

ВИБРОАКУСТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕД И КОНСТРУКЦИЙ ЯЭУ

В.С. Федотовский, Т.Н. Верещагина, С.В. Лунина, Е.А. Иванова
ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ» им. А.И. Лейпунского, Обнинск



Вибраакустическая динамика гетерогенных сред и систем включает в себя широкий круг направлений исследований. К ним относятся динамика многофазных дисперсных сред, насыщенных жидкостью, природных или искусственных пористых сред и композитных материалов. К одному из важнейших направлений относится вибраакустическая динамика машин и аппаратов и, в частности, ядерных энергетических установок. Такие объекты ЯЭУ, как активная зона, состоящая из большого числа ТВС, тепловыделяющие сборки, состоящие из пучков твэлов, теплообменные аппараты и парогенераторы с пучками труб в ряде динамических задач целесообразно рассматривать как псевдооднородные среды с некоторыми эффективными динамическими свойствами, отражающими процессы взаимодействия стержневых элементов конструкций с теплоносителем.

В работе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований, с единых позиций описывающих динамику дисперсных сред и гетерогенных систем. Получены зависимости для эффективной динамической плотности и трансляционной вязкости жидких дисперсных сред, отражающих релаксационный характер дисперсии звука в суспензиях, эмульсиях и двухфазных пузырьковых средах. Для твердых дисперсных сред (композитов), а также для пучков упругих стержней или труб в жидком теплоносителе получены резонансные зависимости, приводящие к существенным и практически важным вибраакустическим эффектам. Для иллюстрации целесообразности и результативности использования концепции эффективных динамических свойств гетерогенных сред рассмотрены динамические задачи о собственных колебаниях оболочки с жидкостью и пучком упругих стержней, а также о гравитационных колебаниях жидкости со свободной поверхностью в баке с пучком стержней.

Ключевые слова: гетерогенные среды, дисперсные среды, вибраакустическая динамика, динамическая плотность, оболочка, пучок упругих стержней.

ВВЕДЕНИЕ

Вибраакустическая динамика гетерогенных сред, основанная на теории колебаний, гидродинамике, теории упругости и акустике, включает в себя широкий круг направлений исследований. К ним относятся динамика многофазных дисперсных сред [1], насыщенных жидкостью природных или искусственных пористых сред [2] и композитных материалов [3]. К одному из важнейших направлений относится вибраакустическая динамика машин и аппаратов [4] и, в частности, ядерных энергетических установок.

© В.С. Федотовский, Т.Н. Верещагина, С.В. Лунина, Е.А. Иванова, 2014

Такие объекты ЯЭУ, как активная зона, состоящая из большого числа ТВС, тепловыделяющие сборки, состоящие из пучков твэлов, теплообменные аппараты и парогенераторы, содержащие пучки труб, для некоторых классов задач гидродинамики и виброакустики целесообразно рассматривать на основе континуального подхода как системы, содержащие гетерогенные среды с эффективными динамическими свойствами.

В отличие от динамики однородных сред и конструкций, где колебательные и волновые процессы хорошо изучены, в динамике гетерогенных сред и систем в настоящее время исследованы лишь отдельные частные задачи. Гетерогенность систем значительно затрудняет математическое моделирование протекающих в них гидродинамических, вибрационных и акустических процессов.

При некоторых условиях, однако, моделирование колебательных и волновых процессов в таких системах можно существенно упростить. Если однотипных упругих стержневых элементов в жидкости достаточно много, то такую систему целесообразно рассматривать как псевдооднородный континуум с некоторыми эффективными свойствами, учитывающими взаимодействие элементов с жидкостью при колебательно-волновом движении. Использование концепции эффективных динамических свойств [5, 10] упрощает решение многих виброакустических задач и придает им прозрачный физический смысл.

В работе приведены некоторые основные результаты теоретических и экспериментальных исследований ГНЦ РФ-ФЭИ по виброакустической динамике дисперсных сред и гетерогенных систем, типичных для ядерных энергетических установок.

ВИБРОАКУСТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА ДИСПЕРСНЫХ СРЕД

Одним из типов гетерогенных сред, в которых эффекты межфазного взаимодействия играют существенную роль, являются дисперсные среды, образованные несущей жидкостью и частицами-включениями (твердыми частицами, каплями другой жидкости или пузырьками газа). Если такие дисперсные среды подвержены виброакустическим воздействиям, то их реакция или отклик определяется так называемой комплексной динамической плотностью, учитывающей процессы инерционного, вязкого и упругого взаимодействия несущей жидкости с включениями.

Эффективная динамическая плотность

Если в медленных (квазистационарных) процессах плотность дисперсной среды определяется по правилу смеси как сумма парциальных плотностей компонентов

$$\rho_{mix} = \rho(1 - \phi) + \rho_0\phi, \quad (1)$$

где ϕ – объемная концентрация включений; ρ , ρ_0 – плотности несущей жидкости и включений, то при виброакустических воздействиях плотность дисперсной среды как мера ее инерции не равна плотности смеси (1). В этом случае эффективная динамическая плотность дисперсной среды $\rho^*(i\omega)$, определяющая связь поверхности силы dP/dX , действующей на представительный элемент среды, с его колебательным ускорением dU/dt

$$- dP/dX = \rho^*(i\omega) \cdot dU/dt$$

является комплексной

$$\rho^*(i\omega) = \rho^*(\omega) - i\eta^*(\omega)/\omega, \quad (2)$$

где действительная и мнимая части – $\rho^*(\omega)$ и $\eta^*(\omega)$ – собственно динамическая плотность и трансляционная вязкость как мера инерции и вязкого демпфирования колебаний среды, существенно зависящие от частоты воздействий.

Физический смысл частотной зависимости комплексной плотности (2) заключается в том, что межфазное взаимодействие жидкости с включениями является инерционно-

вязким, а колебания включений по амплитуде и фазе отличаются от колебаний несущей жидкости.

Формулы для динамической плотности и трансляционной вязкости дисперсной среды имеют вид [5]

$$\rho^* = \rho + \rho(\Delta - 1) \cdot \varphi \cdot [(1 + \gamma)/(\Delta + \gamma) + (\omega\tau)^{-2}] / [1 + (\omega\tau)^{-2}], \quad (3)$$

$$\eta^* = \rho(1 - \Delta)^2 \cdot \varphi / t(\Delta + \gamma)[1 + (\omega\tau)^{-2}], \quad (4)$$

где γ – коэффициент присоединенной массы; $\Delta = \rho_0/\rho$ – относительная плотность включений; ω – частота колебаний; τ – время релаксации включений в жидкости.

Из формулы (3) следует, что динамическая плотность при $\omega\tau \rightarrow 0$ равна плотности смеси, а с ростом $\omega\tau$ значительно уменьшается, стремясь к минимальному значению.

Трансляционная вязкость дисперсной среды (4), обусловленная вязким трением между жидкостью и включениями, непрерывно увеличивается с ростом параметра $\omega\tau$.

Значительный интерес представляют динамические свойства двухфазных пузырьковых сред, определяющих вибрационные характеристики контактирующих с ними конструктивных элементов ЯЭУ (труб, пучков стержней и т.п.), а также акустические свойства – скорость и затухание звука.

При достаточно высокочастотных колебаниях ($\omega\tau \gg 1$) зависимости для динамической плотности и трансляционной вязкости пузырьковых сред от объемного газосодержания φ имеют вид [6]

$$\omega_0^*/\rho = (1 - \varphi) / (1 + 2\varphi), \quad (5)$$

$$(\eta^*/\eta)\alpha\delta = 18\varphi / (1 + 2\varphi)^2, \quad (6)$$

где ρ , η – плотность и вязкость жидкости; α – радиус пузырьков; $\delta = (2\eta/\rho\omega)^{1/2}$ – толщина вязкого пограничного слоя на поверхности пузырьков.

Как видно из сравнения формул (5) и (1) (при $\rho_0 = 0$), динамическая плотность пузырьковой среды оказывается в $(1+2\varphi)$ раз меньше статической плотности смеси.

На рисунке 1 показаны теоретические зависимости (5), (6) и экспериментальные данные [6].

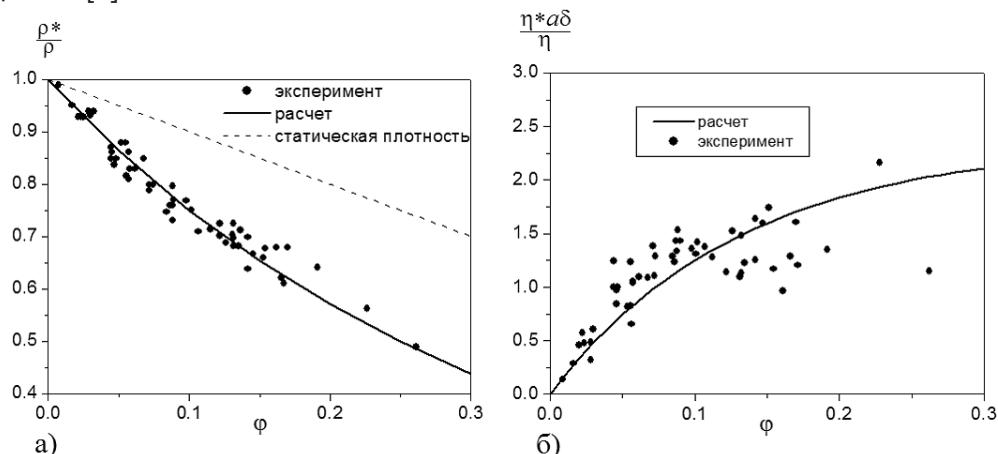


Рис. 1. Динамическая плотность (а) и трансляционная вязкость (б) дисперсной пузырьковой среды

Следует отметить, что динамические свойства пузырьковых сред при определенных частотах виброакустических воздействий имеют резонансные зависимости, обусловленные тем, что сжимаемые и деформируемые газовые пузырьки в жидкости представляют собой осцилляторы монопольного и квадрупольного типа. Математические модели таких резонансных особенностей динамики пузырьковых сред приведены в [7, 8].

Дисперсной средой другого типа является композит, образованный сплошной упру-

гой матрицей и твердыми частицами-включениями. В таком дисперсном композите частицы являются осцилляторами из-за упругих сил, действующих со стороны упругой матрицы при отклонении включений от равновесного положения. Вследствие этого включения-осцилляторы имеют некоторую собственную частоту колебаний в упругой матрице, а комплексная динамическая плотность (2) и ее действительная и мнимая части имеют следующие резонансные частотные зависимости [5, 9]:

$$\frac{\rho^*}{\rho} = 1 + \left[\left(\left(\frac{\omega_0^2}{\omega^2} - \frac{1+\gamma}{\Delta+\gamma} \right) \left(\frac{\omega_0^2}{\omega^2} - 1 \right) + \frac{4h^2}{\omega^2} \right) / \left(\left(\frac{\omega_0^2}{\omega^2} - 1 \right)^2 + \frac{4h^2}{\omega^2} \right) \right] (\Delta - 1) \varphi, \quad (7)$$

$$\eta^* = 2h\rho\varphi(\Delta - 1)^2 / (\Delta + \gamma) \left[\left(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \right)^2 + \left(\frac{2h}{\omega} \right)^2 \right]. \quad (8)$$

Здесь ω_0 , h – собственная частота и коэффициент затухания колебаний включений-осцилляторов. Остальные обозначения те же, что и для жидкой дисперсной среды.

Как видно из формул (7), (8), важнейшим динамическим параметром дисперсного композита, определяющим его резонансные свойства, является собственная частота поступательных колебаний включений в упругой матрице ω_0 .

Характерный вид резонансных зависимостей динамической плотности и трансляционной вязкости и их сравнение с экспериментальными данными показан на рис. 2.

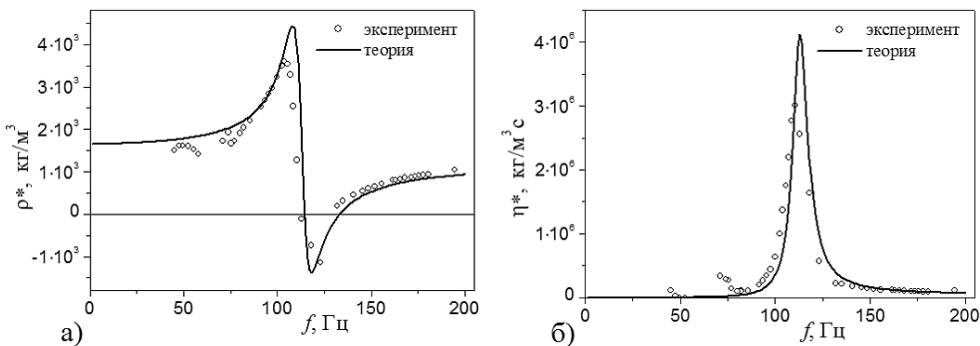


Рис. 2. Динамическая плотность (а) и трансляционная вязкость (б) дисперсного композита

Использование понятия динамической плотности и трансляционной вязкости означает переход к континуальному описанию колебательно-волновых процессов в «эффективной сплошной среде», для которой волновое уравнение имеет вид

$$\rho^* \frac{\partial^2 X}{\partial t^2} + \eta^* \frac{\partial X}{\partial t} = \left(K^* + \frac{4}{3} \mu^* \right) \frac{\partial^2 X}{\partial x^2},$$

где ρ^* , η^* – эффективные инерционные и вязкие свойства; K^* , μ^* – эффективные упругие свойства (модули объемной и сдвиговой упругости).

Из решения волнового уравнения для гармонических волн сжатия в жидкой дисперсной среде или в дисперсном композите следуют зависимости для скорости распространения и затухания звука.

Для жидких дисперсных сред типа супензий и эмульсий со свободно взвешенными в жидкости включениями имеют место релаксационные зависимости скорости и затухания звука от частоты, а для пузырьковых сред и дисперсных композитов с включениями-осцилляторами разных типов – резонансные.

Характерный вид резонансных зависимостей скорости и затухания звука в дисперсном композите показан на рис. 3.

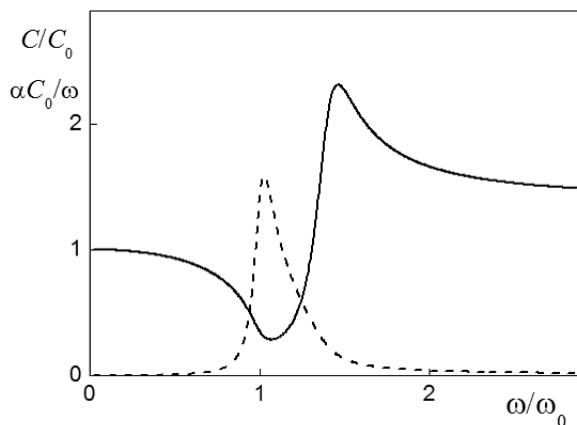


Рис. 3. Резонансные зависимости скорости звука (сплошная кривая) и коэффициента затухания (пунктир) в дисперсном композите (C_0 – скорость низкочастотного звука при $\omega \ll \omega_0$)

ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТИ С ПУЧКОМ УПРУГИХ СТЕРЖНЕЙ

Аналогичным образом в рамках континуального подхода и концепции эффективных динамических свойств рассматривается виброакустическая динамика насыщенных жидкостью упругих пористых сред или таких гетерогенных систем, как ансамбли тепловыделяющих сборок в активной зоне реактора, твэлы в ТВС или пучки труб в теплообменных аппаратах и парогенераторах.

Такие системы целесообразно рассматривать как анизотропные гетерогенные среды с включениями-осцилляторами (стержнями или трубами, имеющими некоторые собственные частоты изгибных колебаний).

Динамическая плотность и трансляционная вязкость такой гетерогенной среды для колебаний в нормальном к осям стержней направлении определяются формулами [5, 10]

$$\frac{\rho^*}{\rho} = 1 + \left[\left(\frac{1+\gamma}{\Delta+\gamma} \left(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \right) + \frac{4h^2}{\omega^2} \right) / \left(\left(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \right)^2 + \frac{4h^2}{\omega^2} \right) \right] \left((\Delta-1) - (\Delta+\gamma) \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \right) \varphi, \quad (9)$$

$$\eta^* = 2\rho\varphi(\Delta+\gamma) \left(\frac{\omega_0^2}{\omega^2} + \frac{1-\Delta}{\Delta+\gamma} \right) h / \left[\left(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \right)^2 + \frac{4h^2}{\omega^2} \right]. \quad (10)$$

Здесь использованы те же обозначения, что и для дисперсных композитов, имеющих аналогичные резонансные свойства.

Характерной особенностью стержневых систем в жидкости является резонансная частотная зависимость динамической плотности и трансляционной вязкости, обусловленная резонансом колебаний упругих стержней при частоте воздействий, близкой к их собственной частоте ω_0 .

На рисунке 4 представлены зависимости динамической плотности и трансляционной вязкости (в безразмерной форме) от отношения частоты воздействий к собственной частоте колебаний стержней. Здесь же представлены результаты экспериментальных исследований, удовлетворительно подтверждающие теорию.

Важно отметить, что динамическая плотность такой гетерогенной среды в определенном частотном диапазоне воздействий принимает отрицательные значения, придающие особый смысл задачам виброакустической динамики гидроупругих стержневых систем.

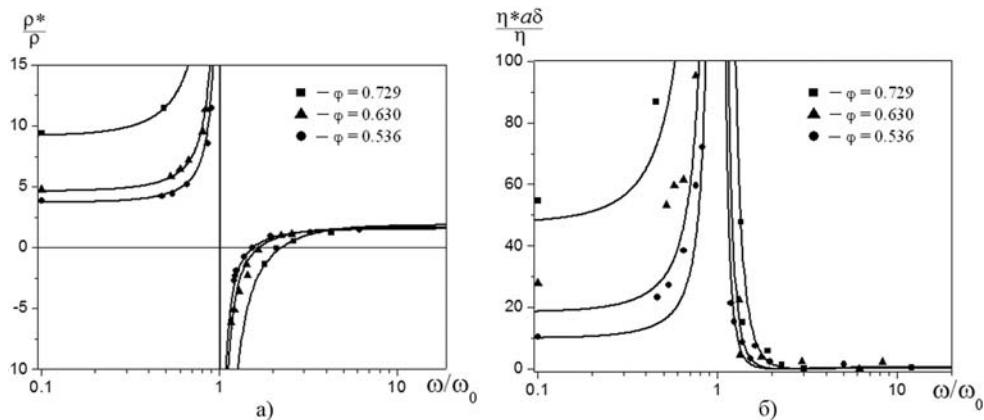


Рис. 4. Резонансные зависимости динамической плотности (а) и трансляционной вязкости (б) жидкости с пучком упругих стержней. Кривые – формулы (9), (10); точки – экспериментальные данные при различной концентрации стержней в пучке

В качестве иллюстрации континуального подхода и концепции эффективных динамических свойств гетерогенных сред к задачам виброакустической динамики систем, типичных для ЯЭУ, рассмотрим два характерных примера.

Колебания оболочки с жидкостью и пучком упругих стержней

Известно, что собственные частоты колебаний оболочки, заполненной жидкостью, зависят как от геометрических параметров, упругих свойств и плотности материала оболочки, так и от свойств жидкости. Инерционное воздействие жидкости на колеблющуюся оболочку определяется присоединенной массой, зависящей от формы оболочечных колебаний и плотности жидкости. Формула для собственных частот оболочечных колебаний имеет вид

$$\Omega_n^2 = \omega_n^2 / \left(1 + \frac{M}{\rho_s h_s} \right) = \omega_n^2 / \left(1 + \frac{R}{h} \frac{\rho}{\rho_s} \left(\frac{n}{n^2 + 1} \right) \right), \quad (11)$$

где ω_n – собственные частоты пустой оболочки; ρ , ρ_s – плотность жидкости и оболочки толщиной h ; n – число изгибных волн по периметру оболочки.

Подобным образом жидкость с пучком упругих стержней оказывает инерционное воздействие на колеблющуюся оболочку (рис. 5а). В этом случае, однако, инерционное воздействие определяется эффективной динамической плотностью $\rho^*(\omega)$, резонансным образом зависящей от частоты. При этом соотношение для собственных частот (11) становится биквадратным уравнением для частоты оболочечных колебаний Ω_n [11, 12]

$$\Omega_n^4 \left(1 + \frac{R\rho_1^*}{\rho_s} \frac{n}{n^2 + 1} \right) - \Omega_n^2 \omega_0^2 \left(1 + \frac{R\rho_2^*}{h_s \rho_s} \frac{n}{n^2 + 1} + \frac{\omega_n^2}{\omega_0^2} \right) + \omega_n^2 \omega_0^2 = 0, \quad (12)$$

где ρ_1^* и ρ_2^* определяются по формулам

$$\rho_1^* = \rho \left[1 + \frac{(1+\gamma)(\Delta-1)\varphi}{\Delta+\gamma} \right], \quad \rho_2^* = \rho \left[1 + (1+\gamma)\varphi \right],$$

дающим предельные значения динамической плотности стержневой гетерогенной среды при $\omega \gg \omega_0$ и $\omega \ll \omega_0$.

Собственная частота изгибных колебаний стержней в жидкости, входящая в уравнение (12), определяется по формуле

$$\omega_0 = \frac{2\chi^2}{dL^2} \sqrt{\frac{EJ}{\pi(\rho_0 + \rho\gamma)}},$$

где d, L – диаметр и длина стержней; EJ – изгибная жесткость; χ – коэффициент, характеризующий условия закрепления.

Решение биквадратного уравнения (12) дает для каждого значения n по две собственные частоты, представленные на рис. 5б светлыми «точками».

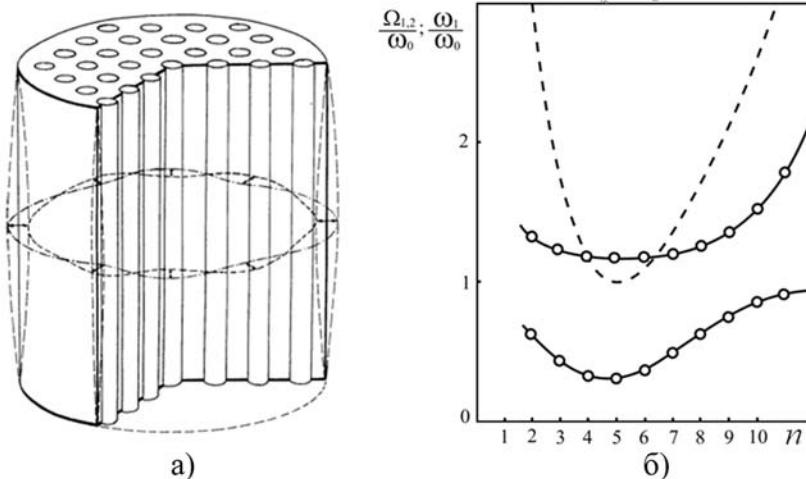


Рис.5. а). Колебания оболочки с жидкостью и пучком упругих стержней. б). Собственные частоты колебаний оболочки с жидкостью и пучком стержней

В предельном случае колебаний оболочки с однородной жидкостью ($\varphi = 0$) или колебаний пустой оболочки ($\varphi = 0, \rho = 0$) уравнение (12) приводит к известному из теории колебаний оболочек результату (пунктирная кривая на рис. 5б).

Отметим, что, в отличие от пустой оболочки или оболочки с однородной жидкостью, здесь зависимость собственных частот от формы колебаний n имеет две дисперсионные ветви, соответствующие синфазным и противофазным колебаниям оболочки и пучка стержней. Такой результат обусловлен тем, что оболочка и пучок стержней представляют собой инерционно связанную через жидкость колебательную систему с двумя степенями свободы для каждого числа волн по периметру оболочки.

При вынужденных колебаниях оболочки на собственных частотах инерционно связанной колебательной системы возникают резонансы. Амплитуды резонансных колебаний оболочки зависят от гидродинамического демпфирования или от трансляционной вязкости гетерогенной среды. Рассчитанная амплитудно-частотная характеристика оболочки представлена на рис. 6, из которого видно, что система имеет два резонансных диапазона частот и промежуточный частотный диапазон, в котором резонансы отсутствуют. Такая особенность обусловлена отрицательной динамической плотностью гетерогенной среды в определенном диапазоне частот воздействий.

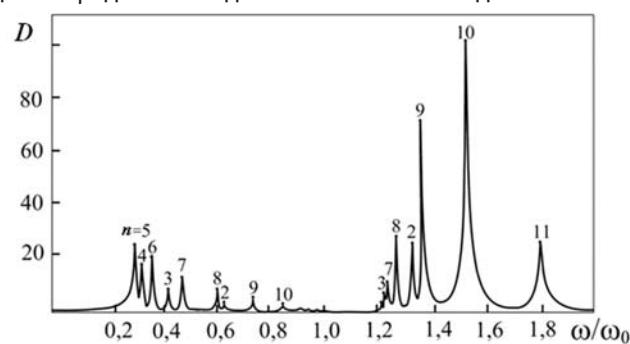


Рис.6. Амплитудно-частотная характеристика колебаний оболочки

Колебания свободной поверхности жидкости в баке с пучком стержней

Рассмотрим теперь собственные колебания жидкости со свободной поверхностью в цилиндрическом баке, содержащем пучок жестких стержней (рис. 7а). Такие колебания могут происходить, в частности, при сейсмических воздействиях или из-за неустойчивости при заливе и сливе жидкости из системы. В задачах такого типа жидкость и пучок стержней также целесообразно рассматривать как гетерогенную среду с эффективной динамической плотностью ρ^* .

В отличие от рассмотренной выше задачи о колебаниях оболочки здесь колебания жидкости происходят как в продольном направлении z , так и в радиальном r . Из-за анизотропии пучка стержней динамическая плотность гетерогенной среды является тензором, и его компоненты для продольного и радиального (поперечного) направлений отличаются.

В упрощенном случае, т.е. при достаточно жестких стержнях пучка и низких частотах колебаний жидкости, формулы для «продольной» и «поперечной» динамической плотности эффективной среды имеют вид

$$\rho^* = \rho/(1 - \varphi) \text{ и } \rho^* = \rho(1 + \varphi)/(1 - \varphi) .$$

В наиболее простой постановке задача сводится к решению уравнения Лапласа для потенциала плотности импульса, включающего в себя тензор динамической плотности анизотропной гетерогенной среды, и динамического граничного условия на свободной поверхности.

Решение для наиболее значимой первой формы гравитационных колебаний жидкости и собственной частоты дает формулу [13]

$$\omega_1^2 = \frac{\lambda_1 g}{R\sqrt{1+\varphi}} \operatorname{th}\left(\lambda_1 \frac{H}{R\sqrt{1+\varphi}}\right), \quad (13)$$

где R – радиус бака; H – уровень жидкости; g – ускорение свободного падения; φ – концентрация стержней в пучке; $\lambda_1 = 1,841$ – первый корень уравнения $dI_1(\lambda)/d\lambda = 0$ (I_1 – функция Бесселя).

В отличие от известного результата для собственных частот колебаний однородной жидкости в данной задаче радиус резервуара имеет сомножитель $(1 + \varphi)^{1/2}$, учитывающий влияние пучка стержней.

Таким образом, квадрат собственной частоты колебаний жидкости в баке с пучком стержней будет таким же, как в баке без стержней, но с увеличенным в $(1 + \varphi)^{1/2}$ раз радиусом.

На рисунке 7б представлена теоретическая зависимость (13) и экспериментальные данные [13] по собственным частотам для различных концентраций пучков стержней и разных уровней заполнения бака жидкостью. Данные 2, 3, 4 соответствуют пучкам стержней с относительным шагом 1,3; 1,2; 1,1. На этом же рисунке представлены данные 1 для колебаний жидкости без пучка стержней.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многие задачи вибраакустической динамики гетерогенных сред, систем и конструкций, типичных для ядерных энергетических установок, целесообразно рассматривать на основе континуального подхода и концепции эффективных динамических свойств. Такой подход существенно упрощает постановку и решение (аналитическое или численное) задач вибраакустической динамики и придает им прозрачный физический смысл.

Рассмотренные примеры применения континуального подхода к задачам динамики систем и конструкций, содержащих жидкость и пучки стержней или труб, основаны на

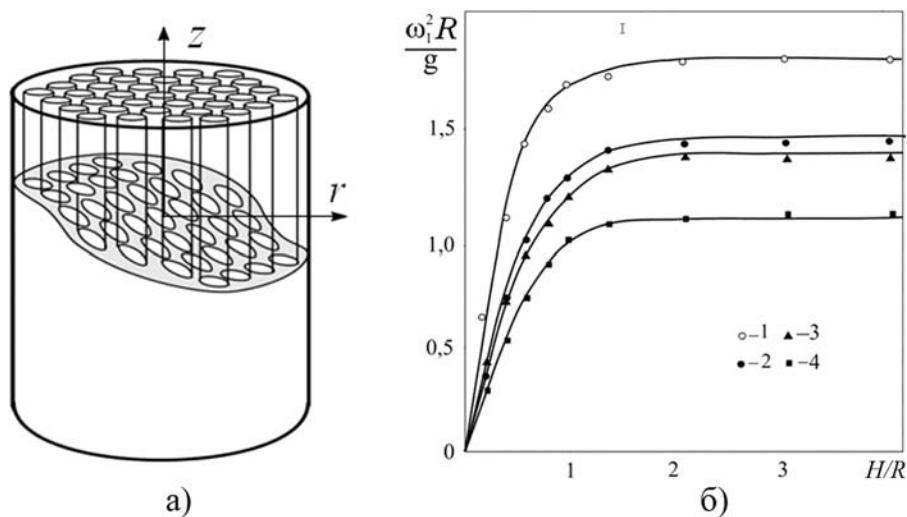


Рис.7. а). Жидкость со свободной поверхностью в баке с пучком стержней. б). Зависимость собственной частоты колебаний свободной поверхности жидкости в баке с пучком стержней от уровня заполнения H и относительного шага пучка стержней

заранее определенных эффективных динамических свойствах гетерогенных сред и позволяют вычислить интегральные вибродинамические характеристики систем, отражающие специфику резонансного взаимодействия компонентов той или иной системы.

Следует отметить, что для естественных или искусственных гетерогенных сред виброакустические воздействия обычно бывают внешними. При этом наиболее важными для таких сред являются эффективные динамические свойства и такие характеристики, как скорость распространения и затухание возмущений. В стержневых же системах и конструкциях ЯЭУ вибрационная динамика в значительной мере зависит не только от внешних динамических воздействий, но и от гидродинамического воздействием потока теплоносителя, определяющего интенсивность виброакустических процессов.

Наконец следует отметить, что основные положения и результаты виброакустической динамики дисперсных сред и стержневых гетерогенных систем могут служить основой для совершенствования методов виброакустической диагностики состояния конструкций и теплоносителя ЯЭУ.

Литература

1. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Т. 1, 2. – М.: Наука. 1987.
2. Николаевский В.Н., Басниев К.С., Горбунов А.Т., Зотов Г.А. Механика насыщенных пористых сред. – М.: Недра. 1970.
3. Кристенсен Р.М. Введение в механику композитов. – М.: Мир. 1982.
4. Артоболевский И.И., Бобровницкий Ю.И., Генкин М.Д. Введение в акустическую динамику машин. – М.: Наука. 1979.
5. Федотовский В.С. О динамике гетерогенных сред при виброакустических воздействиях. / Труды Математического центра им. Н.И. Лобачевского. – Казань: Изд-во Казан. матем. общества. –2002. –Т. 16.
6. Федотовский В.С., Прохоров Ю.П., Верещагина Т.Н. Динамическая плотность и скорость распространения волн давления в дисперсных средах. // Теплоэнергетика. – 2001. – Т. 48. – № 3. – С. 70-74.
7. Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г., Шрейбер И.Р. Волновая динамика газо-парожидкостных сред. – М.: Энергоатомиздат. 1990.
8. Федотовский В.С., Верещагина Т.Н. Низкочастотная резонансная дисперсия звука в пузырьковых средах. // Акустический журнал. – 2009. – Т. 55. – № 6. – С. 712-718.

9. *Федотовский В.С., Верещагина Т.Н.* Резонансная дисперсия продольных волн в дисперсных композитах. // Акустический журнал. – 2010. – Т. 56. – № 4. – С. 497-504.
10. *Федотовский В.С.* Концепция эффективных динамических свойств гетерогенных систем при вибраакустических воздействиях. / Труды Международной конференции «Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР». – Обнинск: 1998. – Т. 1. – С. 200 -215.
11. *Федотовский В.С., Прохоров Ю.П., Верещагина Т.Н.* Гидродинамически связанные колебания концентрических оболочек с пучками стержней или труб. // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. – Вып. 1. – 1998.
12. *Fedotovskii V.S., Lunina S.V., Pilshchikova E.A.* Natural vibrations of cylindrical shell containing fluid and rods bundles. 11 International Conference on Vibration Problem. ICOVP. / 9-12 September, 2013, Lisbon, Portugal. 2013. ID70.
13. *Федотовский В.С.* Колебания жидкости со свободной поверхностью в резервуаре, содержащем пучок стержней. // Энергетика. – 1991. – № 3.

Поступила в редакцию 20.12.2013 г.

Авторы

Федотовский Владимир Сергеевич, главный научный сотрудник, ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ»,
доктор техн. наук.

E-mail: fedotovsky@ippe.ru

Верещагина Татьяна Николаевна, ученый секретарь, ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ»,
доктор техн. наук.

E-mail: vtm@ippe.ru

Лунина Светлана Валерьевна, инженер-исследователь, ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ».
E-mail: slunina@ippe.ru

Иванова Евгения Александровна, инженер-исследователь, ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ».
E-mail: epilshchikova@ippe.ru

VIBROACOUSTIC DYNAMICS OF HETEROGENEOUS MEDIA AND NPP STRUCTURES

Fedotovskij V.S., Vereschagina T.N., Lunina S.V., Ivanova E.A.

State Scientific Center of the Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering named after A.I. Leypunsky, Obninsk, Kaluga reg., Russia

ABSTRACT

Vibroacoustic dynamics of heterogeneous media and systems includes a wide range of research areas. These include the dynamics of multiphase dispersed media, saturated with liquid natural or artificial porous media and composite materials. One of the most important areas is vibroacoustic dynamics of machines and devices and nuclear power plants, in particular. Such parts of a NPP, as the core, consisting of a large number of fuel assemblies, fuel assemblies consisting of bundles of fuel elements, heat exchangers and steam generators with tube bundles, in some dynamic problems should be treated as pseudohomogeneous medium with some effective dynamic properties, reflecting the processes of interaction of the rode-shaped elements with the coolant.

The results of theoretical and experimental studies describing the dynamics of dispersed media and heterogeneous systems from the unified position are given in this paper. Thus, in particular, the dependencies for effective dynamic density and viscosity of liquid translational dispersion media reflecting a relaxation nature sound dispersion in suspensions emulsions and two-phase bubble media were obtained. Resonant dependencies for solid dispersion media (composites) as well as for bundles of elastic rods or tubes in a liquid coolant resulting in significant and vibroacoustic effects of practical importance were also obtained. To illustrate the feasibility and effectiveness of using the concept of effective dynamic properties of heterogeneous media dynamic problems of free oscillations of a shell with a liquid and a bunch of elastic rods as well as gravitational oscillations of a fluid with a free surface in a tank with a bundle of rods are considered.

Keywords: heterogeneous media, dispersion media, dynamic density, vibroacoustic dynamics, shell, bundle of elastic rods

REFERENCES

1. Nigmatulin R.I. *Dinamika mnogofaznyh sred. T. 1, 2* [Dynamics of multiphase media. Vols 1, 2]. – Moskow, Nauka Publ. 1987.
2. Nikolaevskij V.N., Basniev K.S., Gorbunov A.T., Zotov G.A. *Mehanika nasyschennyh poristyh sred* [Mechanics of saturated porous media.]. Moskow, Nedra Publ. 1970.
3. Kristensen R.M. *Vvedenie v mehaniku kompozitov* [Introduction to Mechanics of Composites]. Moskow, Mir Publ. 1982.
4. Artobolevskij I.I., Bobrovnickij Yu.I., Genkin M.D. *Vvedenie v akusticheskuyu dinamiku mashin* [Introduction to acoustic dynamics of machines]. Moskow, Nauka Publ. 1979.
5. Fedotovskij V.S. *O dinamike geterogenykh sred pri vibroakusticheskikh vozdejstviyah. Trudy Matematicheskogo centra im. N.I. Lobachevskogo. [On the dynamics of heterogeneous media with vibroacoustic effects. Proceedings of the Mathematical Center of the N.I. Lobachevsky.]. Kazan', Kazanskoe matematicheskoe obschestvo Publ. 2002, vol. 16.* (in Russian)
6. Fedotovskij V.S., Prohorov Yu.P., Vereshchagina T.N. *Dinamicheskaya plotnost' i skorost' rasprostraneniya voln davleniya v dispersnyh sredah* [Dynamic density and velocity of

- propagation of pressure waves in dispersive media]. *Teploenergetika*. 2001, vol. 48, no. 3, pp. 70–74.
7. Nakoryakov V.E., Pokusaev B.G., Shrejber I.R. *Volnovaya dinamika gazo- parozhidkostnyh sred* [Wave dynamics of gas-vapor-liquid media]. Moskow, Energoatomizdat Publ. 1990.
8. Fedotovskij V.S., Vereshchagina T.N. *Nizkochastotnaya rezonansnaya dispersiya zvuka v puzyr'kovyh sredah* [Low-frequency resonance of dispersion of sound in bubbly media]. *Akusticheskij zhurnal*. 2009, vol. 55, no. 6, pp. 712–718.
9. Fedotovskij V.S., Vereshchagina T.N. *Rezonansnaya dispersiya prodol'nyh voln v dispersnyh kompozitah* [Resonance dispersion of longitudinal waves in dispersive composites]. *Akusticheskij zhurnal*. 2010, vol. 56, no. 4, pp. 497–504.
10. Fedotovskij V.S. *Koncepciya effektivnyh dinamicheskikh svojstv geterogennyh sistem pri vibroakusticheskikh vozdejstviyah*. Trudy mezhdunarodnoj konferencii «Teplofizicheskie aspeкty bezopasnosti WWER». [The concept of effective dynamic properties of heterogeneous systems with vibro-acoustic effects. Proceedings of the Intl. conf. «Thermal WWER safety aspects»]. Obninsk. 1998. vol. 1. pp. 200–215. (in Russian)
11. Fedotovskij V.S., Prohorov Yu.P., Vereshchagina T.N. *Gidrodinamicheski svyazannye kolebaniya koncentricheskikh obolochek s puchkami sterzhnej ili trub* [Hydrodynamically coupled oscillations of concentric shells with bundles of rods or tubes]. *Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Ser.: Fizika yadernyh reaktorov*. 1998, iss. 1.
12. Fedotovskii V.S., Lunina S.V., Pilshchikova E.A. Natural vibrations of cylindrical shell containing fluid and rods bundles. 11 International Conference on Vibration Problem. ICOVP. / 9-12 September, 2013, Lisbon, Portugal. 2013. ID70.
13. Fedotovskij V.S. *Kolebaniya zhidkosti so svobodnoj poverhnost'yu v rezervuare, soderzhashchem puchok sterzhnej* [Oscillations of the liquid with a free surface in a tank containing a bundle of rods]. *Energetika*. 1991, no. 3.

Authors

Fedotovskij Vladimir Sergeevich, Chief Scientific Officer, FSUE «SSC RF-IPPE»,
Dr. Sci. (Engineering).

E-mail: fedotovsky@ippe.ru

Vereschagina Tat'yana Nikolaevna, Scientific Secretary, FSUE «SSC RF-IPPE»,
Dr. Sci. (Engineering).
E-mail: vtn@ippe.ru

Lunina Svetlana Valer'evna, Research Engineer, FSUE «SSC RF-IPPE».
E-mail: slunina@ippe.ru

Ianova Evgeniya Aleksandrovna, Research Engineer, FSUE «SSC RF-IPPE».
E-mail: epilschikova@ippe.ru