

Федотов М. В. Водопропускные трубы в транспортном строительстве: гидравлическая работа труб из металлических гофрированных структур: монография. – М.: МАДГТУ (МАДИ), 2012. – 240 с.

3. **Рабухин Л. Г., Цивин М. Н.** О глубине потока на выходе из водопропускных труб: Известия вузов. Строительство и архитектура: сборник науч. трудов. – Новосибирск, 1971. – № 3. – С. 51–55.

4. Hydraulic design of highway culverts. U. S. Department of Transportation. Hydraulic design series number 5. Third edition. Publication No. FHWA-HIF-12-026. April 2012. – 326 p.

5. Экспериментальный стенд для гидравлических исследований моделей дорожных гофрированных водопропускных труб с гладким лотком по дну: патент РФ №2458263 RU C1 МПК F15B 19/00 / В. И. Алтунин [и др.]; заявл. 21.04.2011; опубл. 10.08. 2012. – Бюл. № 22. – 2012. – 8 с.

Материал поступил в редакцию 10.06.13.
Алтунин Владимир Ильич, кандидат технических наук, доцент
 Тел. 8 (499) 155-03-16
 E-mail: chatra@mail.ru
Черных Ольга Николаевна, кандидат технических наук, профессор
 Тел. 8 (499) 976-24-60

УДК 502/504:627.8:004

А. М. БЕЛОСТОЦКИЙ

Научно-исследовательский центр СтаДиО, Москва

Д. С. ДМИТРИЕВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ПО ЗАДАНЫМ АКСЕЛЕРОГРАММАМ (С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ANSYS)

Представлено сравнение различных методов динамического расчета гидротехнических сооружений в программном комплексе ANSYS. Приведено краткое описание используемых методик, их преимуществ и недостатков.

Динамические расчеты, акселерограмма, учет взаимодействия сооружения с водой, ANSYS mechanical APDL, задача Вестергарда.

There is given a comparison of different methods of dynamic calculation of hydraulic structures in the software complex ANSYS. The brief description of the used methods, their advantages and disadvantages is given.

Dynamic calculations, accelerogram, accounting of the structure interaction with water, ANSYS Mechanical APDL, Westergaard's task.

С повышением требований к уровню безопасности крупных энергетических объектов возникла потребность в разработке методики влияния сейсмического воздействия на гидротехнические сооружения с применением современных расчетных программных комплексов.

Авторами проведена научно-техническая работа, задача которой – создание методики учета водной среды в программном комплексе ANSYS при динамиче-

ских расчетах гидротехнических сооружений. Методика должна удовлетворять следующим требованиям:

иметь сходство результатов расчета с данными, полученными по методике, официально рекомендованной строительными нормами и правилами (метод с использованием присоединенной массы воды, вычисленной заранее);

процесс моделирования конечно-элементной модели и задания граничных

условий должен быть относительно простым;

максимально экономить компьютерный ресурс.

В конечном итоге такая методика позволила бы проводить более точные динамические расчеты гидротехнических сооружений различных типов и конструкций.

Для апробации различных методов моделирования и расчета гидротехнических сооружений было решено взять задачу малой размерности, а именно задачу Вестергарда, с аналогичной расчетной схемой и рядом допущений [1, 2]. Задачу решали в плоской постановке, реализовывая случай плоской деформации.

Расчетная схема рассматриваемой задачи имела следующие параметры (рис. 1):

водоподпорное сооружение с вертикальной напорной гранью прямоугольной формы представляет собой стену высотой 6 м и шириной 2 м;

основание водоподпорного сооружения жестко закреплено (ограничены все узловые степени свободы конечным элементом модели сооружения);

для реализации случая плоской деформации всем узлам на боковых гранях

сооружения в плоскости ZY заданы ограничения перемещения вдоль оси Y ($U_Y = 0$);

материал сооружения принят упругим и изотропным; модуль упругости $E = 2,7 \times 10^7$ кПа; плотность $\rho = 2,2$ т/м³; со стороны верхнего бьефа моделируется водный массив конечной глубины 5 м и длины 15 м;

демпфирующие свойства основания и материала водоподпорного сооружения не учитываются.

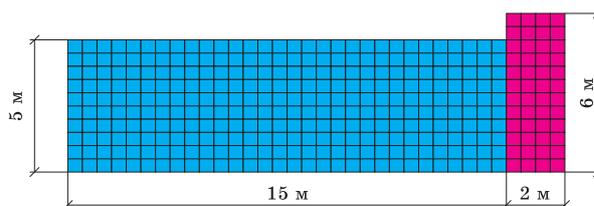


Рис. 1. Расчетная схема рассматриваемой задачи: голубым цветом показан водный массив, фиолетовым – водоподпорное сооружение

Чтобы получить сравнительные данные и оценить правильность того или иного метода решения, было проведено несколько серий расчетов на моделях с различным способом учета водного массива. Параметры этих моделей приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры рассчитываемых конечно-элементных моделей

Тип модели	Тип используемого конечного элемента	Размерность задачи	
		Число элементов	Число узлов
Модель без учета водного массива	SOLID45 – объемный восьмиузловой КЭ	96	195
Модель с учетом присоединенной массы воды, рассчитанной по СНиП II-7-81	SOLID45 – объемный восьмиузловой КЭ	96	195
	MASS21 – элемент сосредоточенной массы	15	15
Модель с учетом водного массива, моделированного элементами FLUID80	SOLID45 – объемный восьмиузловой КЭ	96	195
	FLUID80 – элемент гидрогазодинамики	600	1023
Модель с учетом водного массива, моделированного элементами FLUID30	SOLID45 – объемный восьмиузловой КЭ	96	195
	FLUID30 – акустический КЭ	600	1023

Сейсмическое воздействие задано в виде акселерограммы. Акселерограмма представлена функцией $f = 3 \sin(60X)$, время акселерограммы 0,5 с, максимальное и минимальное значения ускорений

– 3 и – 3 м/с² соответственно (рис. 2). Упрощенный вид исходной акселерограммы и малый промежуток времени воздействия обусловлены необходимостью правильно оценить степень влияния

сейсмических ускорений на сооружение. По результатам расчета каждой из моделей выведены ускорения A_X и перемещения UX для крайнего узла на верховой грани водоподпорного сооружения со стороны нижнего бьефа. Каждая из рассматриваемых моделей имеет некоторые особенности моделирования, которые были учтены при окончательном выборе метода учета водного массива. Расчеты *первой модели*, без учета водной среды, проводили для получения базовых данных работы сооружения с целью в дальнейшем оценить влияние массива воды. Процессы моделирования и расчета не имели особых сложностей. Во *второй модели* горизонтальную присоединенную массу воды рассчитывали по рекомендациям СНиП II-7-81 на единицу площади:

$$M_v = \rho_v h \mu \psi, \quad (1)$$

где ρ_v – плотность воды (1 т/м^3); h – глубина воды у сооружения (5 м); μ – безразмерный коэффициент (принят такой же, как для горизонтального поступательного движения недеформируемого сооружения с вертикальной напорной гранью); ψ – коэффициент, учитывающий ограниченность водоема.

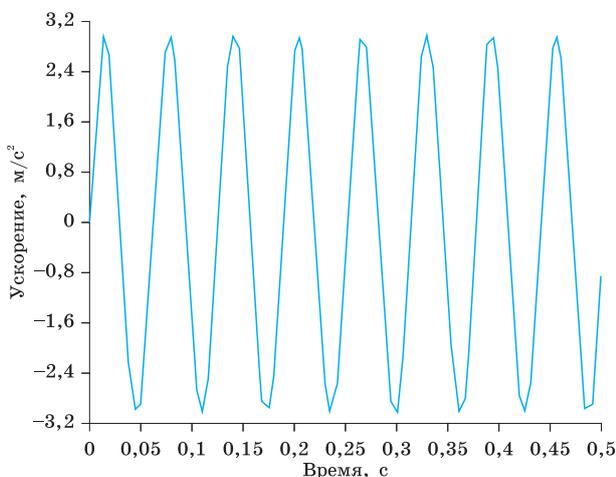


Рис. 2. Исходная акселерограмма

Массу присоединенной жидкости определяли для 15 точек на глубинах 0,5; 1,5; 2,5; 3,5; 4,5 м. В центральный узел на напорной грани прикладывали полную посчитанную массу, в узлы на боковых гранях на той же глубине – половину вычисленной массы. Присоединенные массы прикладывали с использованием элементов MASS21 [3].

В *третьей модели* водный массив задавали элементами газогидродинами-

ческой среды FLUID80 [3]. Элементы FLUID80 являются восьмиузловыми объемными элементами, имеющими три узловые степени свободы (перемещения UX, UY, UZ). Данные элементы позволяют отображать свободную поверхность жидкости, показывать собственную форму колебаний при модальном расчете, но затрачивают много компьютерного ресурса. Водная среда учтена как несжимаемая упругая жидкость с плотностью $\rho = 1 \text{ т/м}^3$ и объемным модулем упругости $E = 2,0610^6 \text{ кПа}$. Такой тип учета водной среды имеет определенные сложности в моделировании, связанные с заданием условий на границе «сооружение – жидкость».

В *четвертой модели* водный массив задавали акустическими элементами FLUID30 [3], которые являются восьмиузловыми объемными конечными элементами с четырьмя узловыми степенями свободы (перемещения UX, UY, UZ и $PRESS$). Для жидкости были заданы следующие физические свойства: плотность $\rho = 1 \text{ т/м}^3$ и скорость звука в воде $v = 1400 \text{ м/с}$. Всем узлам, находящимся на контакте воды с ограничивающими поверхностями, задавали условия контакта – FSI, узлам на поверхности водного массива задавали условия свободной поверхности – FREE.

Для сравнения и оценки применяемых методов результаты расчетов всех четырех моделей сопоставили и нанесли на график (рис. 3). Разница в процентном отношении по ускорениям A_X и перемещениям UX приведена в табл. 2.

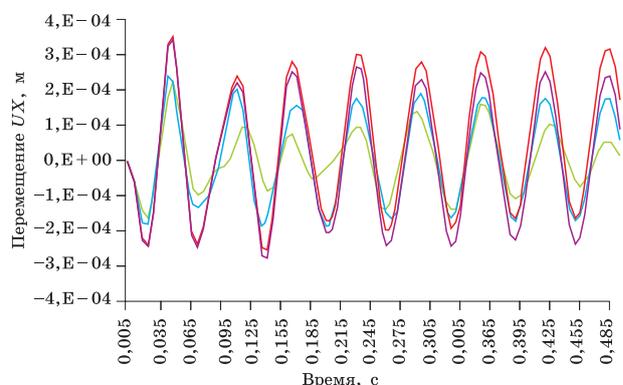


Рис. 3. Горизонтальные перемещения узла на верхней грани сооружения $UX, \text{ м}$: красный цвет – элементы FLUID30; синий – элементы FLUID80; фиолетовый – вода учтена как присоединенная масса; зеленый – модель без учета водного массива

Результаты расчетов четырех моделей

Тип модели	Максимальное значение ускорений A_X , м/с ²	Отклонение $A_{X_{\max}}$ от значения, полученного по СНиП, %	Максимальное значение перемещений UX , м	Отклонение $U_{X_{\max}}$ от значения, полученного по СНиП, %
Модель без учета водного массива	3,21	–	$2,13 \cdot 10^{-4}$	–
Модель с учетом присоединенной массы воды, рассчитанной по СНиП II-7-81	4,33	–	$3,42 \cdot 10^{-4}$	–
Модель с учетом водного массива, моделированного элементами FLUID80	5,38	24	$2,41 \cdot 10^{-4}$	42
Модель с учетом водного массива, моделированного элементами FLUID30	5,27	22	$3,52 \cdot 10^{-4}$	3

* Примечание: максимальное значение ускорения (выдается без учета знака).

Выводы

Представлены результаты сравнения двух методов учета водного массива в сейсмических расчетах гидротехнических сооружений с использованием конечных элементов типа FLUID30 и FLUID80, которые показали следующее:

достаточно хорошее совпадение результатов, полученных по этим методам, с данными, полученными по официальным рекомендациям;

значительное сокращение времени расчета при использовании элементов FLUID30.

При более сложной форме сооружения и значительном увеличении времени акселерограммы результаты увеличиваются и отличаются от часто принимаемых, что может быть связано с влиянием волновых процессов в водном массиве. Рассматриваемые методики позволяют учитывать волновые процессы в отличие от методики, рекомендуемой строительными нормативами.

При проведении дальнейших исследований следует: существенно увеличить время акселерограммы; оценить влияние

конструкции, типа и формы поперечного сечения гидротехнического сооружения; оценить влияние демпфирующих свойств материалов.

1. Westergaard H. M. Water Pressures on Dams during Earthquakes // Proc. ASCE. – 1931. – Vol. 57. – № 9. – P. 1303–1318.

2. Кауфман Б. Д. Учет влияния неопределенных факторов при определении гидродинамического давления на платину // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 9. – С. 59–69.

3. Система помощи ANSYS 14.0 Mechanical APDL. – URL: www.ansys.com/help/html (дата обращения 03.04.13).

Материал поступил в редакцию 13.05.13.

Белостоцкий Александр Михайлович, доктор технических наук, профессор

Тел. 8 (495) 737-40-81

E-mail: stadyo@stadyo.ru

Дмитриев Дмитрий Сергеевич, аспирант

Тел. 8-915-145-16-76

E-mail: dmitriev.d.s@yandex.ru