.— М.: Машиностроение, 1975.
8. Абалтусов В. Е., Дементьев В. Ф., Мамонтов Г. Я., Немова Т. Н. Исследование теплообмена на поверхности тел при обтекании двухфазной струей плазмы.— В кн.: Тепломассообмен-VII. Минск: ИТМО АН БССР, 1984, т. 3.
9. Тепло- и массообмен в потоке нагретого газа/Под ред. А. Г. Шашкова.— Минск: Наука и техника, 1974.
10. Теория турбулентных струй/Абрамович Г. Н., Гиршович Т. А., Крашенинников С. Ю., Секундов А. Н., Смирнова И. П. 2-е изд., перераб. и доп./Под ред. Г. Н. Абрамовича.— М.: Наука, 1984.

Поступила 31/X 1985 г.

УДК 532.517.4 : 536.242

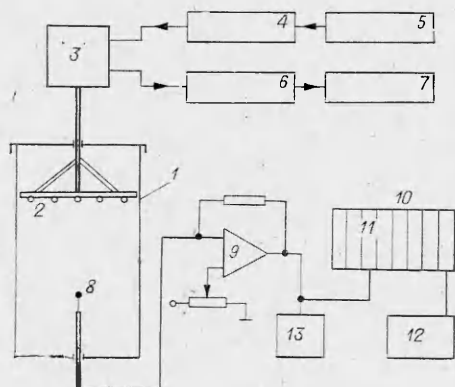
ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА МАССООБМЕНА МЕЖДУ ТВЕРДОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ЧАСТИЦЕЙ И ТУРБУЛИЗОВАННОЙ ЖИДКОСТЬЮ

М. С. Искаков, О. Н. Кашицкий, В. Е. Накоряков
(Новосибирск)

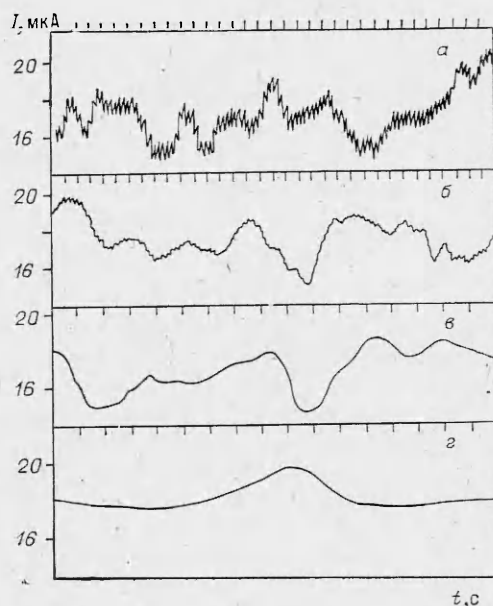
Для интенсификации процесса массообмена на границе раздела жидкой и твердой фаз, как правило, создают такие условия, чтобы жидкость находилась в турбулентном режиме. Выявление закономерностей переноса массы в этих условиях дает возможность для выбора наиболее оптимального режима работы химического аппарата, т. е. получение максимальных коэффициентов массоотдачи при малых затратах энергии. В промышленности в качестве рабочих аппаратов используются сосуды, в которых перемешивание жидкости осуществляется с помощью мешалок турбинного или лопастного типа. По этой причине многие исследователи, занимающиеся изучением массообменных процессов в системе жидкость — твердое тело, полностью моделировали реальные условия [1—4]. К другой группе относятся работы, в которых изучение

массообмена проводится при обтекании одиночной твердой сферической частицы потоком жидкости в каналах различной конфигурации [5—10]. Можно выделить два основных метода, используемых при изучении массообменных процессов: растворение твердых тел в жидкостях [1—5, 9] и электрохимический метод [6—8, 10]. Первый метод применим только для получения средних значений коэффициента массообмена, к тому же для него характерно изменение формы и размера исследуемых частиц, что существенно снижает точность получаемых результатов. В настоящее время большое распространение получил электрохимический метод, который обеспечивает высокую точность измерений, а также дает возможность исследования как интегральных, так и пульсационных характеристик процесса, что важно для систем, в которых жидкость находится в турбулентном режиме. В [11] рассмотрена задача о массообмене турбулентной жидкости с плоской стенкой и обсужден вопрос о корреляциях между пульсациями скорости жидкости и коэффициента массоотдачи на основе спектрального анализа. Показано, что при турбулентном режиме обтекания стенки форма спектра мощности пульсаций коэффициента массоотдачи не зависит от числа Рейнольдса, в то же время отмечено сильное влияние числа Шмидта на частоту пульсаций коэффициента массоотдачи. Не обнаружено заметного влияния изменения размера электрода на форму спектральной плотности энергии пульсаций коэффициента массоотдачи. Таким образом, применение спектрального анализа к интерпретации результатов, получаемых с помощью электрохимического метода при изучении массообменных процессов, позволяет достаточно точно оценить влияние того или иного фактора на изучаемый процесс. В настоящей работе аналогичный подход использован при изучении массообмена между фиксированной твердой сферической частицей и турбулизованной жидкостью.

Экспериментальная установка, методика измерения. Измерения проводились на экспериментальной установке, общий вид которой приведен на рис. 1. Рабочий участок представляет собой оргстеклянный сосуд 1 размерами $230 \times 230 \times 500$ мм, наполненный жидкостью до фиксированной отметки. Источник возмущений — осциллирующая решетка 2, расположенная в верхней части сосуда и приводимая в движение при помощи специального устройства 3, состоящего из двух динамических головок типа 25ГД-26. На устройство 3 через усилитель мощности 4 подавался сигнал от генератора синусоидальных напряжений 5. Частотомер 6 и осциллограф 7 служили для измерения частоты f и контроля за формой колебаний осциллирующей решетки. Амплитуда и частота колебаний менялись соответственно в диапазонах $a = 2—11$ мм, $f = 5—20$ Гц. Электрохимический сферический электрод-катод 8 диаметром $d = 0,57$ мм изготовлен из платины и одновременно был исследуемой частицей. В качестве рабочей жидкости использовался водный раствор ферри- и ферроцианида калия с добавлением нейтрального электролита для уменьшения миграции (под действием электрического поля) диффундирующих ионов. Ток электрохимического датчика усиливался с помощью усилителя постоянного тока 9, который также обеспечивал подачу напряжения смещения на датчик для работы в режиме пре-



Р и с . 1



Р и с . 2

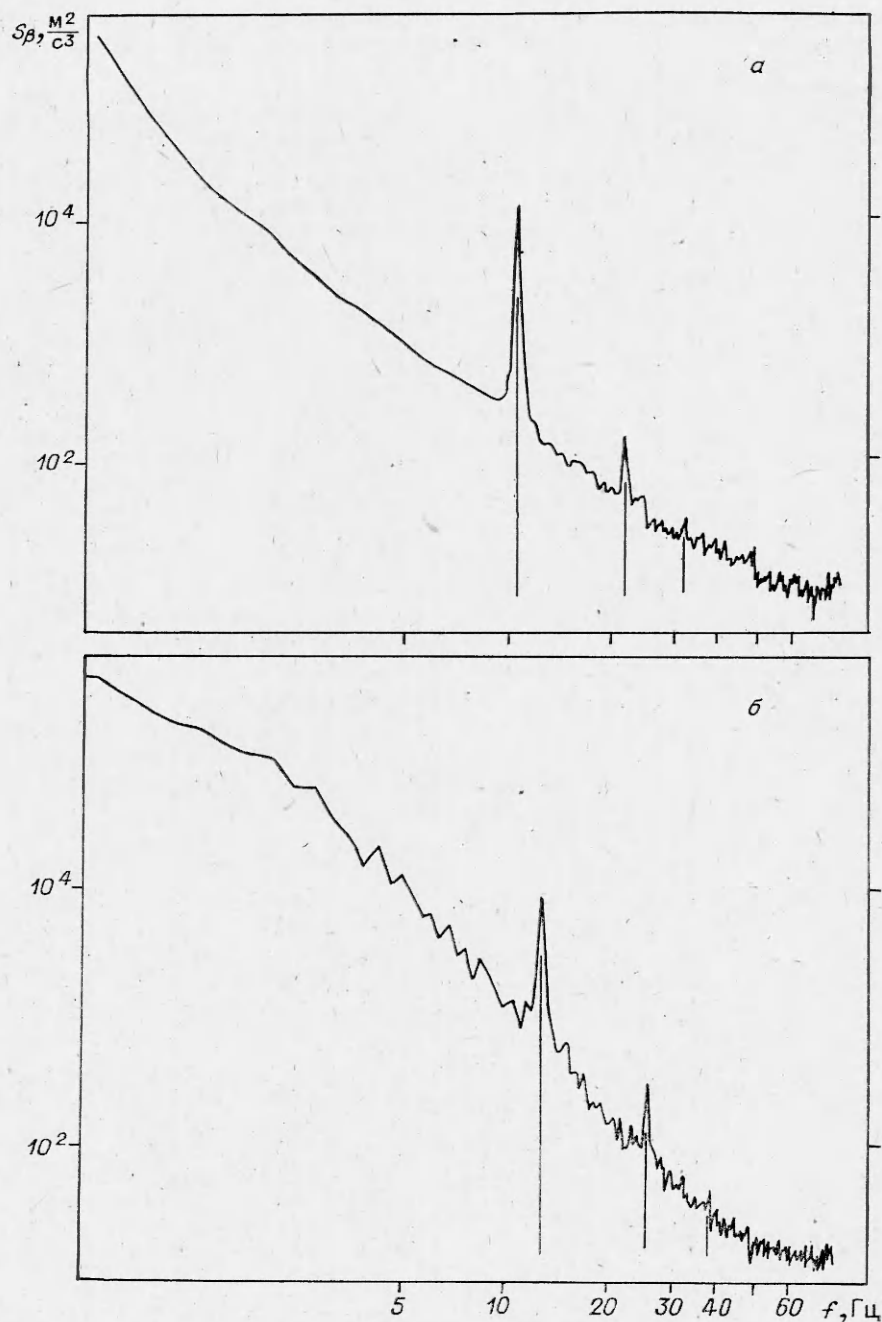
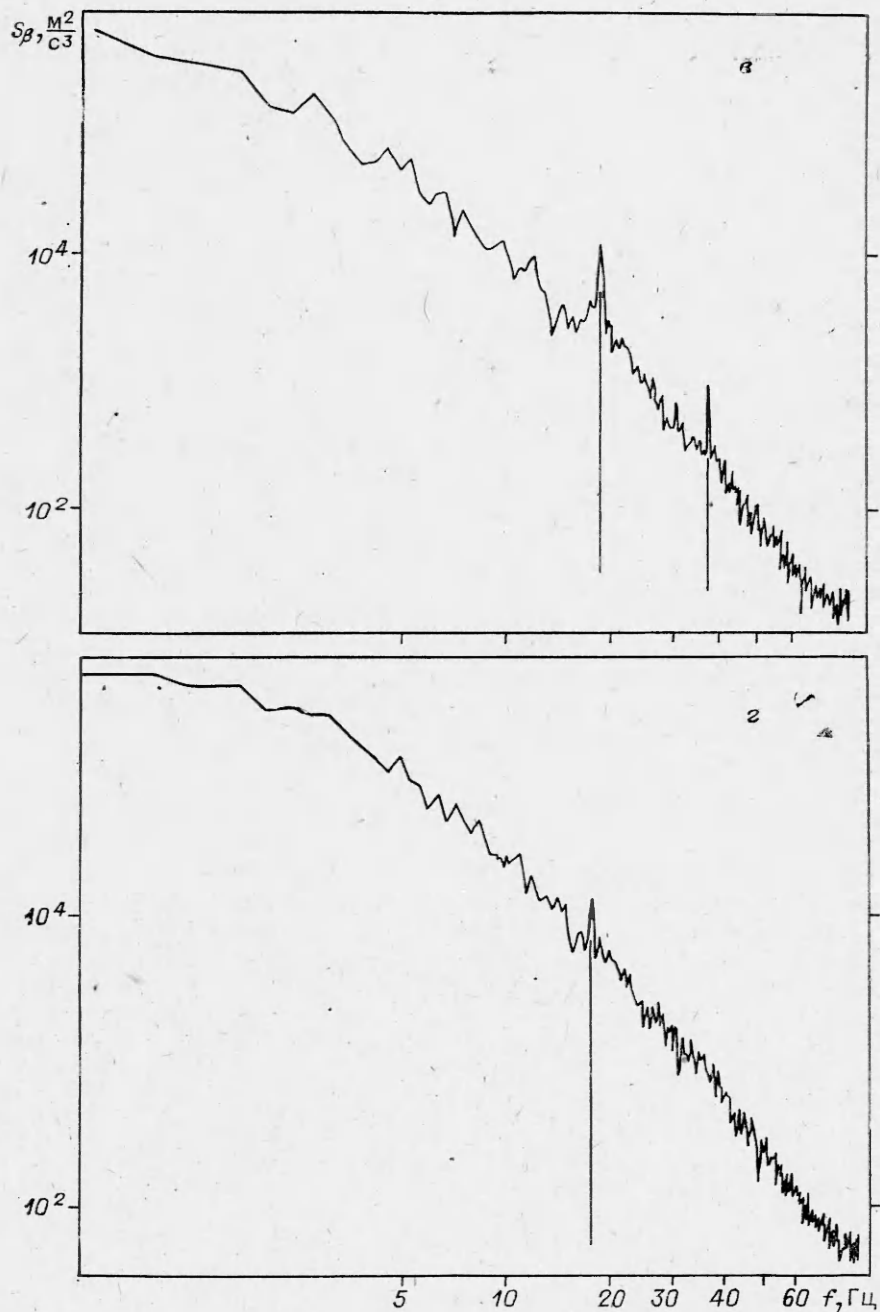


Рис. 3

дельного диффузионного тока. Выходное напряжение усилителя, пропорциональное мгновенному значению диффузионного тока датчика, подавалось на аналого-цифровой преобразователь АЦП-118 11, установленный в крейте «КАМАК» 10. Преобразованный в цифровую форму сигнал обрабатывался на ЭВМ «Электроника-60 М» 12. Выходной сигнал усилителя контролировался визуально осциллографом С1-70 13. Частота дискретизации сигнала менялась в зависимости от режима и положения датчика в пределах 100—1000 Гц. Спектральная плотность вычислялась методом быстрого преобразования Фурье исходной реализации [12]. Использовался пакет программ БПФ, разработанный в Институте автоматики и электрометрии СО АН СССР. Длина одной реализации равнялась 512 точкам. Проводилось осреднение вычисленной спектральной плотно-



сти по ансамблю реализаций, число реализаций 20—50. Такое осреднение обеспечивало хорошее воспроизведение результатов измерения во всех исследованных режимах. Результаты вычислений выводились на цветной графический дисплей и вычерчивались графопостроителем Н-306 в логарифмических координатах. Величина интегрального коэффициента массообмена между сферическим электродом и жидкостью определяется по формуле

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

где I — диффузионный ток; F — константа Фарадея; A — площадь электрода; c — концентрация ионов феррицианида калия.

Измерения проводились по истечении определенного времени после приведения в колебания решетки, необходимого для установления

стационарного режима. В [13] показано, что в первый момент происходит увеличение интенсивности среднеквадратичных пульсаций скорости, а затем ее уменьшение до постоянного значения. Безразмерное время установления стационарного режима $\tau = ft = 5000$. В наших экспериментах установление стационарного режима контролировалось по измерению среднего коэффициента массоотдачи от датчика.

На рис. 2 приведены записи на шлейфовом осциллографе диффузионного тока электрохимического датчика для режима при $f = 15$ Гц и $a = 7,5$ мм на расстояниях $h = 5; 10; 100; 200$ мм от нижнего края осциллирующей решетки ($a - z$ соответственно). Видно, что изменение β носит пульсационный характер. С увеличением расстояния от осциллирующей решетки амплитуда пульсаций β меняется мало, в то время как частота пульсаций уменьшается на порядок. Метки времени на рис. 2, *a, б* 0,2 с, а на рис. 2, *в, г* 2с. В непосредственной близости от осциллирующей решетки наблюдается широкий диапазон частот пульсаций от наивысших, равных частоте осциллирующей решетки, до низких, с характерными частотами порядка единиц герц. Причем явно можно выделить частоту осциллирующей решетки, характерная частота пульсаций коэффициента массоотдачи меньше одного герца. Поэтому большой интерес представляет анализ энергии турбулентных пульсаций коэффициента β в части распределения ее по различным частотам, наблюдающимся при пульсациях.

Обсуждение результатов. Используемый в работе электрохимический датчик сферической формы нечувствителен к направлению потока. Измеренный таким датчиком коэффициент массоотдачи не связан с какой-либо одной компонентой пульсаций скорости жидкости. Тем не менее не вызывает сомнения, что флуктуации этой величины обусловлены перемещением вихревых структур в жидкости и в целом правильно характеризуют структуру турбулентности жидкости. С увеличением размера электрода отношение интенсивности пульсаций к среднему значению уменьшается за счет эффектов осреднения массоотдачи по поверхности сферы. Измерение пульсаций коэффициента β малым датчиком, размеры которого много меньше характерных размеров структурных образований в жидкости, дает количественную информацию о пульсационной структуре течения жидкости; этот метод — один из наиболее простых и удобных при исследованиях сильно турбулизованных течений с нулевой или малой по сравнению с пульсациями средней скоростью. Несмотря на относительно большие размеры, частотная характеристика датчика достаточна для фиксации наивысших частот в спектре, равных по порядку величины частоте осциллирующей решетки.

На рис. 3, *a - г* представлены графики спектральной плотности мощности пульсаций коэффициента массообмена S_β между твердой сферической частицей и турбулизованной жидкостью, измеренной на расстоянии 3 мм от нижнего края осциллирующей решетки, для разных величин мощности, затрачиваемой на перемешивание жидкости, при $a = 3; 7; 8; 9$ мм, $f = 11; 13; 19; 18$ Гц соответственно. Видно, что с увеличением мощности происходит непрерывное изменение формы спектра — он становится все более заполненным и при наибольших частотах осциллирующей решетки приобретает вид, характерный для течений с развитой турбулентностью. Причем во всем исследованном диапазоне изменения определяющих параметров на спектре явно выделяются основные частоты, задаваемые осциллирующей решеткой. Кроме того, можно выделить и кратные гармоники основной частоты. С увеличением интенсивности перемешивания кратные гармоники исчезают, этот процесс сопровождается относительным уменьшением мощности кратных гармоник на фоне основного спектра. При увеличении частоты осциллирующей решетки, а следовательно, и энергии, вкачиваемой в объем жидкости, происходит возбуждение все большего количества промежуточных частот, а также перераспределение энергии от низкочастотных возмущений к высокочас-

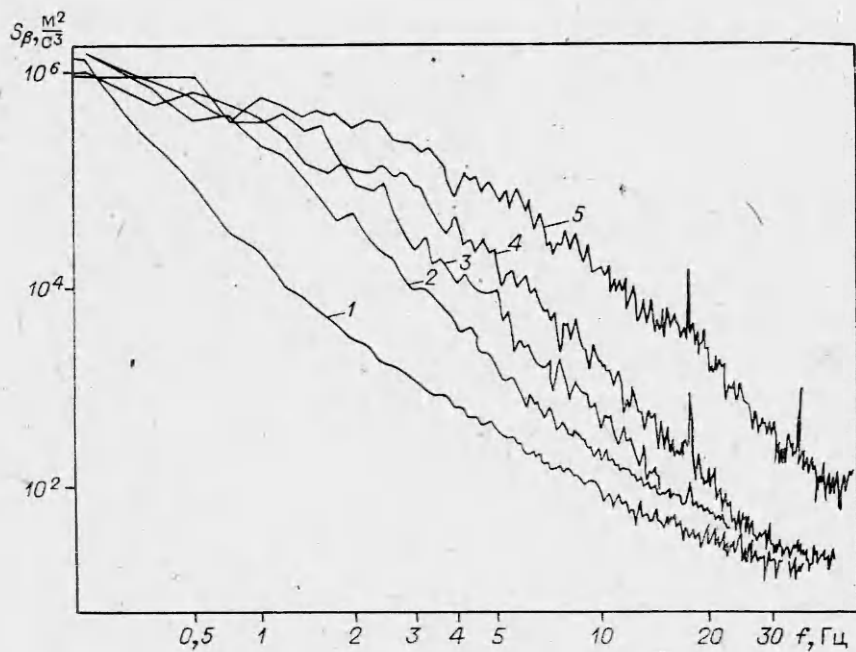


Рис. 4

тотным. Это хорошо согласуется с временными записями диффузионного тока на рис. 2.

На рис. 4 показаны графики S_B для $h = 300; 70; 30; 15; 5$ мм (линии 1—5) и данные для одного режима при $f = 18$ Гц, $a = 9,2$ мм. Видно, что с увеличением расстояния от осциллирующей решетки спектр становится уже, т. е. вклад высокочастотных пульсаций коэффициента β в процессе массообмена между твердой сферической частицей и жидкостью становится все меньше. По-видимому, это — следствие того, что мелкомасштабные высокочастотные возмущения в жидкости, порождаемые осциллирующей решеткой, диссипируют уже в непосредственной близости от

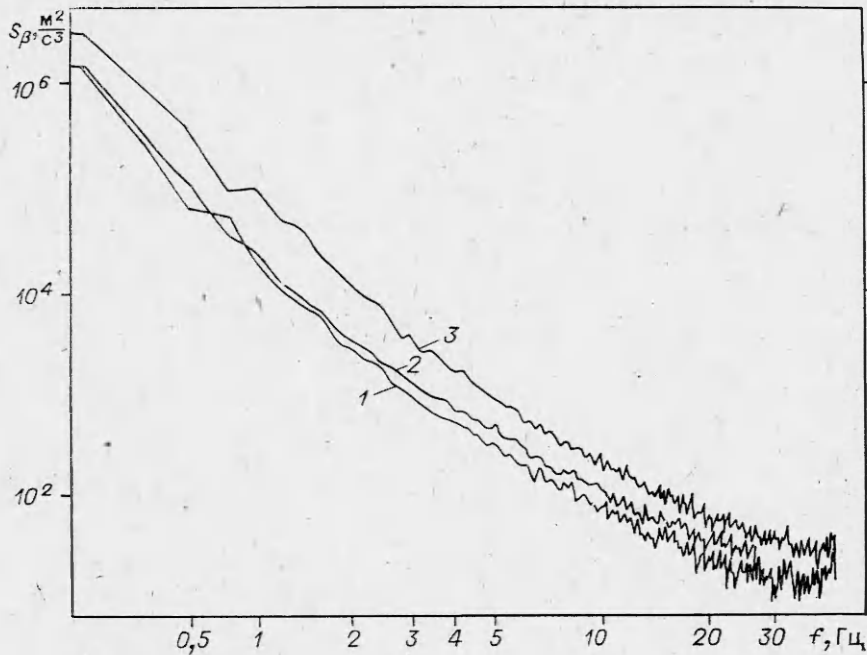


Рис. 5

решетки, так как они распространяются в сильно турбулизованной среде. Более крупные низкочастотные возмущения, обладая наибольшей энергией, распространяются по всему объему. Поэтому спектр, измеренный на расстояниях, больших, чем 100 мм, имеет большие значения S_p только в низкочастотной части (рис. 4).

Таким образом, весь объем жидкости, перемешиваемой с помощью осциллирующей решетки, можно поделить на две части: область, где форма спектра претерпевает резкое изменение, и область, в которой форма спектра остается неизменной. Первая область располагается около осциллирующей решетки и занимает примерно треть всего объема. Остальные две трети занимает вторая область. На рис. 5 представлены графики спектральной плотности мощности пульсаций коэффициента β , измеренные во второй области для $h = 300; 150; 100$ мм (линии 1—3). Несмотря на количественное несовпадение, эти спектры подобны, т. е. их форма остается неизменной. Следует отметить, что количественно графики отличаются мало. В [11] отмечено, что не существует количественного совпадения между флуктуациями скорости жидкости и флуктуациями коэффициента массоотдачи, однако имеется качественное подобие спектров мощности соответствующих величин. На основании этого можно сделать вывод, что во второй области имеются только низкочастотные крупномасштабные вихревые образования, слабоменяющиеся по величине.

Авторы считают своим долгом выразить признательность В. А. Гаврилову, Б. В. Тарасову и А. И. Черныху за помощь в проведении данного исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Николаишвили Е. К., Барабаш В. М. и др. Растворение твердых частиц при перемешивании в аппаратах без отражательных перегородок.— ТОХТ, 1980, т. 14, с. 604.
2. Boon-Long S., Laquerie C., Coudere J. P. Mass transfer from suspended solids to a liquid in agitated vessels.— Chem. Engng Sci., 1978, v. 33, p. 813.
3. Yagi H., Motouchi T., Hikita H. Mass transfer from fine particles in a stirred vessel. Effect of specific surface area of particles.— Ind. Eng. Chem. Progress Des. Dev., 1984, v. 23, p. 145.
4. Misic D., Sudo Y. et al. Liquid-to-particle mass transfer in a stirred batch adsorption tank with nonlinear isotherm.— J. Chem. Engng Japan, 1982, v. 15, N 1.
5. Kuchler M., Pilar A. Mass transfer during the dissolving of solids in liquids. Part I. Dissolving of spherical particles of sodium nitrate in water with the relative movement of the solid and liquid phases in a quadratic subcritical flow region.— Int. Chem. Engng, 1970, v. 10, N 3.
6. Искаков М. С., Накоряков В. Е. Конвективный перенос массы между твердой сферической частицей и жидкостью при больших числах Пекле.— ПМТФ, 1982, № 3.
7. Sandoval-Robles J. G., Riba J. P., Coudere J. P. Mass transfer around sphere.— Trans. IChemE, 1980, v. 58, p. 132.
8. Sambasiva Rao N., Subramanian V., Krishna M. S. Transfer rates at spheres moving on a circular path.— Indian Journal of Technology, 1976, v. 14, p. 119.
9. Keey R. B., Glen J. B. Mass transfer from solid spheres.— Can. J. Chem. Engng, 1964, v. 42, p. 227.
10. Furuta T., Okazaki M., Toei R. Mass transfer to a rotating sphere in a stream.— J. Chem. Engng Japan, 1977, v. 10, N 4.
11. Shaw D. A., Hanratty T. J. Influence of Schmidt number on the fluctuations of turbulent mass transfer to a wall.— AIChE J., 1977, v. 23, N 2.
12. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов.— М.: Мир, 1974.
13. Воропаев С. И., Гаврилин Б. Л. и др. Лабораторное исследование углубления перемешиваемого слоя в однородной жидкости.— Изв. АН СССР. ФАО, 1980, № 2.

Поступила 2/X 1985 г.