

УДК 532.59
DOI 10.17223/19988621/51/7

А.Ю. Боталов, С.П. Родионов

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЖИДКОГО НАПОЛНИТЕЛЯ НА СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ТЕЛА, ИМЕЮЩЕГО ОДНУ СТЕПЕНЬ СВОБОДЫ

Рассматриваются свободные колебания твердого тела с одной степенью свободы, имеющего полость прямоугольной формы, частично заполненную вязкой жидкостью. В полости располагаются вставки в виде горизонтальных и вертикальных непроницаемых перегородок, и вертикальных решеток. Исследуется влияние движения жидкости в полости на скорость диссипации энергии колебаний твердого тела при различных положениях вставок.

Ключевые слова: емкость с жидкостью, свободные колебания, волновое движение жидкости, обтекание решеток.

Задачи динамики тел с полостями, частично заполненными жидкостью, имеют важное теоретическое и практическое значение. Одним из ключевых приложений данных задач является разработка эффективного демпфера вибраций различных конструкций: высотных зданий при ветровой нагрузке, нефтяных платформ. В качестве такого эффективного демпфера могут использоваться резервуары, частично заполненные жидкостью, с частотой собственных колебаний жидкости, согласующейся с собственной частотой колебания конструкции (TLD – Tuned Liquid Damper). При этом жидкость воздействует на конструкцию с силой, находящейся в противофазе к внешней нагрузке [1]. В настоящее время основное внимание уделяется исследованию демпферов с малым заполнением сосуда, когда становятся применимы уравнения мелкой воды [2, 3]. В результате проведенных численных и экспериментальных исследований были построены полуаналитические модели поведения демпферов, учитывающие влияние обрушения поверхностных волн [2], вставок в сосуде [3, 4], сложной геометрии дна сосуда [5] и др. В частности, было показано, что для случая малого заполнения применение V-образной формы дна [5] и наклонных решеток [4] приводит к интенсификации диссипативных процессов в жидкости и уменьшению амплитуды колебания жидкости.

В случае глубокого заполнения сосуда используют уравнения потенциального течения жидкости [6, 7], однако при наличии решеток и перегородок для моделирования демпферов необходимо использовать полную систему уравнений Навье – Стокса [8].

В данной работе представлены результаты численного исследования влияния прямоугольной полости, частично заполненной жидкостью, на прямолинейные свободные колебания твердого тела, проведенного в нелинейной постановке в случае глубокого заполнения сосуда.

Постановка задачи

Пусть тело имеет полость в форме параллелепипеда, частично заполненную вязкой несжимаемой жидкостью с физическими свойствами воды, и совершает прямолинейные свободные колебания под действием линейной возвращающей силы: $F_k = -Kx_S$. Также на тело действует сила трения: $F_c = -C\dot{x}_S$. Пренебрегая влиянием стенок полости, нормаль которых перпендикулярна плоскости движения тела, рассмотрим задачу в плоской постановке. Полость имеет размеры $L \times H$ и заполнена до глубины h . Массы тела и жидкости на единицу длины равны M и m соответственно (рис. 1).

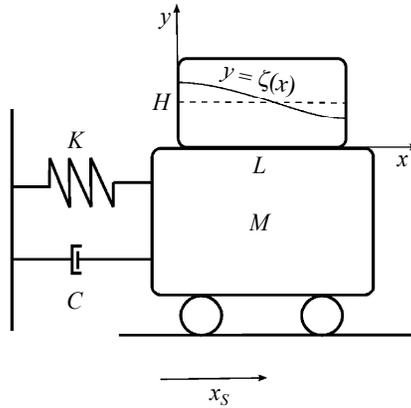


Рис. 1. Схема конструкции
Fig. 1. Schematic construction

Математическая постановка задачи

Уравнения, описывающие динамику системы «тело+жидкость», записанные для случая $\rho = \text{const}$, имеют вид

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0; \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (\mathbf{u}\mathbf{u}) = -\nabla p + \mu \Delta \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} - \rho \ddot{x}_S \mathbf{i}, \quad (2)$$

$$\ddot{x}_S + 2\delta_S \omega_0 \dot{x}_S + \omega_0^2 x_S = -\frac{\rho}{m+M} \frac{d}{dt} \int_0^L \int_0^{\zeta(x)} (\mathbf{u} \cdot \mathbf{i}) dV. \quad (3)$$

Начальные условия:

$$t = 0: x_S = x_0 \neq 0, \dot{x}_S = 0, u = v = 0. \quad (4)$$

Граничные условия:

$$\begin{cases} x = 0, L: & u = 0, \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \\ y = 0: & u = v = 0, \\ y = \zeta(x, t): & \frac{\partial \zeta}{\partial t} = v - u \frac{\partial \zeta}{\partial x}, \begin{cases} \mathbf{P} \cdot \mathbf{n} \cdot \mathbf{n} = 0, \\ \mathbf{P} \cdot \mathbf{n} \cdot \mathbf{s} = 0, \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

где $\omega_0^2 = K/(M + m)gL$, $\delta_s = C/\sqrt{(M + m)K}$, $y = \zeta(x, t)$ – уравнение свободной поверхности, $\mathbf{u} = u\mathbf{i} + v\mathbf{j}$ – вектор скорости, \mathbf{i}, \mathbf{j} – единичные векторы в направлении осей x и y . \mathbf{P} – тензор напряжений с компонентами $-p\delta_{ij} + \mu(\nabla_i u_j + \nabla_j u_i)$, \mathbf{n} и \mathbf{s} – соответственно нормальный и касательный единичные векторы к свободной поверхности. В данной модели пренебрегаем влиянием сил поверхностного натяжения, что оправдано применением на практике сосудов больших размеров.

Система (1) – (6) приводится к безразмерному виду при использовании следующих безразмерных переменных:

$$\tau = t\sqrt{\frac{g}{L}}, \mathbf{U} = \mathbf{u}\sqrt{\frac{1}{gL}}, P = \frac{p}{\rho gL}, X = \frac{x}{L}, Y = \frac{y}{L}, X_S = \frac{x_S}{x_0}.$$

При этом в безразмерную систему входят безразмерные параметры:

$$Re_g = \frac{\rho L^{3/2} \sqrt{g}}{\mu}, \tilde{h} = \frac{h}{L}, \tilde{m} = \frac{m}{M}, \Omega = \frac{\omega_0}{\omega_f}, \varepsilon = \frac{x_0}{L}, \delta_s,$$

где ω_f – частота первой моды колебания жидкости.

В расчетах безразмерные параметры задачи принимают следующие значения:

$$Re_g = 3 \cdot 10^6; \delta_s = 0.01; \tilde{h} = 0.5; \tilde{m} = 0.01; \Omega = 1; 0.001 \leq \varepsilon \leq 0.01. \quad (6)$$

В полости располагаются вставки в виде горизонтальных перегородок и вертикальных перегородок и решеток (рис. 2). Параметры вставок (d и S_n) изменяются в следующих диапазонах: для сплошных перегородок: $0.5 \leq d/h \leq 0.9$, для решеток: $0.3 \leq S_n \leq 0.7$, где $S_n = d_s/(d_s + d_l)$ – относительная высота пластин решеток. Безразмерное расстояние между решетками и перегородками полагается равным 0.2, а их безразмерная толщина – 0.01.

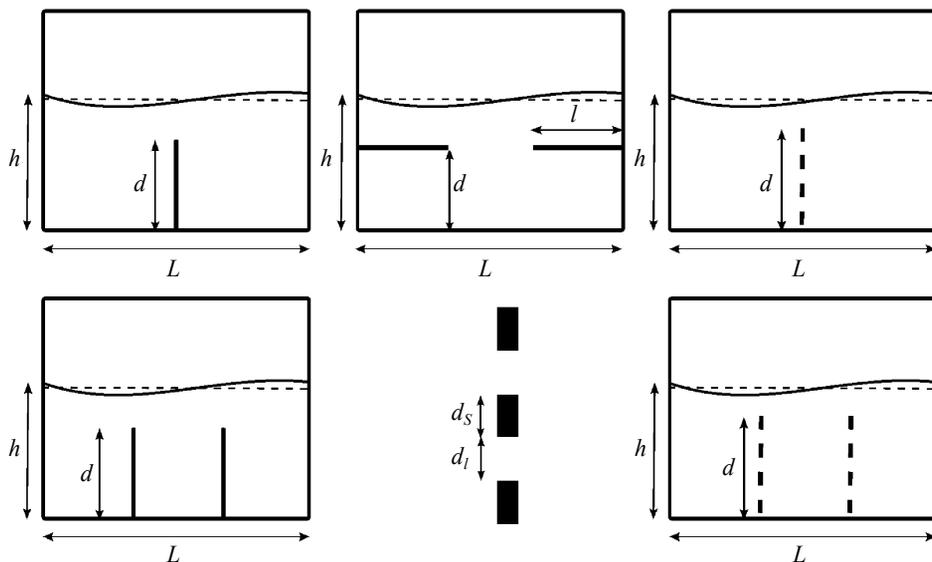


Рис. 2. Расположение перегородок в сосуде
 Fig. 2. Arrangement of baffle plates in the tank

Процедура численного решения

Решение гидродинамической части данной задачи (уравнения (1) – (3)) проводилось методом контрольного объема (КО) с использованием подхода Эйлера – Лагранжа (ALE) и алгоритма SIMPLER, реализованного на подвижной криволинейной сетке. Особенностью данного метода является перестроение расчетной сетки на каждом шаге по времени в соответствии с формой свободной поверхности, которая определяется из кинематического граничного условия. Данная методика решения описана в работе [9], при этом дискретизация уравнений (1) – (3) в области, границы которой изменяются с течением времени, проводится согласно [10].

В расчетах применяются ортогональные к свободной границе сетки, для построения которых используется метод, основанный на решении эллиптических уравнений [11]. В данном методе координаты узлов расчетной сетки удовлетворяют уравнениям Пуассона. Для моделирования твердых вставок (перегородок и решеток) применяется метод, описанный в [12], который заключается в блокировании контрольных объемов (КО), приходящихся на вставки. Число контрольных объемов 200×100 , причем увеличение количества КО в два раза приводит к изменению максимальной высоты свободной поверхности на величину, не превышающую 5%. Ограничения, накладываемые подвижностью сетки на временной шаг, представлены в работе [9]. Решение уравнения колебания тела (4) проводится методом BDF (Backward Differentiation Formula)-методом 2-го порядка точности.

Результаты расчетов

Наличие вставок в полости приводит к возникновению вихревого течения, причем тип вставок влияет на структуру данного течения. В работе [13] рассмотрен случай размещения в полости вертикальных перегородок. Показано, что при движении полости по гармоническому закону происходит периодический отрыв вихрей от перегородок, а при размещении нескольких перегородок отрывающиеся вихри начинают взаимодействовать в области между перегородками, что приводит к интенсификации диссипативных процессов в жидкости. В случае размещения в сосуде двух решеток за ними образуются две серии вихрей (рис. 3), которые также отрываются от вставок и взаимодействуют друг с другом. При уменьшении

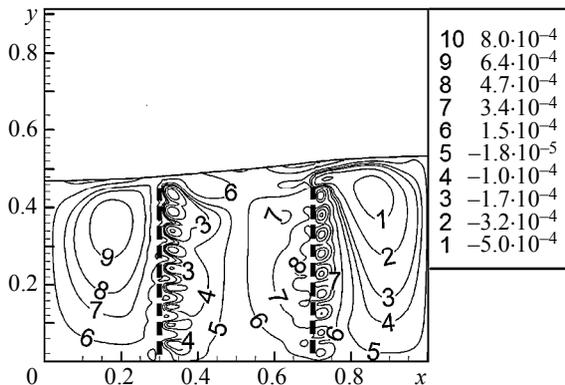


Рис. 3. Изолинии функции тока в сосуде, безразмерное расстояние между решетками 0.4

Fig. 3. Isolines of the stream function in the tank. The dimensionless distance between screens is of 0.4

расстояния между решетками повышается степень их взаимодействия, что приводит к интенсификации диссипативных процессов до тех пор, пока масштаб вихрей, определяемый расстоянием между решетками, не станет меньше определенного значения. Выбранное в работе значение безразмерного расстояния между решетками, равное 0.2, близко к такому значению.

Колебание сосуда,
частично заполненного жидкостью,
в турбулентном приближении

Во всех вышеперечисленных работах по численному исследованию данной задачи авторы используют предположение о ламинарности потока, однако сложное вихревое течение жидкости приводит к возможности перехода течения от ламинарной формы в турбулентную и необходимости использования мелких пространственных шагов в областях около решеток. Был проведен расчет колебаний сосуда, частично заполненного жидкостью, содержащего две решетки с использованием стандартной k - ϵ -модели и SST- k - ω -модели при помощи пакета OpenFOAM [14].

При расчете с применением SST- k - ω -модели была использована расчетная сетка, содержащая 160 000 контрольных объемов с измельчением вокруг решеток, обеспечивающим разрешение вязкого подслоя. В качестве граничных условий задавались: на границах решеток для k , ω и осредненной скорости течения жидкости задавались нулевые значения; на границах полости – для k и ω использовались пристеночные функции, для осредненной скорости течения жидкости принимались условия прилипания.

При использовании k - ϵ -модели использовалась расчетная сетка, содержащая 80 000 контрольных объемов с крупными ячейками около решеток. На границах полости и решеток для k и ϵ использовались пристеночные функции, для осредненной скорости течения жидкости принимались условия прилипания.

В начальный момент времени жидкость покоилась, поэтому в каждой точке расчетной области скорость жидкости и ее турбулентные характеристики полагались равными нулю.

Для проверки правильности расчета течения жидкости в колеблющемся сосуде с решетками в турбулентном приближении была рассмотрена задача о колебании сосуда по гармоническому закону: $x_s = A \sin(\omega t)$. Параметры задачи задавались в соответствии с работами [3] и [15]: $L = 0.966$ м, $h = 0.119$ м, $d_s = 5$ мм, 19 мм, 25 мм, $0.003 < A < 0.01$ м, $\omega = \omega_f$, $S_n = 0.42$.

На рис. 4 представлено сравнение расчетов с экспериментальными данными среднего за период коэффициента потерь давления [3] в зависимости от числа Келегана – Карпентера ($KC = \frac{2\pi U_m}{\omega d_s}$) [16]. В соответствии с работой [3] средний коэффициент потерь давления вычисляется по формуле

$$C_l = -\frac{3}{4} S_n \int_0^{2\pi} \frac{F \cos \theta}{\rho U_m^2 d_s} d\theta,$$

Здесь ρ – плотность жидкости, F – сила, действующая на решетку со стороны жидкости, $\theta = \omega t$, $U_m = \frac{\zeta \omega L}{\pi h} \sin\left(\frac{\pi}{L} x_m\right)$, ζ – амплитуда колебания свободной по-

верхности, x_m – координата расположения решетки. Из данного рисунка видно, что результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментом, причем, как и следовало ожидать, использование SST- k - ω -модели приводит к лучшему совпадению по сравнению с k - ϵ .

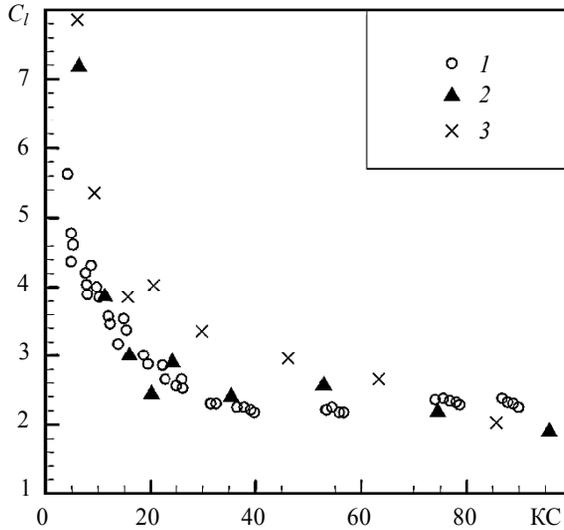


Рис. 4. Зависимость среднего за период коэффициента сопротивления решеток от числа Келегана – Карпентера, 1 – эксперимент; 2 – SST- k - ω -модель турбулентности; 3 – стандартная k - ϵ -модель турбулентности

Fig. 4. The period average resistance coefficient of baffles as a function of the Keulegan–Carpenter number: 1, experimental data; 2, SST k - ω turbulence model; and 3, k - ϵ turbulence model

Модель SST- k - ω была применена для расчета первоначальной задачи: движение тела с полостью, частично заполненной жидкостью, в которой расположены две решетки. Параметры данной задачи равны значениям (6) при $\epsilon = 0.01$ (максимальное значение, выбранное в работе) и $S_n = 0.4$. Было проведено сравнение результатов с применением ламинарной и турбулентной SST- k - ω -модели.

На рис. 5 изображена зависимость положения тела (X_s) и нормированной полной энергии системы (E) от времени, где

$$E = \left[\int (U + \epsilon \dot{X}_s)^2 dV + \int (\zeta - \tilde{h})^2 dX + \tilde{h} \epsilon^2 \frac{1 + \tilde{m}}{\tilde{m}} \omega_0^2 X_s^2 \right] / \left(\tilde{h} \epsilon^2 \frac{1 + \tilde{m}}{\tilde{m}} \omega_0^2 x_0^2 \right). \quad (7)$$

Как видно из данного рисунка, использование модели турбулентности не приводит к заметному изменению амплитуды колебания тела и поведению относительной полной энергии системы по сравнению с ламинарным случаем. Таким образом, при рассматриваемых параметрах эффекты турбулентности оказывают малое влияние на поведение интегральных характеристик (траектория колебаний тела, полная энергия системы). Из данного факта следует справедливость получаемых в работе выводов о поведении тела с сосудом, имеющим решетки и частично заполненным жидкостью, при рассмотрении ламинарной модели течения.

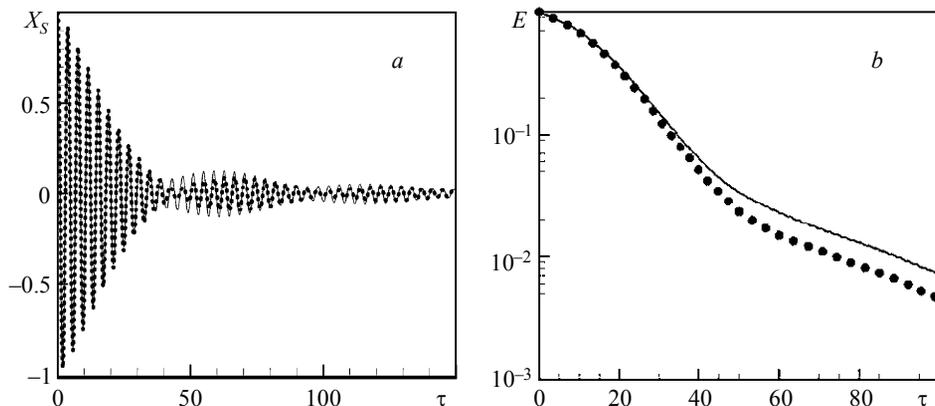


Рис. 5. Сравнение расчетов ламинарной и турбулентной модели при $\varepsilon = 0.005$ и $S_n = 0.4$: *a* – зависимость положения тела от времени; *b* – зависимость относительной полной энергии от времени. Линия – SST- $k-\omega$ -модель турбулентности. Точки – модель ламинарного течения

Fig. 5. Comparison of calculated results for the laminar and turbulent models at $\varepsilon = 0.005$ and $S_n = 0.4$: (a) time history of the body displacement and (b) relative total energy of the system as a function of time. The solid line indicates the SST $k-\omega$ turbulence model; the dotted line, the laminar model

Справедливость данного вывода подкрепляется также опытом исследователей, использующих ламинарную модель потока, часть работ которых процитирована выше.

Колебание тела с полостью, частично заполненной жидкостью, в ламинарном приближении

Рассмотрим свободные колебания тела с полостью, частично заполненной жидкостью. При заданных значениях параметров наличие полости с жидкостью приводит к сильным биениям колебаний тела. Это связано с тем, что энергия колебаний тела, переходящая в жидкость, не успевает диссипировать и переходит обратно в движение тела. Как отмечено выше, интенсифицировать диссипативные процессы в жидкости можно путем размещения в полости различных конфигураций вставок: вертикальных и горизонтальных перегородок, вертикальных решеток. На рис. 6 показана зависимость положения тела от времени для случаев колебания тела без полости с жидкостью и с полостью с жидкостью, в том числе для случая полости, в которой размещена вертикальная перегородка высотой $d/h = 0.7$. Видно, что размещение перегородки приводит к уменьшению амплитуды колебания твердого тела.

Скорость диссипации энергии колебаний твердого тела зависит от высоты и количества перегородок немонотонно. Так, в случае, когда диссипация энергии движения жидкости мала, например, когда в полости отсутствуют вставки, наблюдаются сильные биения, а при размещении вставок уменьшается амплитуда колебания свободной поверхности и снижается влияние полости на колебания тела. На рис. 7 показано изменение с течением времени полной энергии системы «тело+жидкость» (8), отнесенной к ее начальному значению, при размещении в полости вертикальных и горизонтальных перегородок и решеток. Параметры дан-

ных вставок соответствуют случаям максимальной диссипации энергии среди рассмотренных случаев для каждого типа вставок. Как видно из данного рисунка, наличие в полости двух решеток приводит к тому, что скорость диссипации энергии колебаний тела максимальна среди рассмотренных случаев. Это связано как раз с тем, что в случае наличия решеток возникают мелкомасштабные вихри, в которых происходит диссипация энергии движения жидкости. Также из этого рисунка можно сделать вывод о том, что скорость диссипации энергии системы слабо зависит от числа перегородок, но сильно зависит от вида перегородок (сплошные перегородки или решетки).

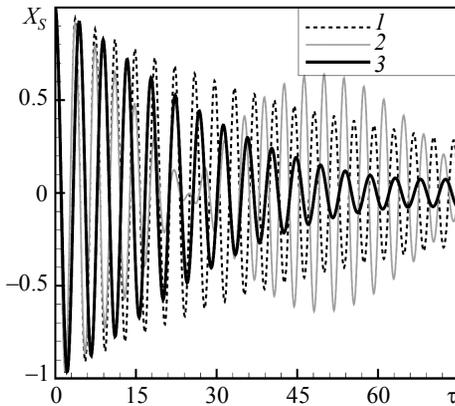


Рис. 6. Зависимость положения тела от времени при $\varepsilon = 0.005$, 1 – без сосуда с жидкостью, 2 – с сосудом с жидкостью, 3 – с сосудом, в котором расположена перегородка ($d/h = 0.7$)

Fig. 6. Time history of the body displacement at $\varepsilon = 0.005$: 1, without a tank containing a fluid; 2, with a tank containing a fluid; and 3, with a tank equipped with a baffle ($d/h = 0.7$)

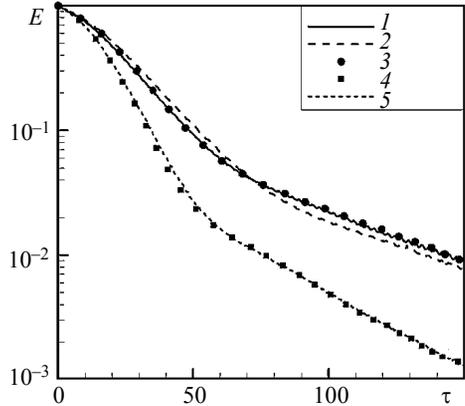


Рис. 7. Зависимость нормированной полной энергии системы от времени: 1 – одна перегородка ($d/h = 0.7$), 2 – две перегородки ($d = 0.7$), 3 – две горизонтальные перегородки ($d = 0.7$), 4 – две решетки, 5 – три решетки, $\varepsilon = 0.005$

Fig. 7. Normalized total energy of the system as a function of time: 1, one baffle ($d/h = 0.7$); 2, two baffles ($d = 0.7$); 3, two horizontal baffles ($d = 0.7$); 4, two screens; and 5, three screens at $\varepsilon = 0.005$

Поскольку рассматриваемая система уравнений является нелинейной, то относительная высота пластин решеток (S_n), при которых диссипация энергии максимальна, зависит от начального отклонения полости (ε). Так, из рис. 8, *a* видно, что при $\varepsilon = 0.001$ быстрее всего уменьшается энергия колебаний в случае наличия двух решеток с $0.6 < S_n < 0.7$. При увеличении ε относительная высота пластин, при которой диссипация энергии происходит наиболее интенсивно, уменьшается: при $\varepsilon = 0.01$ (рис. 8, *b*) – $0.4 < S_n < 0.5$. Стоит отметить, что данные выводы справедливы при малых значениях τ ($\tau < 70$), однако, именно в ранние моменты времени диссипирует основная часть энергии системы, так что при $\tau > 70$ в системе остается порядка 1 % от начальной полной энергии. Таким образом, относительная высота пластин решеток, при которой диссипация энергии колебаний тела жидкостью максимальна, зависит от амплитуды колебания тела. Это позволяет, например, путем изменения угла наклона пластин подстраивать демпфер под конкретную амплитуду колебания тела.

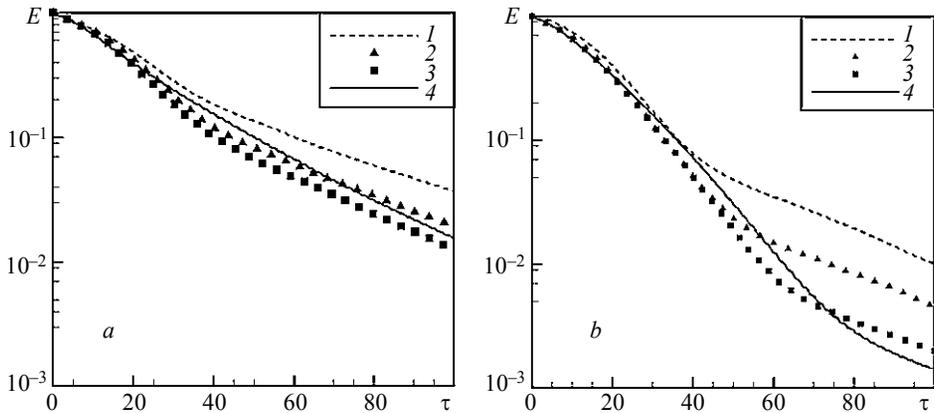


Рис. 8. Зависимость нормированной полной энергии системы от времени при размещении в полости двух решеток: *a* – $\varepsilon = 0.001$, 1 – $S_n = 0.5$, 2 – $S_n = 0.6$, 3 – $S_n = 0.7$, 4 – $S_n = 0.8$; *b* – $\varepsilon = 0.01$, 1 – $S_n = 0.3$, 2 – $S_n = 0.4$, 3 – $S_n = 0.5$, 4 – $S_n = 0.6$

Fig. 8. Time history of the normalized total energy of the system with two screens arranged in the cavity: (*a*) $\varepsilon = 0.001$; 1, $S_n = 0.5$; 2, $S_n = 0.6$; 3, $S_n = 0.7$; and 4, $S_n = 0.8$; (*b*) $\varepsilon = 0.01$; 1, $S_n = 0.3$; 2, $S_n = 0.4$; 3, $S_n = 0.5$; and 4, $S_n = 0.6$

Выводы

В результате проведенного исследования влияния жидкого наполнителя на свободные колебания тела с одной степенью свободы сформулированы следующие выводы:

- Несмотря на наличие сложного вихревого течения жидкости в полости, расчет на грубой сетке с применением ламинарной модели позволяет с достаточной для практики точностью предсказывать колебания тел с полостью, что позволяет существенно уменьшить время получения результата.
- Скорость диссипации энергии колебаний тела с полостью, частично заполненной жидкостью, слабо зависит от количества перегородок и наибольшая среди рассмотренных случаев при размещении двух вертикальных решеток. Относительная высота пластин решеток S_n , при которой скорость диссипации энергии колебаний тела максимальна, зависит от величины начального отклонения ε . Так, при $\varepsilon = 0.001$ $0.6 < S_n < 0.7$, при $\varepsilon = 0.005$ $S_n \approx 0.5$ и при $\varepsilon = 0.01$ $0.4 < S_n < 0.5$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fujii K., Tamura Y., Sato T., Wakahara T. Wind-induced vibration of tower and practical applications of tuned sloshing damper // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 1990. V. 33. P. 263–272.
2. Sun L. M., Fujino Y., Pacheco B. M., Chaiseri P. Modeling of tuned liquid damper // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 1992. V. 43(1-3). P. 1883–1894.
3. Tait M.J., El Damatty A.A., Isyumov N., Siddique M.R. Numerical flow models to simulate tuned liquid dampers: fluid modelling (TLD) with slat screen // J. Fluids and Structures. 2005. V. 20(8). P. 1007–1023. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2005.04004.
4. Cassolato M.R., Love J.S., Tait M.J. Modeling of a tuned liquid damper with inclined damping screens // Struct. Control Health Monit. 2011. V. 18. P. 674–681. DOI: 10.1002/stc.
5. Gardarsson S., Yeh H., Reed D. Behavior of sloped-bottom tuned liquid dampers // J. Eng. Mech. 2001. V. 127. P. 266–271.
6. Kaneko S., Yoshida O. Modeling of deepwater-type rectangular tuned liquid damper with submerged nets // J. Pressure Vessel Technology. 1999. V. 121. P. 413–422.

7. *Frandsen J.B.* Numerical predictions of tuned liquid tank structural systems // *Journal of Fluids and Structures*. 2005. V. 20. P. 309–329. Doi: 10.1016/j.jfluidstructs.2004.10.003.
8. *Maravani M., Hamed M. S.* Numerical modeling of sloshing motion in a tuned liquid damper outfitted with a submerged slat screen // *Int. J. Numer. Meth. Fluids*. 2011. V. 65. P. 834–855. DOI: 10.1002/flid.2216
9. *Hodges B. R., Street R. L.* On simulation of turbulent nonlinear free-surface flows // *J. Comput. Phys*. 1999. V. 151. P. 425–457.
10. *Кудинов П.И.* Метод расчета процессов гидродинамики и теплообмена в неортогональных криволинейных координатах // *Вестник Днепропетровского университета. Серия Механика*. 1998. Т. 1(1). С. 117–124.
11. *Thompson J. F., Warsi Z.U.A., Mastin Wayne C.* Numerical Grid Generation: Foundations and Applications. N.Y.: Elsevier, 1985. 483 p.
12. *Патанкар С.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
13. *Wu C.H., Faltinsen O.M., Chen B.F.* Numerical study of sloshing liquid in tanks with baffles by time-independent finite difference and fictitious cell method // *Computers & Fluids*. 2012. V. 63. P. 9–26. DOI: 10.1016/j.compfluid.2012.02.018.
14. *Moukalled F., Mangani L., Darwish M.* The finite volume method in computational fluid dynamics: an advanced introduction with OpenFOAM and Matlab. Switzerland: Springer International Publishing, 2015. 791 p.
15. *Hamelin J.A., Love J.S., Tait M.J., Wilson J.C.* Tuned liquid dampers with a Keulegan – Carpenter number-dependent screen drag coefficient // *Journal of Fluids and Structure*. 2013. V. 43. P. 271–286. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2013.09.006
16. *Keulegan G.H., Carpenter L.H.* Forces on cylinders and plates in an oscillating fluid // *J. Research of NIST*. 1958. V.60. No. 5. P. 423–440.

Статья поступила 22.02.2017 г.

Botalov A.Yu, Rodionov S.P. (2018) NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF LIQUID FILLING ON FREE OSCILLATIONS OF ONE-DEGREE-OF-FREEDOM BODY. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. 51. pp. 75–85

DOI 10.17223/19988621/51/7

Keywords: tank with fluid, free oscillations, wave motion of fluid, flow around screens.

In this work, free oscillations of a one-degree-of-freedom solid body containing a rectangular cavity partially filled with a viscous fluid are considered. The horizontal and vertical baffles, as well as vertical screens, were arranged in the cavity. The effect of a fluid flow on the rate of damping of the solid body oscillations at different positions of insertions in the cavity was studied. The cases of both laminar and turbulent flow of the fluid in the cavity were considered. It has been found that the use of the laminar flow model and coarse mesh provides a reasonably accurate description of the motion of a body with a cavity. Moreover, in this case, the computational time is significantly less than that for the turbulent flow model. It has been shown that the oscillation damping rate for a body with a cavity partially filled with a viscous fluid reached the highest value if the cavity contains two vertical screens. Nevertheless, the number of impermeable baffles did not significantly affect the rate of oscillation damping.

BOTALOV Andrey Yur'evich (Candidat of Physics and Mathematics, Tyumen Branch of the Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Tyumen, Russian Federation).

RODIONOV Sergey Petrovich (Doctor of Physics and Mathematics, Tyumen Branch of the Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Tyumen, Russian Federation).

REFERENCES

1. Fujii K., Tamura Y., Sato T., Wakahara T. (1990) Wind-induced vibration of tower and practical applications of tuned sloshing damper. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 33. pp. 263–272. DOI: 10.1016/0167-6105(90)90042-B.
2. Sun L.M., Fujino Y., Pacheco B.M., Chaiseri P. (1992) Modeling of tuned liquid damper (TLD). *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 43(1-3). pp. 1883–1894. DOI: 10.1016/0167-6105(92)90609-E.
3. Tait M.J., El Damatty A.A., Isyumov N., Siddique M.R. (2005) Numerical flow models to simulate tuned liquid dampers: fluid modelling (TLD) with slat screen. *Journal of Fluids and Structures.* 20(8). pp. 1007–1023. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2005.04004.
4. Cassolato M.R., Love J.S., Tait M.J. (2011) Modeling of a tuned liquid damper with inclined damping screens. *Struct. Control Health Monit.* 18. pp. 674–681. DOI: 10.1002/stc.397.
5. Gardarsson S., Yeh H., Reed D. (2001) Behavior of sloped-bottom tuned liquid dampers. *J. Eng. Mech.* 127. pp. 266–271. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2001)127:3(266).
6. Kaneko S., Yoshida O. (1999) Modeling of deepwater-type rectangular tuned liquid damper with submerged nets. *Journal of Pressure Vessel Technology.* 121. pp. 413–422. DOI: 10.1115/1.2883724.
7. Frandsen J.B. (2005) Numerical predictions of tuned liquid tank structural systems. *Journal of Fluids and Structures.* 20. pp. 309–329. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2004.10.003.
8. Maravani M., Hamed M.S. (2011) Numerical modeling of sloshing motion in a tuned liquid damper outfitted with a submerged slat screen. *Int. J. Numer. Meth. Fluids.* 65. pp. 834–855. DOI: 10.1002/flid.2216.
9. Hodges B.R., Street R.L. (1999) On simulation of turbulent nonlinear free-surface flows. *J. Comput. Phys.* 151. pp. 425–457. DOI: 10.1006/jcph.1998.6166.
10. Kudinov P.I. (1998) Metod rascheta protsessov gidrodinamiki i teploobmena v neortogonalnykh krivolinyenykh koordinatakh [Method for calculating the processes of hydrodynamics and heat transfer in non-orthogonal curvilinear coordinates]. *Visnyk Dnipropetrovs'kogo universytetu. Mekhanika – Bulletin of Dnipropetrovsk university. Mechanics.* 1(1). pp. 117–124.
11. Thompson J.F., Warsi Z.U.A., Mastin W.C. (1985) *Numerical Grid Generation: Foundations and Applications.* New York: Elsevier.
12. Patankar S. (1980) *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow.* CRC Press.
13. Wu C.H., Faltinsen O.M., Chen B.F. (2012) Numerical study of sloshing liquid in tanks with baffles by time-independent finite difference and fictitious cell method. *Computers & Fluids.* 63. pp. 9–26. DOI: 10.1016/j.compfluid.2012.02.018.
14. Moukalled F., Mangani L., Darwish M. (2015) *The finite volume method in computational fluid dynamics: an advanced introduction with OpenFOAM and Matlab.* Switzerland: Springer International Publishing.
15. Hamelin J.A., Love J.S., Tait M.J., Wilson J.C. (2013) Tuned liquid dampers with a Keulegan-Carpenter number-dependent screen drag coefficient. *Journal of Fluids and Structure.* 43. pp. 271–286. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2013.09.006.
16. Keulegan G.H., Carpenter L.H. (1958) Forces on cylinders and plates in an oscillating fluid. *Journal of Research of NIST.* 60(5). pp. 423–440.