

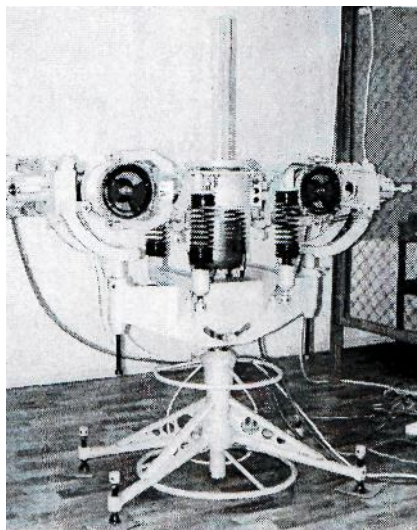
УДК 532.5

ЭФФЕКТЫ ВИБРАЦИОННОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В СОСУДАХ С ЖИДКОСТЬЮ

И.И.Блехман¹⁾, Д.А.Индейцев²⁾, Ю.А.Мочалова²⁾

В настоящем докладе кратко излагаются результаты новых исследований нескольких примечательных вибрационных эффектов, которые могут найти и уже частично находят применение при создании горно-обогатительных машин и технологий. Эти исследования выполнены в последние годы в совместной лаборатории вибрационной механики Института проблем машиноведения РАН и НПК «Механобр-техника». Рассматриваются направления развития полученных результатов.

Методической основой проведенных исследований в экспериментальном плане является универсальный вибрационный стенд 157-УС, созданный в Механобре [1] (рис.1), а в теоретическом плане - новый подход к изучению вибрационных эффектов, называемый вибрационной механикой и также разработанный в Механобре и ИПМаш РАН [2, 3].



с

Рис.1 Фото установки

Существенным достоинством стенда является возможность реализации на нем колебаний с различными формами траекторий, что делает его особенно эффективным при исследовании технологических процессов. Достоинством же подхода вибрационной механики является физическая наглядность и доступность использования в инженерной практике.

Виброструйный эффект и явление вибрационной инжекции газа в жидкости

Виброструйный эффект известен сравнительно давно [4]. Он состоит в том, что при вибрации в жидкости пластины с коническими отверстиями возникают медленные потоки жидкости в направлении сужения отверстий. Виброструйный эффект успешно используется в технических устройствах [2, 4, 5]. Вместе с тем он был

вероятной причиной ряда авиационных катастроф, когда вследствие вибрации топливо переставало поступать из бензобаков, т.е. происходило вибрационное запираение отверстий. Давление, способствующее истечению топлива, уравнивалось противодействием, возникающим при вибрации.

Второе явление - вибрационная инжекция газа в жидкость - обнаружено недавно [6]. Оно состоит в засасывании газа в вибрирующий в этом газе сосуд с жидкостью через отверстие в сосуде (рис.2).

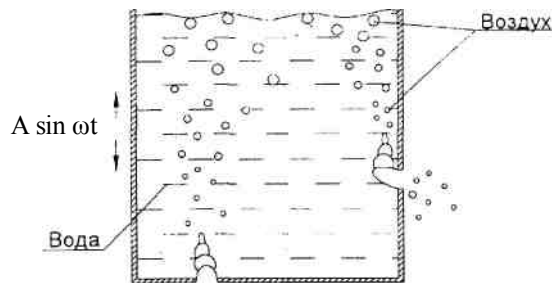


Рис.2. Вибрационная инжекция газа в жидкость.

Впрочем, инжекция будет происходить и в случае вибрации сосуда в жидкости, т.е. можно говорить также о явлении вибрационной инжекции жидкости в жидкости.

В работе [7] были получены общие формулы, позволяющие определять направление среднего потока и средний расход жидкости через отверстие как в случае виброструйного эффекта, так и в случае явления виброинжекции. Здесь приведено только условие вибрационности запираения отверстия в случае виброструйного эффекта

$$\begin{matrix} \mu_+ & \dots & 1 & 2.27 & (1) \\ \mu_+ & \dots & 1 & 2.27 & (1) \\ \mu_+ & \dots & 1 & 2.27 & (1) \end{matrix}$$

Здесь через μ_+ и μ_- обозначены коэффициенты расхода отверстий соответственно при вытекании и втекании жидкости в сосуд, а

$$w = \frac{\rho_1 h A \omega^2}{\Delta P} \quad (2)$$

- так называемый параметр перегрузки, равный отношению амплитуды динамического перепада давления к статическому (ρ_1 - плотность жидкости, A - амплитуда, ω - частота вибрации, h - высота жидкости в сосуде, $\Delta P = P_1 - P_2$, где P_1 - давление жидкости у отверстия в сосуде, а ΔP_2 - вне сосуда. Формула (1) достаточно точна при $w > 5$. Если

$$\begin{matrix} \mu_+ & \dots & 1 & 2.27 & (1) \\ \mu_+ & \dots & 1 & 2.27 & (1) \\ \mu_+ & \dots & 1 & 2.27 & (1) \end{matrix}$$

то возникает поток жидкости внутрь сосуда, несмотря на положительный перепад давления ΔP .

Некоторые возможности практического использования описанных эффектов рассмотрены в статье [8].

«Аномальные» эффекты в поведении системы газ - жидкость - «тяжелые» частицы в вибрирующих сосудах

При вибрации в газовой среде сосуда с жидкостью наблюдаются своеобразные нелинейные эффекты, в частности, засасывание пузырьков газа вглубь сосуда и наоборот, всплывание тел более плотных, чем жидкость. Иными словами, имеет место «аномальное» поведение системы: она эволюционирует к состояниям, соответствующим максимальным или близким к ним значениям потенциальной энергии.

Эти и подобные вопросы рассматривались во многих публикациях, принадлежавших, в том числе, выдающимся учеными. Можно сослаться, в частности, на работы Г.К.Бетчела, С.С.Григоряна, Р.И.Нигматулина. Важные и обстоятельные исследования выполнены в ИМАШ РАН под руководством и при участии академика Р.Ф.Ганиева. Работа [9] развивает и дополняет эти исследования. Условия погружения пузырьков и всплывания «тяжелой» частицы получены в ней при простейших предположениях путем использования подхода вибрационной механики и метода прямого разделения движений. Результаты сопоставляются с экспериментом. Статья [10] посвящена памяти академика В.Н.Челомея, работа которого [10] дала значительный импульс исследованиям в данной области.

Экспериментальное исследование проведено на вибрационном стенде института «Механобр» (рис.1). На столе стенда закреплялся стеклянный цилиндрический сосуд с внутренним диаметром 60 мм. Сосуд наполнялся водой до уровня $H = 180$ мм, и ему сообщались вертикальные гармонические колебания с амплитудой $A = 6,5$ мм. Изменение поведения системы при медленном увеличении частоты ω , наблюдавшееся при обычном и стробоскопическом освещении, схематически представлено на рис.3.

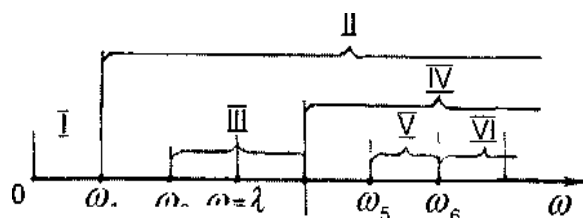


Рис.3. Критические значения и характерные интервалы изменения частоты колебаний сосуда.

В интервале $0 < \omega < \omega_1 = 170 \text{ с}^{-1}$ жидкость оставалась прозрачной. Вблизи поверхности возникал, постепенно нарастая с увеличением частоты, слой жидкости, насыщенный пузырьками различного размера. При $\omega > \omega_1 = 170 \text{ с}^{-1}$ появлялись интенсивные хаотические колебания поверхности жидкости, причем отдельные всплески достигали высоты 180 мм. При частоте $\omega = \omega_2 \approx 190 \text{ с}^{-1}$ наблюдалось погружение пузырьков вглубь сосуда, при этом пузырьки с диаметром около 1-2 мм более или менее равномерно распределялись по объему. При $\omega = 200-210 \text{ с}^{-1}$ дрейф таких и более мелких пузырьков вниз был настолько интенсивным, что жидкость во всем объеме становилась непрозрачной, напоминая разбавленное молоко. Погружающиеся пузырьки образовывали вблизи дна сосуда воздушную полость («подушку»). Когда подушка достигала определенного объема (при $\omega = \omega_4 \approx 220 \text{ с}^{-1}$), рой пузырьков воздуха, ее образующий, с характерным шумом устремлялся вверх и выходил на поверхность. После этого при той же частоте картина повторялась: пузырьки погружались, вновь образуя подушку и т.д. Иными словами, имели место

асинхронно возбуждаемые автоколебания. Их период составлял $2\div 3$ с. В интервале частот $220\div 230$ с⁻¹ ($\omega_5 < \omega < \omega_6$) наблюдалось всплывание частиц, более плотных, чем вода (кусков резины с характерным размером 5 мм и шариков с диаметром 10 мм). При частоте $\omega = \omega_3 = \lambda$, близкой к ω_2 , происходил проход через резонанс, соответствующий частоте свободных колебаний столба воды на воздушной подушке. При этом наблюдался эффект Зоммерфельда (см., например [2, 4]).

В результате теоретического исследования получено следующее простое условие погружения пузырьков воздуха вглубь сосуда

$$Q = \frac{\omega^2}{\omega^2 + k_1^2} \cdot \frac{A\omega}{c} \cdot \frac{A\omega^2}{g} \operatorname{tg} \frac{h\omega}{g} > 1 \quad (4)$$

Здесь, как и выше, A и ω - соответственно амплитуда и частота вибрации, g - ускорение свободного падения, k_1 - приведенный коэффициент вязкого сопротивления движению пузырька, h - толщина турбулизованного водо-воздушного слоя, образующегося вблизи свободной поверхности при вибрации, c - скорость звука в таком слое. Скорость c парадоксально мала [11] и обнаруживает удивительное примерное постоянство в широком диапазоне изменений объемной концентрации воздуха α ($c \approx 20$ м/с при $0,2 < \alpha < 0,7$).

Формула (4) в указанном диапазоне частот ω справедлива для пузырьков с диаметром не более 1 мм. Она удовлетворительно согласуется с экспериментом.

Условие всплывания частиц, более плотных, чем жидкость, получено в форме

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{\omega^2}{\omega^2 + k_1^2} \cdot \frac{A\omega}{c} \cdot \frac{A\omega^2}{g} \operatorname{tg} \frac{h\omega}{g} < -1 \quad (5)$$

Здесь H - уровень воды в сосуде, а коэффициент k определяется формулой

$$k = \frac{\rho - \rho_0}{\rho + \rho_0/2}$$

где ρ - плотность материала частицы, а ρ_0 - плотность среды. Формула (5) предполагает примерное постоянство концентрации воздуха по глубине сосуда. Для случая, когда это условие не выполняется, в работе получена другая формула.

Подчеркнем, что физической основой всех описанных эффектов служит факт насыщения жидкости при вибрации пузырьками воздуха и существенное снижение скорости звука в такой среде. В свою очередь указанное насыщение происходит вследствие своеобразной потери устойчивости раздельного состояния системы жидкость - газ в поле силы тяжести. Такая неустойчивость имеет место при возникновении достаточно толстого насыщенного газом слоя вблизи свободной поверхности жидкости. Условие (4) по существу и является условием этой неустойчивости.

О дальнейших исследованиях

В настоящее время авторы развивают представленные исследования в следующих направлениях.

1. Континуальный подход к рассмотрению движения роя пузырьков с использованием результатов исследования отдельной частицы. Этот подход позволяет построить эволюцию концентрации пузырьков по мере погружения и всплытия роя.

2. Исследование эффектов параметрического резонанса при движении пузырьков. Эти исследование может позволить объяснить и описать медленные (с периодом 2-3 секунды) колебания роя пузырьков, которые ранее были предположительно отнесены к асинхронным автоколебаниям.

Заключение

В заключение отметим, что все рассмотренные эффекты могут рассматриваться как частные случаи явления вибрационного перемещения - возникновения направленного в среднем движения за счет ненаправленных в среднем (вибрационных) воздействий [2].

Поскольку это явление находит самое широкое применение в различных устройствах и технологиях, то есть все основания ожидать, что будут с успехом использованы также описанные выше эффекты. В настоящее время авторы развивают исследования по данной проблеме в изложенных направлениях.

Представленные работы выполнены при частичной поддержке РФФИ (гранты № 08-08-00090 и №06-08-01015)

Литература

1. Блехман И.И., Вайсберг Л.А., Лавров Б.П., Васильев В.Б., Якимова К.С. Универсальный вибрационный стенд: опыт использования в исследованиях, некоторые результаты // Научно-технические ведомости СПбГУ. - СПб, 2003. № 3 - С. 224-227.
2. Блехман И.И. Вибрационная механика. - М: Физматлит, 1994, 400 с. (Англ. перевод: Vibrational Mechanics. - World Scientific, Singapore at al, 2000, 509 p.).
3. Blekhman I.I. Selected Topics in Vibrational Mechanics. Edited by I. Blekhman. World Scientific, Singapore, New Jersey, Hong Kong at al. 2000. - 409 p.
4. Вибрации в технике: Справочник в 6-ти томах.-М.: Машиностроение, 1978-1981.
5. Блехман И.И., Вайсберг Л.А., Коровников А.Н. Анализ гидродинамики вибрационного грохота с ситом, колеблющимся в водной среде // Междувед. сб. науч. тр. «Исследование процессов, машин и аппаратов разделения материалов по крупности». - Л.: Механобр, 1988. - С.35-46.
6. Блехман И.И., Блехман Л.И., Вайсберг Л.А., Васильков В.Б., Якимова К.С. Явление вибрационной инжекции газа в жидкость (диплом № 187). Сб. «Научные открытия».- М.: Российская академия естественных наук, 2002. - С. 60.
7. Блехман И.И., Блехман Л.И., Вайсберг Л.А., Васильков В.Б., Якимова К.С. Нелинейные эффекты при истечении жидкости из вибрирующих сосудов // Доклады академии наук-2003. Т. 391. № 2. -С. 185-188.
8. Блехман И.И., Вайсберг Л.А., Васильков В.Б., Якимова К.С О возможности использования вибрационной инжекции в обогащительных технологиях // Обогащение руд. - 2004. № 4. - С. 43-46.
9. Блехман И.И., Блехман Л.И., Вайсберг Л.А., Васильков В.Б., Якимова "КГС. «Аномальные» явления в жидкости при действии вибрации // Доклады академии наук 2008. (в печати).
10. Челомей В.Н. Парадоксы в механике, вызываемые вибрациями // ДАН СССР. Механика. - 1983. Т. 270. № 1. - С.62-67.
11. Бэтчелор Г.К. Волны сжатия в суспензии газовых пузырьков в жидкости // Механика, 1968, №3, с. 65-84.

¹⁾Научно-производственная корпорация «Механобр-техника», Россия, Санкт -
Петербург

²⁾Институт проблем машиноведения РАН, Россия, Санкт – Петербург

Поступила: 12.03.09.