

УДК 532.516:534.13

© 2005 г. А. А. ИВАНОВА, В. Г. КОЗЛОВ, Н. В. СЕЛИН

## ОСРЕДНЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ В ТОРЦЕВЫХ ОБЛАСТЯХ ДЛИННОГО КАНАЛА ПРИ ЕГО ВРАЩАТЕЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЯХ

Экспериментально исследуется осредненное движение изотермической жидкости в вытянутом параллелепипеде, совершающем вращательные вибрации. Изучаются структура и интенсивность осредненных потоков и закономерности их трансформации с частотой вибраций. Безразмерная частота изменяется в широком интервале: от предельно низких величин, когда колебания жидкости существенно определяются вязкими силами, до высоких, когда роль вязкости проявляется лишь в относительно тонких пограничных слоях Стокса. Найдены безразмерные комплексы, определяющие интенсивность осредненных потоков во всем интервале частот.

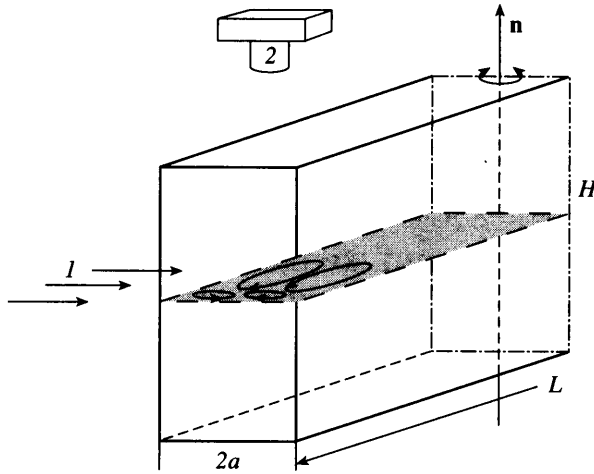
*Ключевые слова:* изотермическая жидкость, непоступательные колебания, осредненные течения, пограничные слои Стокса, безразмерная частота.

Наиболее известным примером осредненного воздействия вибраций на жидкость являются “акустические течения” – осредненные потоки, возникающие на фоне высокочастотных осцилляций жидкости; обзор механизмов генерации таких течений можно найти в [1]. В несжимаемой вязкой жидкости, совершающей высокочастотные колебания вблизи твердой границы, осредненные течения генерируются в слое Стокса [2], который, подобно ленточному транспортеру, сообщает движение жидкости, находящейся за своими пределами в объеме полости.

В недеформируемой замкнутой полости с однородной по плотности несжимаемой жидкостью колебания последней относительно стенок возникают лишь при непоступательных (вращательных) вибрациях. Непоступательные колебания полости являются первопричиной осредненных течений, поступательная компонента колебаний приводит лишь к перенормировке давления в жидкости. Вследствие сказанного вибрационный эффект не зависит от расположения оси и определяется лишь ее направлением и параметрами вибраций, круговой частотой  $\Omega$  и амплитудой  $\varphi_0$ .

При изучении осредненных течений в замкнутой полости, совершающей вращательные колебания, основное внимание обычно уделяется предельному случаю высоких безразмерных частот  $\omega = \Omega a^2/\nu \gg 1$ , когда характерный размер полости  $a$  значительно превосходит толщину слоев Стокса [3, 4]. Интенсивность и структура осредненных течений при этом определяются параметром  $Re_p = \varphi_0^2 \Omega a^2/\nu$ , где  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости жидкости. Экспериментальные исследования осредненных потоков в полости квадратного сечения [5] показали, что при понижении частоты вибраций структура осредненных потоков трансформируется. В частности, в случае низких частот направление движения изменяется на противоположное по сравнению с высокочастотным случаем.

Тот факт, что чисто поступательные колебания полости являются абстракцией, а вращательная компонента присутствует в той или иной мере при всех типах колебаний, делает актуальным изучение осредненных потоков, вызываемых вращательными вибрациями полости. Распространенным в практике объектом является длинный замкнутый канал. В настоящей работе экспериментально изучается осредненное



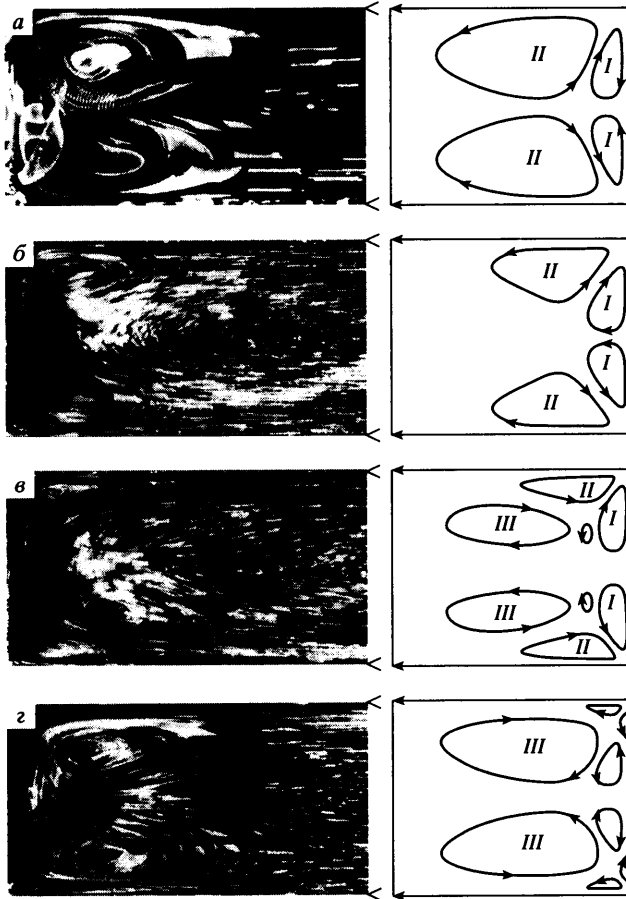
Фиг. 1. Схема полости:  $H$  – высота,  $2a$  – ширина и  $L$  – половина длины слоя,  $n$  – ось вибраций,  $l$  – световой нож

движение несжимаемой вязкой жидкости в длинном канале прямоугольного сечения при вращательных колебаниях канала в широком интервале безразмерных частот.

1. **Экспериментальная установка и методика.** Опыты проводятся в полости прямоугольного сечения размерами  $L = 212$  мм,  $H = 101$  мм и  $2a = 40$  мм, положение которой относительно оси вибраций  $n$  показано на фиг. 1. В качестве рабочих жидкостей используются силиконовое масло МПС 300 и водоглицериновые смеси различной концентрации (вязкость последних варьируется в диапазоне  $\nu = 1\text{--}800$  сСт). Вращательные колебания по закону  $\varphi = \varphi_0 \cos \Omega t$  сообщаются кювете при помощи механического вибратора [6]. Частота вибраций изменяется в диапазоне  $f \equiv \Omega/2\pi = 0.4\text{--}7$  Гц, измеряется при помощи цифрового тахометра типа ТЦ-3М с точностью 0.01 Гц. Амплитуда угловых колебаний полости варьируется ( $\varphi_0 = 0\text{--}0.35$  рад) и измеряется с точностью не ниже  $10^{-3}$  рад при помощи оптического катетометра типа В-630 или с экрана монитора при обработке видеозаписи. Расположение оси вибраций (расстояние от торцевой грани), как показывают наблюдения, не влияет на структуру течения. В различных случаях ось либо проходит через геометрический центр модели, либо располагается на расстоянии одного калибра от торца. Последнее применяется для того, чтобы снизить действие сил инерции на фоторегистрирующую аппаратуру, которая располагается напротив торца и совершает колебания вместе с полостью (кювета и фотокамера установлены в едином жестком каркасе).

Движение жидкости визуализируется алюминиевой пудрой или светорассеивающими частицами Resine Amberlite размером 0.35–0.80 мм и плотностью, близкой к плотности рабочей жидкости. Подсветка осуществляется со стороны широкой грани световым ножом  $l$ , расположенным перпендикулярно оси вибраций. Чтобы избежать нарушения поля скорости за счет разогрева жидкости, на пути светового ножа устанавливается тепловой фильтр, длительность светового воздействия максимально снижается. Структура движения регистрируется при помощи фотоаппарата (видеокамеры) 2 в системе отсчета полости. В зависимости от скорости осредненного движения жидкости длительность экспозиции изменяется от 1 до 70 с. За это время светорассеивающие частицы успевают “нарисовать” структуру течений. Поскольку движение жидкости складывается из колебательного (относительно стенок полости) и осредненного, возникающего на фоне колебаний, оставляемый светорассеивающей частицей след представляет собой зигзагообразную линию (фиг. 2).

Скорость осредненного течения в заданной точке полости определяется по перемещению частицы за некоторое число периодов, интенсивное движение визуализируется пластиковыми частицами. В случае большой вязкости жидкости и очень медленного осредненного движения скорость находится по пути, пройденному частицей за все время экспозиции, составляющее

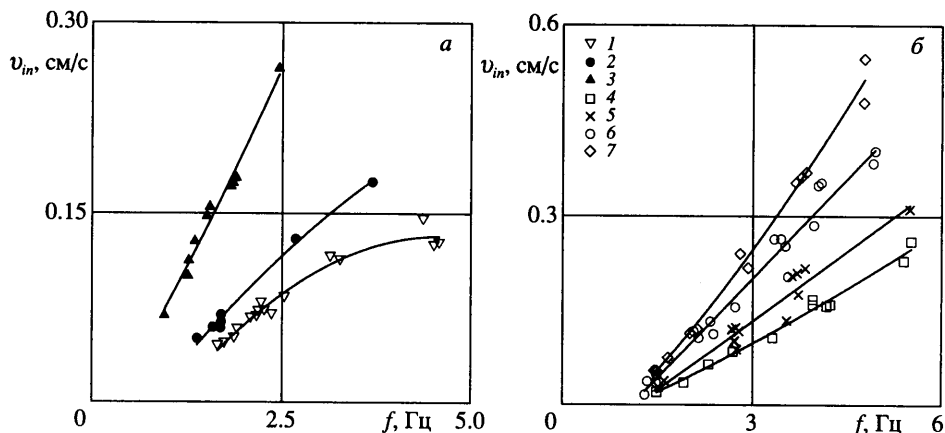


Фиг. 2. Вид и схема течения водоглицериновой смеси;  $(v, \text{сСт}, \varphi_0, \text{рад}, f, \Gamma\text{ц}) = a - (283, 0.212, 5.45)$ ;  $b - (62.4, 0.097, 1.38)$ ;  $в - (62.4, 0.078, 4.52)$ ;  $з - (11.5, 0.124, 2.98)$

десятки и сотни периодов колебаний, при этом в качестве визуализатора используется алюминиевая пудра.

**2. Результаты исследований.** Вращательные вибрации вызывают колебания жидкости во всем объеме; на расстояниях от торцов, превосходящих несколько калибров, осциллирующее сдвиговое течение жидкости однородно вдоль оси канала. Осредненные потоки генерируются вблизи торцов канала и захватывают несколько калибров, в средней по длине части канала они отсутствуют. Интенсивность осредненного движения и его структура существенно определяются безразмерной частотой. В условиях проведенного эксперимента осредненное течение имеет двумерную структуру и состоит из системно согласованно вращающихся двумерных вихрей, вытянутых вдоль оси вибраций. Картина вибрационного течения симметрична относительно середины полости. Исключение составляет случай очень интенсивных вибраций ( $Re_p > 300$ ) в области высоких частот, когда в результате неустойчивости двумерного течения развиваются сложные трехмерные потоки.

На фиг. 2 приведены фотографии потоков жидкости вблизи торцов и соответствующие им схемы при различных значениях параметров вибраций (средняя по длине область канала не показана).



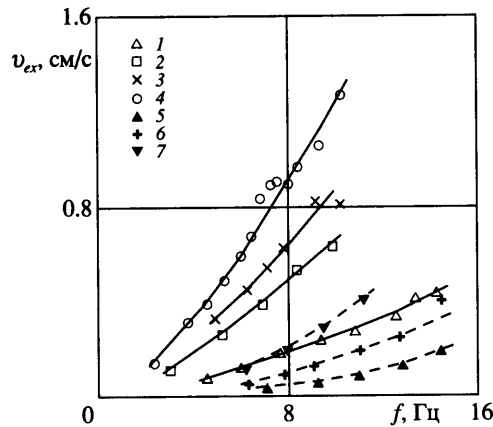
Фиг. 3. Зависимость максимальной скорости  $v_{in}$  струи, направленной в угол полости, от частоты вибраций для  $\nu = 62.4$  сСт,  $\varphi_0 = 0.078, 0.097, 0.150$  рад (1–3) и  $\nu = 292$  сСт,  $\varphi_0 = 0.118, 0.135, 0.165, 0.189$  рад (4–7)

В области низких безразмерных частот в жидкостях с вязкостью  $\nu \sim 0.5\text{--}8$  Ст при частоте вибраций  $f \sim 0.4\text{--}1.0$  Гц (этому соответствуют безразмерные параметры  $\omega \sim 10\text{--}80$  и  $Re_p < 0.5$ ) вблизи торцов слоя формируется осредненное течение, состоящее из четырех согласованно вращающихся двумерных вихрей. Два небольшого размера вихря *I* находятся непосредственно вблизи торцевой границы, два вихря *II* большего размера вытянуты вдоль длинных граней (фиг. 2, а;  $\omega = 48$ ,  $Re_p = 2.2$ ). Вихри вращаются согласованно друг с другом, формируя две струи, направленные в углы полости, и потоки жидкости, направленные из углов вдоль стенок. Наибольшую скорость имеют частицы, находящиеся в струях. Пульсационная компонента скорости – о ней можно судить по размаху колебаний визуализирующих частиц – в разных областях слоя различная. Осредненное вихревое движение захватывает область, размер которой по длине канала сопоставим с его шириной. В области  $\omega < 100$  структура течения не изменяется с частотой, при понижении  $\omega$  амплитуда колебаний жидкости и интенсивность осредненных потоков резко уменьшаются (на фиг. 2, б  $\omega = 56$ ,  $Re_p = 0.5$ ).

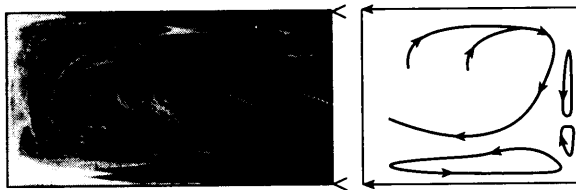
Форма осредненного течения качественно изменяется с повышением безразмерной частоты вибраций: поперечные размеры вихрей уменьшаются, вихри *II* прижимаются к стенкам, над ними формируются “внешние” вихри *III*, имеющие противоположное направление вращения (фиг. 2, в;  $\omega = 180$ ,  $Re_p = 1.1$ ). Структура течения становится “двухъярусной”. По мере повышения частоты поперечные размеры вихрей *I* и *II* уменьшаются, интенсивность вихрей *III* и их размер быстро нарастают. При достаточно высокой частоте вибраций локализованные в тонких пограничных слоях вихри *I* и *II* становятся неразличимы, вихри *III* формируют течение (фиг. 2, г;  $\omega = 650$ ,  $Re_p = 10$ ), по структуре близкое к низкочастотному (фиг. 2, а), но с противоположным направлением вращения. Во внешней к пограничному слою области течение имеет структуру, состоящую из четырех вихрей и сформированную двумя струями, выходящими из углов полости. Два вихря вблизи торца имеют сравнительно небольшие размеры и прижаты к стенкам. По длине канала область интенсивного движения захватывает несколько калибров.

В силу различия структуры течений при низких и высоких частотах для описания и анализа экспериментальных результатов условно выделим области низких  $\omega < 100$ , умеренных  $1000 > \omega > 100$  и высоких частот  $\omega > 1000$ .

В области низких частот [6] при заданном значении вязкости интенсивность течения (скорость) нарастает с частотой тем быстрее, чем выше амплитуда вибраций  $\varphi_0$ . На фиг. 3 построена зависимость скорости  $v_{in}$  жидкости в струе, сформированной вихрями *I* и *II* и направленной в угол канала, от частоты вибраций  $f$ . При постоянных



Фиг. 4. Зависимость максимальной скорости  $v_{ex}$  струи, направленной из угла полости, от частоты вибраций:  $\nu = 3.32$  сСт,  $\varphi_0 = 0.071, 0.110, 0.128, 0.152$  рад (1–4) и  $\nu = 52.2$  сСт,  $\varphi_0 = 0.080, 0.116, 0.179$  рад (5–7)



Фиг. 5. Вид и схема течения при интенсивных вибрациях:  $\varphi_0 = 0.305$  рад,  $f = 6.24$  Гц ( $\nu = 3.42$  сСт)

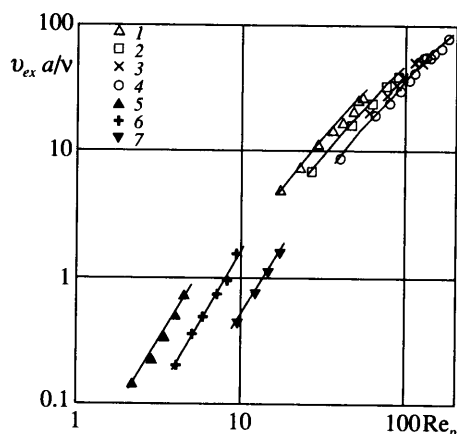
параметрах вибраций с повышением вязкости скорость движения уменьшается (ср. точки 3 и 5, 6).

В области умеренных и высоких частот скорость измеряется в струе, сформированной вихрями “второго яруса” и направленной из угла. Это движение является внешним по отношению к пограничным слоям и индуцируется интенсивными потоками, возбуждаемыми непосредственно в слоях Стокса (об этом будет ниже). Измерение скорости жидкости в самих пограничных слоях оказывается невозможным в силу малой толщины слоев. Интенсивность движения жидкости  $v_{ex}$  возрастает с увеличением вибрационной скорости и с понижением вязкости жидкости (фиг. 4).

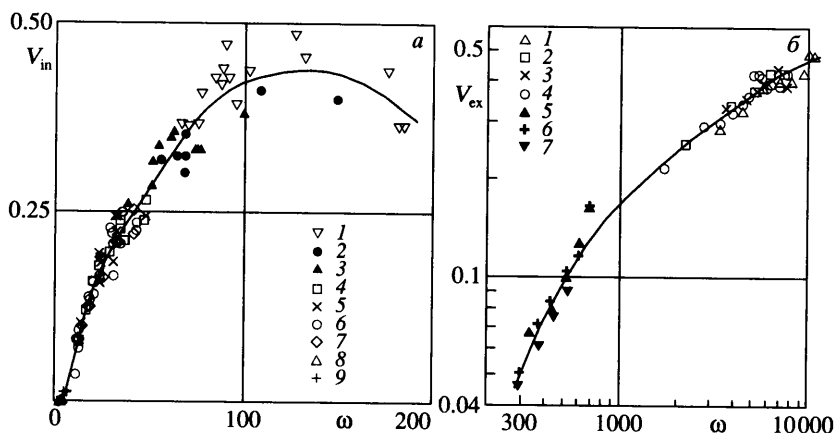
В опытах с маловязкими жидкостями при интенсивном вибрационном воздействии обнаружена неустойчивость симметричного движения, когда в торцевой части канала развивается один вихрь большой интенсивности (фиг. 5;  $\omega = 4600$ ,  $Re_p = 430$ ).

**3. Обсуждение результатов.** В предельном случае высоких частот  $\omega \gg 1$  определяющим вибрационным параметром является пульсационное число Рейнольдса  $Re_p = \varphi_0^2 \Omega a^2 / \nu$  [5]. Осредненные потоки генерируются непосредственно вблизи границ в вязких слоях Стокса. При этом на внешней границе слоя Стокса формируется касательное к поверхности осредненное движение, которое за счет вязких сил увлекает жидкость в остальном объеме полости (слой Стокса работает подобно ленточному транспортеру). Безразмерная скорость осредненных течений в объеме полости  $v_{ex} a / \nu$  пропорциональна  $Re_p$  [1, 7].

Экспериментальная зависимость скорости  $v_{ex} a / \nu$  внешних по отношению к пограничным слоям потоков от  $Re_p$  показана на фиг. 6. Кривые, построенные при различ-



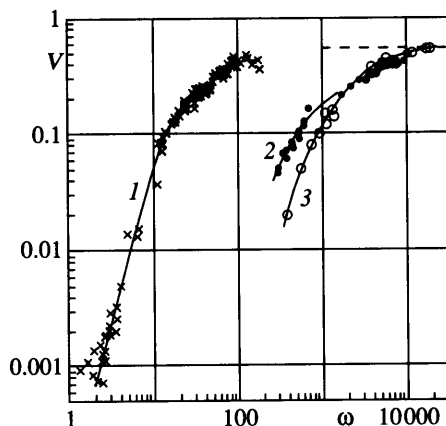
Фиг. 6. Зависимость безразмерной скорости струи  $v_{ex} a/v$  от  $Re_p$  (обозначения соответствуют фиг. 4)



Фиг. 7. Зависимость параметра  $V \equiv v/\varphi_0^2 \Omega a$  от частоты  $\omega$  для низких (а) и высоких (б) частот; а: обозначения 1–7 соответствуют фиг. 3; 8, 9 –  $\nu = 824$  сСт,  $\varphi_0 = 0.295$  и  $0.352$  рад, б: обозначения соответствуют фиг. 4

ных амплитудах вибраций, расслаиваются (точки 5–7), с понижением вязкости расслоение уменьшается, но не исчезает (1–4). Это указывает на то, что в условиях проведенного эксперимента область высокочастотной асимптотики не была достигнута, несмотря на значения безразмерной частоты  $\omega \sim 10^4$ .

Для характеристики скорости введем безразмерный комплекс  $V_{ex} \equiv v_{ex}/\varphi_0^2 \Omega a$  [5], где единицей измерения служит скорость осредненного движения, возбуждаемого в неоднородном слое Стокса при  $\omega \gg 1$ . В пределе высоких частот данный комплекс не должен изменяться с частотой, по крайней мере в условиях ламинарного движения, т.е. в области малых  $Re_p$ . На плоскости  $\omega$ ,  $V_{ex}$  хорошо согласуются результаты всех экспериментов (фиг. 7), параметр  $V_{ex}$  монотонно нарастает с  $\omega$ , асимптотически приближаясь к некоторому значению в области  $\omega > 10^4$ . Отметим, что область существования “внешних” потоков ограничена по частоте снизу: при  $\omega < 300$  эти потоки отсутствуют, поскольку пограничные слои распространяются на всю ширину канала.



Фиг. 8. Зависимость параметра  $V \equiv \nu/\varphi_0^2 \Omega a$  от  $\omega$  внутри пограничного слоя  $V_{in}$  (1) и за его пределами  $V_{ex}$  (2) в торцевой области длинного слоя, 3 –  $V_{ex}$  в полости квадратного сечения

Вязкие осциллирующие слои являются генератором осредненного движения как внутри себя, так и за пределами. В области низких частот размеры слоев Стокса сравнимы с размерами полости, при колебаниях жидкости вязкость проявляется во всем объеме полости. Для осредненной скорости используем ту же единицу измерения, что и в случае высоких частот. Результаты измерения скорости осредненных течений в самих пограничных слоях хорошо согласуются между собой на плоскости  $\omega$ ,  $V_{in}$ , где  $V_{in} \equiv \nu_{in}/\varphi_0^2 \Omega a$  (фиг. 7, а).

Таким образом, при описании осредненного движения, как за пределами вязких слоев Стокса, так и в самих вязких осциллирующих потоках, которые в предельном случае низких частот занимают всю полость, определяющими являются параметры  $\omega$  и  $V \equiv \nu/\varphi_0^2 \Omega a$ . Это позволяет представить на плоскости параметров  $\omega$  и  $V$  результаты измерений скорости в области низких частот (внутри вязких осциллирующих потоков, фиг. 8, кривая 1), так и потоков, индуцированных тонкими слоями Стокса в объеме полости за своими пределами (кривая 2). Кривые 1 и 2 имеют похожий вид, в обоих случаях скорость течений возрастает с частотой, приближаясь к некоторому асимптотическому значению. Однако по частоте кривые сдвинуты одна относительно другой на два порядка, при этом в отличие от кривой 1 область существования кривой 2 ограничена по частоте снизу (в области  $\omega < 300$  структуры второго яруса отсутствуют).

В области предельно низких частот можно отметить характерную зависимость  $V_{in} \sim \omega^3$ . Теоретический анализ показывает, что такой вид зависимости интенсивности осредненных течений от безразмерной частоты в полости, совершающей вращательные вибрации, характерен для предельного случая, когда колебания жидкости во всей полости определяются вязкими силами.

На фиг. 8 для сравнения приведена зависимость скорости “внешнего” потока (струи, бьющей из угла) в полости квадратного сечения – кривая 3 [5]. С понижением  $\omega$  скорость потока в квадратной полости убывает быстрее. Это может объясняться тем, что в ограниченной со всех сторон квадратной полости демпфирующая роль вязких сил на осциллирующее движение выше.

При  $\omega > 3000$  скорости “внешних” потоков в квадратной и прямоугольной полостях практически совпадают: темп нарастания с частотой снижается, кривые асимптотически приближаются к некоторому постоянному значению. Штриховой линией на гра-

фике приведено теоретическое значение осредненной скорости в струе в полости квадратного сечения в предельном случае  $\omega \gg 1$  [7]. Экспериментальные и теоретические результаты удовлетворительно согласуются.

Скорость осредненного движения “внутренних” вязких потоков быстро нарастает с  $\omega$ , достигая экстремума при  $\omega \sim 100$  (фиг. 8, кривая 1). Это объясняется тем, что интенсивность осредненного движения определяется амплитудой пульсационной компоненты скорости, а при  $\omega > 100$  вязкие пограничные слои от противоположных стенок канала перестают взаимодействовать и ослаблять друг друга.

Из экспериментов следует, что осредненное движение, вызванное непоступательными (вращательными) вибрациями длинного канала, захватывает ограниченную область вблизи его торцов (несколько калибров), полученные результаты применимы к любым полостям прямоугольного сечения, длина которых превосходит толщину в несколько раз.

Полученные результаты представляют интерес для теории вибрационной тепловой конвекции. В плане осредненного воздействия на неизотермическую жидкость эффективны комбинированные вращательно-поступательные вибрации полости [5, 8]. Важный в этом плане объект исследования – полость прямоугольного сечения с большим отношением сторон. Полученные в настоящей работе результаты позволяют указать ту область полости, в которой виброконвективное течение нарушается осредненными потоками, генерируемыми вязкими пограничными слоями, и учесть вызванный этими потоками вклад в тепломассоперенос.

**Заключение.** Экспериментально изучены структура и интенсивность осредненного движения вязкой несжимаемой жидкости в длинном канале прямоугольного сечения при вращательных вибрациях. Обнаружено, что во всей области безразмерных частот интенсивность осредненного движения характеризуется двумя параметрами: безразмерной частотой  $\omega = \Omega a^2/\nu$  и безразмерным комплексом  $V \equiv \nu/\phi_0^2 \Omega a$ , где  $a$  – ширина полости,  $\phi_0$  и  $\Omega$  – амплитуда и частота вибрации,  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости.

В области предельно низких частот, когда колебания жидкости во всей полости определяются вязкими силами, эти параметры связаны соотношением  $V_{in} \sim \omega^3$ . Течение в виде четырех симметричных вихрей, совершающих согласованное вращение вблизи торцов полости, захватывает область по длине канала, сравнимую с его шириной. С понижением частоты структура течения не изменяется, но его интенсивность резко падает.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (№ 03-01-00552).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ниборг В.* Акустические течения // Физическая акустика / Под ред. У. Мэзона. М.: Мир, 1969. Т. 2. Ч. Б. С. 302–377.
2. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 711 с.
3. *Повицкий А.С., Любин Л.Я.* Основы динамики и тепломассообмена жидкостей и газов при невесомости. М.: Машиностроение, 1972. 252 с.
4. *Ivanova A.A., Kozlov V.G., Lyubimov D.V., Lyubimova T.P.* Convective processes in a fluid subjected to static gravity and non-translational oscillations // Abstr. 9<sup>th</sup> Europ. symp. on Gravity-Dependent Phenomena in Physical Sciences. Berlin, 1995. P. 291.
5. *Иванова А.А., Козлов В.Г.* Вибрационная конвекция при непоступательных колебаниях полости. Изотермический случай // Изв. РАН. МЖГ. 2003. № 2. С. 25–32.
6. *Козлов В.Г., Селин Н.В.* Осредненное движение жидкости в полости, совершающей низкочастотные вращательные колебания // Конвективные течения. Пермь, 2003. С. 153–162.
7. *Gershuni G.Z., Lyubimov D.V.* Thermal Vibrational Convection. N.Y.: Wiley, 1998. 358 p.
8. *Козлов В.Г.* О вибрационной тепловой конвекции в полости, совершающей высокочастотные вращательные качания // Изв. АН СССР. МЖГ. 1988. № 3. С. 138–144.