

Строительная механика и расчет сооружений

УДК 626.01

© Б. И. Кондаков, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: kondakovb@inbox.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-5-37-45

© B. I. Kondakov, post-graduate student
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: kondakovb@inbox.ru

РАСЧЕТ СКВОЗНОГО ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО СООРУЖЕНИЯ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ЦУНАМИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ

CALCULATION OF OPENED-THROUGH HYDRAULIC STRUCTURE FOR TSUNAMI IMPACT USING MODERN COMPUTING TOOLS

При проведении натурных экспериментов по моделированию воздействия волны цунами на гидротехническое сооружение, выполненных в определенном масштабе, физическая модель не позволяет определить перемещение и напряжения в отдельных элементах гидротехнического сооружения, частоты колебаний. Данный недостаток физической модели устраняется при выполнении того же эксперимента с помощью средств современного программного обеспечения, которыми можно совместно решать различного рода задачи. В рассматриваемом случае это моделирование процесса наката волны цунами, расчет сооружения на данную нагрузку и расчет на прочность, жесткость гидротехнического сооружения, то есть одновременное решение задачи вычислительной гидродинамики (CFD analysis) и задачи механики деформирования твердого тела (transient structural). При совместном решении данных двух задач решается общий вопрос — вопрос прочности, жесткости и устойчивости как отдельных элементов данных сооружений, так и системы в целом. Так, в данной статье рассматривается расчет сквозного гидротехнического сооружения на воздействие нагрузки от цунами с применением современного программного обеспечения — программы Ansys 19.2. Рассчитываемое гидротехническое сооружение представляет собой обычную рамную конструкцию, погруженную в воду. Подобного рода сооружения служат в качестве пирсов, причалов, устраиваемых вдоль берега либо около него, а также в акватории.

Ключевые слова: цунами, бор, численное моделирование, экстремальные нагрузки, особые нагрузки, нестационарные воздействия, вычислительная гидродинамика, моделирование физических процессов, моделирование цунами, методы определения нагрузок от бора (цунами), сопряженные расчеты.

When carrying out full-scale experiments on modeling the impact of a tsunami wave on a hydraulic structure, the physical model allows determining neither the displacement and stresses in individual elements of the hydraulic structure (HS), nor the frequencies of oscillations. This disadvantage of the physical model is eliminated when performing the same experiment using modern computing software, in which various tasks can be solved together. In the case considered, it is modeling of the tsunami wave run up process and calculation of the structure, respectively, for this load and the strength and stiffness of individual elements of the HS, which is a simultaneous solution of two problems: computational fluid dynamics (CFD) analysis and solid deformation mechanics (transient structural task). As a result, simultaneous solving of these two tasks solves a common issue, that is acute when calculating the HSs in tsunami hazardous areas, namely, the issue of strength, rigidity and stability of both individual elements of the HS and the system as a whole. The study considers the calculation of an open-through HS for the impact of a tsunami load using modern software, namely the Ansys 19.2 program. The calculated HS is a conventional frame structure submerged in water. Such structures serve as piers or berths arranged along or near the shore, as well as in the water area.

Keywords: tsunami, boron, numerical modeling, extreme loads, special loads, unsteady impacts, Computational Fluid Dynamics (CFD), modeling of physical processes, tsunami modeling, methods for determining loads from boron (tsunami), coupled calculations.

Введение

При расчете гидротехнического сооружения (ГТС) простой конструктивной [4–6, 8, 9] формы на действие нагрузки, вызванной цунами, в качестве основных формул для количественной оценки величины суммарной силы или давления достаточно воспользоваться имеющимися в действующих нормах или рекомендациях формулами¹.

Во время расчета ГТС сложного конструктивного исполнения [1, 2–4, 8, 10] приходится вводить ряд определенных допущений, что в свою очередь требует использования поправочных коэффициентов при неточностях интерпретации расчетных схем относительно работы реального сооружения.

Данных недостатков лишен численный эксперимент [1, 2, 5, 6, 10], который можно провести при помощи специализированного программного обеспечения.

В данной статье с целью практического применения современного ПО (Ansys 19.2) в расчете реальных сложных ГТС был рассмотрен расчет условного сквозного ГТС. К конструктивным особенностям данного ГТС сто-

ит прежде всего отнести то, что данное причальное сооружение является сооружением эстакадного типа, т. е. сооружения, у которого верхнее плитное строение опирается непосредственно на свайное поле [7]. Подобного рода сооружения могут использоваться как в гражданской, так и в военной сфере.

Методы исследования

Геометрия и размеры ГТС показаны на рис. 1. На рис. 2 представлена расчетная модель для дальнейшего CFD-анализа по воздействию волны цунами в отдельном модуле Ansys Fluent программы Ansys Workbench. Расшифровка названий граничных условий (см. рис. 2) приведена в табл. 1.

Далее, выполнив моделирование наката одиночной волны цунами на ГТС, были получены результаты CFD-анализа. Данные результаты представлены на рис. 3.

Данными результатами являются изменения объема фазы 1 (воды) на определенных шагах времени в конкретном конечном элементе (см. рис. 3), служащем для анализа корректности проведения задуманного эксперимента.

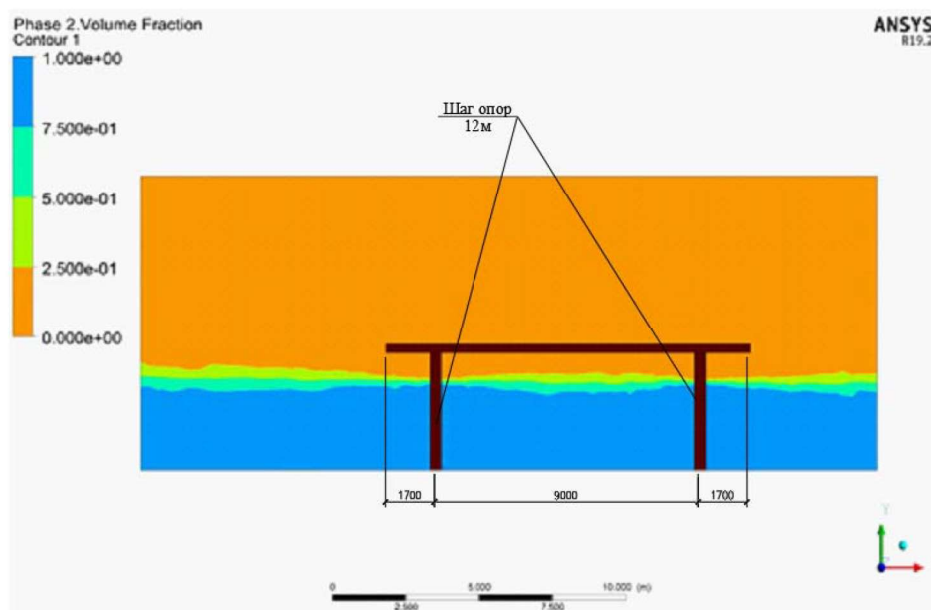


Рис. 1. Поперечное сечение сквозного ГТС

¹ СП 292.1325800.2017. Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования. СПб., 2016. 69 с.

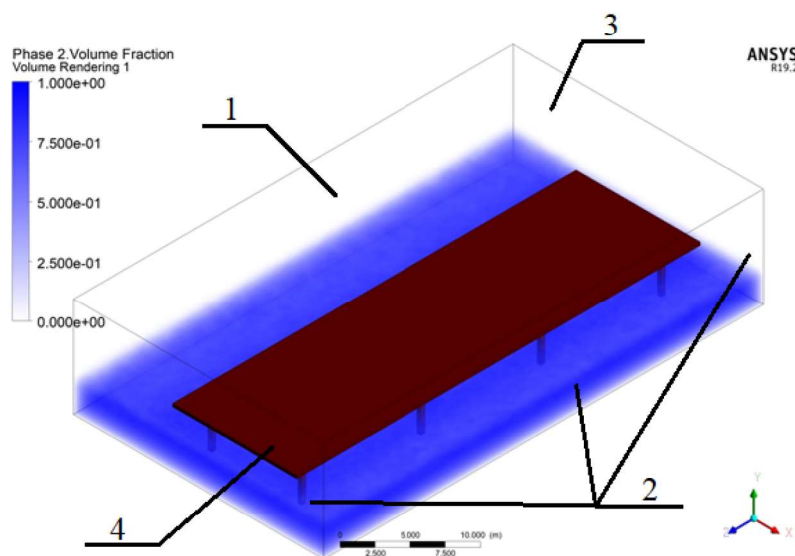


Рис. 2. Определение граничных и начальных условий решаемой задачи

После выполнения моделирования наката волны и сопоставления полученных и прогнозируемых результатов CFD-анализа выполняется новый совместный расчет модулей Fluent Flow (Fluent) и Transient Structural. Подобного рода расчет еще называется структурно-жидкостным анализом. В данной задаче принят прямой метод (более предпочтительным принято прямое сопряжение, так как сопряжение областей механики и вычислительной гидродинамики отличается высокой нелинейностью и лучше вычисляется через однократное решение

при использовании сопряженной формулировки). Реализация данного метода представлена на рис. 4.

Стоит отметить, что для упрощения и ускорения процесса расчета данной задачи в качестве материала для ГТС был выбран бетон со следующими параметрами, указанными на рис. 5.

После генерации сетки конечных элементов и задания всех необходимых граничных условий (рис. 6) выполняется совместный расчет двух расчетных модулей.

Результаты и обсуждение

Результатами сопряженного расчета являются изополя перемещений, которые представлены на рис. 7.

В ходе сопоставления результатов CFD-анализа и Transient Structural видно, что в момент времени $T = 1,05$ с происходит контакт волны цунами с ГТС. Как следствие, на изополях перемещений значение горизонтального перемещения достигает максимальных величин ($f_{гор \max} = 0,022$ мм). На дальнейших временных шагах наблюдается уменьшение абсолютной величины горизонтальных перемещений, что связано с уменьшением кинетической энергии волны цунами.

Таблица 1

Граничные условия расчетной модели

№ поз. на рис. 2	Наименование граничного условия	Параметр граничного условия
1	Velocity inlet	Тип граничных условий волн открытого канала; уровень свободной поверхности воды; параметры волны цунами
2	Pressure outlet	Уровень свободной поверхности и отметка дна воды
3	Atmosphere	Атмосферное давление на свободную поверхность воды
4	Wall	Тип поверхности основания ГТС (учет шероховатости)

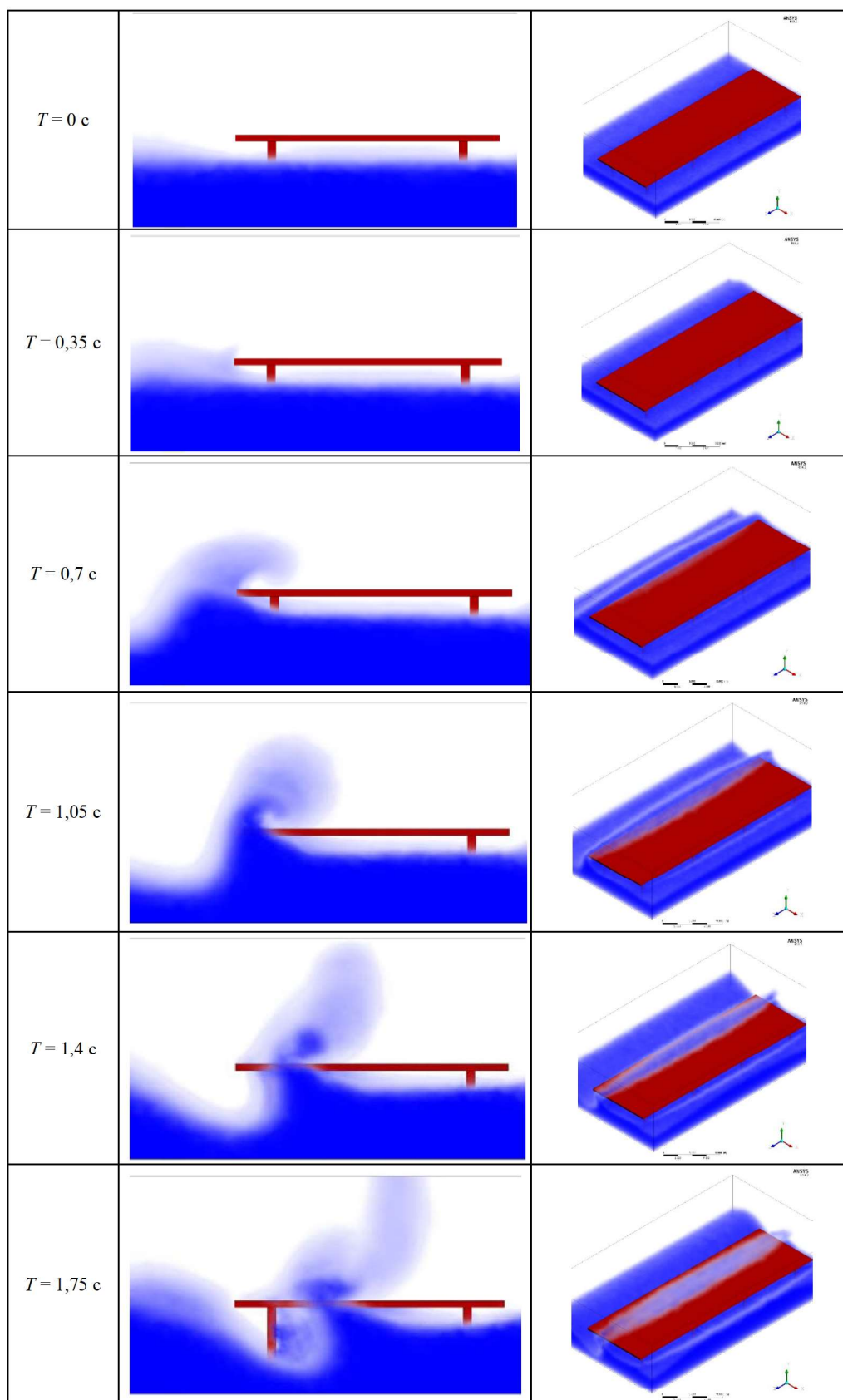


Рис. 3. Результаты CFD-анализа. Накат волны цунами на ГТС

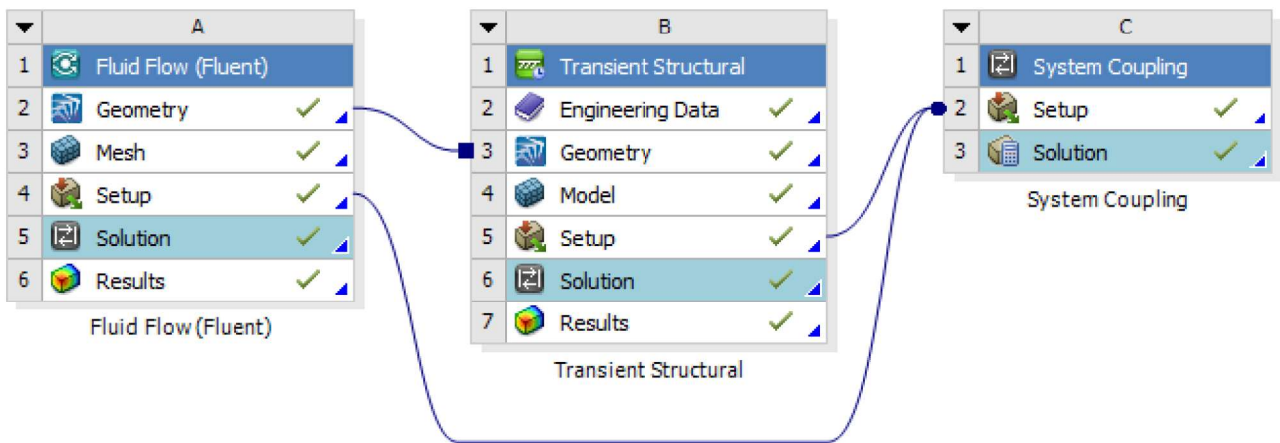


Рис. 4. Схема расчета структурно-жидкостного анализа к совместному расчету модулей Fluent Flow (Fluent) и Transient Structural

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	2300	kg m ⁻³		
4	Isotropic Elasticity				
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson...			
6	Young's Modulus	3E+10	Pa		
7	Poisson's Ratio	0.18			
8	Bulk Modulus	1.5625E+10	Pa		
9	Shear Modulus	1.2712E+10	Pa		

Рис. 5. Механические характеристики материала ГТС

Для того чтобы оценить корректность полученных результатов перемещений (в данном случае рассмотрим максимальное горизонтальное перемещение в свае ГТС), выполним аналогичный ручной расчет. За расчет-

ную схему примем П-образную раму (рис. 8), нагруженную равномерно распределенной нагрузкой q_1 и сосредоточенной нагрузкой F_2 . В первом случае нагрузка q_1 вызвана действием волны цунами на вертикальную

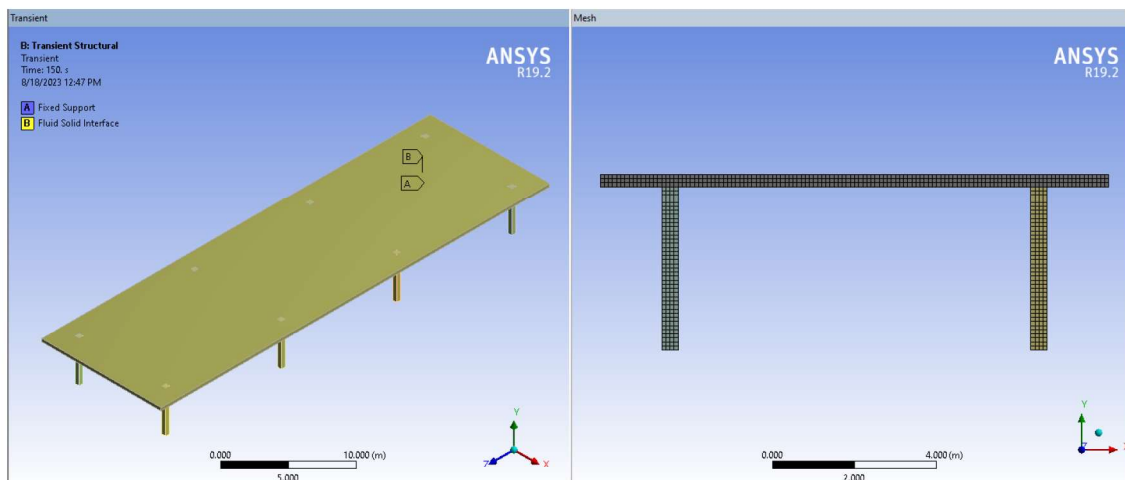


Рис. 6. Конечно-элементная схема ГТС с заданными граничными условиями

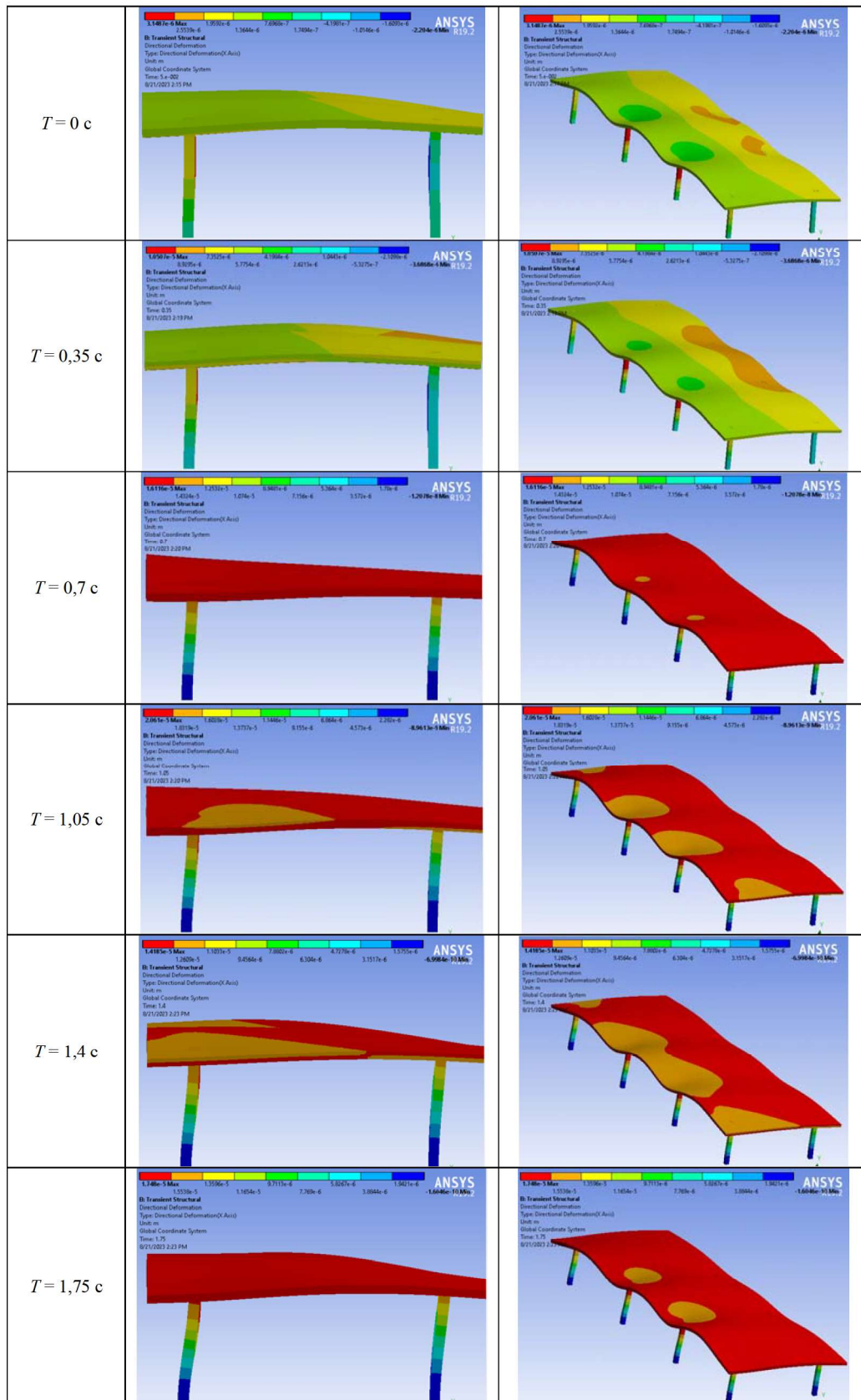


Рис. 7. Схема распределений изополей перемещений

опору, во втором — нагрузка F_2 вызвана действием волны цунами на плитную часть ГТС (рис. 9).

Упомянутая ранее равномерно распределенная нагрузка q_1 определяется следующим образом [1]:

$$q_1 = g_{ср1} b_{оп}, \quad (1)$$

где $g_{ср1}$ — усредненное по высоте колонны давление от цунами (равное 90 Па); $b_{оп}$ — ширина опоры ГТС (равная 0,4 м).

Величина сосредоточенной нагрузки F_2 определяется следующим образом [2]:

$$F_2 = g_{ср2} b h_{пл}, \quad (2)$$

где $g_{ср2}$ — усредненное по высоте плитной части ГТС давление от цунами (равное 45 Па); b — шаг опор ГТС (равный 12,0 м); $h_{пл}$ — высота плитной части ГТС (равная 0,4 м).

За неизвестные перемещения примем f_1 , f_2 — перемещения от q_1 и F_2 соответственно.

В результате расчета статически неопределимой рамы получились следующие значения перемещений: $f_1 = 0,00518$ мм; $f_2 = 0,01495$ мм. Суммарное перемещение при этом $f = 0,02013$ мм. Абсолютная погрешность полученных значений перемещений ручным способом и при помощи программы составила 2,4 %.

Если считать допустимой погрешность в 5 %, то полученные компьютерные результаты можно считать довольно точными. Это значит, что при помощи программы можно определять такие параметры, как нормаль-

ные и касательные напряжения в сечении отдельных элементов ГТС, например, для проверки прочности бетона и подбора арматуры.

Если говорить об итерационных подходах в решении нелинейных задач строительной механики, то данный расчет является первым приближением, и, поскольку в данном конкретном расчете многими параметрами расчетной схемы было решено пренебречь, то стоит выделить основные моменты, которые стоит относить к первому приближению (1-я итерация) и к более точным (n -я итерация), с учетом того, что данные расчеты можно выполнять при помощи программы Ansys 19.2 и более современных версий данной программы. Данные параметры приведены в табл. 2.

Выводы

Несмотря на несовершенство представленного в статье расчета, он обладает практической ценностью, может пригодиться при выборе места строительства будущего ГТС, когда необходимо оценить приблизительно НДС сооружения и тем самым выполнить серию пробных расчетов, связанных с большими вычислительными затратами. В данной статье кратко сформулирована методика расчета морских ГТС с применением

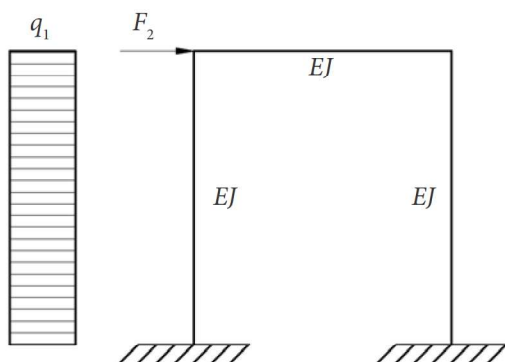


Рис. 8. Расчетная схема ГТС. $E = 3 \cdot 10^{10}$ Па; $J = 0,002133 \text{ м}^4$

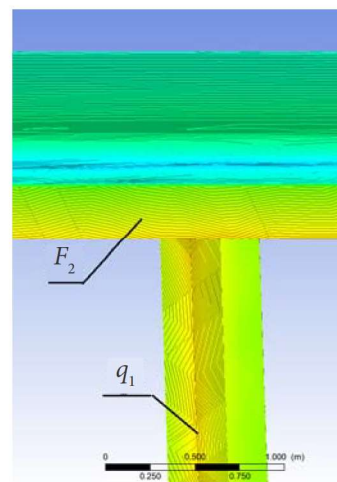


Рис. 9. Схема определения нагрузок q_1 и F_2 на расчетную схему (П-образную раму)

Таблица 2

Сопоставление параметров расчетных схем в зависимости от приближения

№ п/п	Расчет в 1-м приближении (1-я итерация)	Расчет в <i>n</i> -м приближении (<i>n</i> -я итерация)
1	Принято абсолютно жесткое защемление свай ГТС	Учет деформативных свойств грунтов основания
2	Учет линейной диаграммы зависимости напряжения/деформации бетона	Учет нелинейной диаграммы зависимости напряжения/деформации бетона
3	Отсутствие возможных добавочных вибраций (колебаний) грунтов основания во время цунами, вызванного землетрясением	Наличие возможных добавочных вибраций (колебаний) грунтов основания во время цунами, вызванного землетрясением
4	Рассмотрение удара одиночной волны о ГТС. Исключена возможность выявления возникновения резонансов от наложения серии волн	Рассмотрение ударов серий волн о ГТС с целью выявления возникновения резонансов от наложения серии волн

современных средств вычислительной техники на примере расчета конкретного сооружения, что может стать неплохим подручным инструментом для проектировщиков, конструкторов, занимающихся реальными объектами строительства.

Библиографический список

1. Ghosh D., Mittal A. K., Bhattacharyya S. K. Multiphase modeling of tsunami impact on building with openings // *The Journal of Computational Multiphase Flows*. 2016. Vol. 8 (2). Pp. 85–94.
2. Robertson I. N., Carden L. P., Chock G. Y. K. Case Study of Tsunami Bore Impact on RC Wall // *Proceedings of the 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. OMAE 2013. June 9–14, 2013, Nantes, France. URL: https://www.researchgate.net/publication/267607620_Case_Study_of_Tsunami_Bore_Impact_on_RC_Wall.
3. Robertson I. N., Riggs H. R., Mohamed A. Experimental results of tsunami bore forces on structures // *Proceedings of the 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. OMAE 2008. June 15–20, 2008, Estoril, Portugal. URL: <http://teri.hawaii.edu/pdf/OMAE2008Robertson>.
4. Дорфман А. А., Печенин С. А., Семенов К. К., Нуднер И. С., Максимов В. В. Воздействие волны цунами на морские гидротехнические сооружения и береговые объекты // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2017. № 10 (4). С. 16–30. DOI: 10.7868/S2073667317040025. ISSN: 2073-6673.
5. Кондаков Б. И. Численное моделирование воздействия цунами в программе Ansys 19.2 // *Вестник гражданских инженеров*. 2022. № 1 (90). С. 24–28. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-1-24-28. ISSN 1999-5571.

6. Кондаков Б. И. Сравнительный анализ в теории подхода к расчету нагрузки на прибрежные сооружения, вызываемой бором (цунами) // *Вестник гражданских инженеров*. 2023. № 1 (96). С. 15–21. DOI: 10.23968/1999-5571-2023-20-1-15-21.

7. Кульмач П. П., Трутаев А. Н., Хаперский В. В. Морские гидротехнические сооружения. Л.: ЛВВИСКУ, 1975. Ч. 2: Причальные и берегоукрепительные сооружения. 478 с.

8. Нуднер И. С., Максимов В. В. Воздействие волн цунами на морские гидротехнические сооружения // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2008. № 2. С. 45–56. ISSN: 2782-5221.

9. Рутман Ю. Л., Фильков В. Ю. Определение коэффициента динамичности при воздействии бора на оградительное сооружение гравитационного типа // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2017. Т. 10, № 3. С. 91–96.

10. Яковлев А. Д. Об учете вертикальной нагрузки от цунами на мостовые сооружения // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2021. № 2. С. 86–92.

References

1. Ghosh D., Mittal A. K., Bhattacharyya S. K. Multiphase modeling of tsunami impact on building with openings. *The Journal of Computational Multiphase Flows*, 2016, vol. 8 (2), pp. 85–94.
2. Robertson I. N., Carden L. P., Chock G. Y. K. Case Study of Tsunami Bore Impact on RC Wall. *Proceedings of the 32-nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, OMAE 2013, June 9–14. Nantes, France, 2013. Available at: https://www.researchgate.net/publication/267607620_Case_Study_of_Tsunami_Bore_Impact_on_RC_Wall.
3. Robertson I. N., Riggs H. R., Mohamed A. Experimental results of tsunami bore forces on structures.

Proceedings of the 27-th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. OMAE 2008. June 15–20. Estoril, Portugal, 2008. Available at: <http://teri.hawaii.edu/pdf/OMAE2008Robertson>.

4. Dorfman A. A., Pechenin S. A., Semenov K. K., Nudner I. S., Maksimov V. V. *Vozdeystvie volny tsunami na morskije gidrotekhnicheskie sooruzheniya i beregovye ob"ekty* [Impact of a tsunami wave on marine hydraulic structures and coastal objects]. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika – Fundamental and Applied Hydrophysics*, 2017, no. 10 (4), pp. 16–30. DOI: 10.7868/S2073667317040025. ISSN: 2073-6673.

5. Kondakov B. I. *Chislennoe modelirovanie vozdeystviya tsunami v programme Ansys 19.2* [Numerical modeling of tsunami impact in the program Ansys 19.2]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2022, no. 1 (90), pp. 24–28. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-1-24-28. ISSN 1999-5571.

6. Kondakov B. I. *Sravnitel'niy analiz v teorii podkhoda k raschetu nagruzki na pribrezhnye sooruzheniya, vyzyvayemoy borom (tsunami)* [Comparative analysis in the theory of approach to calculation of load on coastal structures caused by boron (tsunami)]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2023, no. 1 (96), pp. 15–21. DOI: 10.23968/1999-5571-2023-20-1-15-21.

7. Kul'mach P. P., Trutaev A. N., Khaperskiy V. V. *Morskije gidrotekhnicheskie sooruzheniya* [Marine hydraulic structures]. Leningrad, LVVISKU Publ., 1975, Pt. 2: *Prichal'nye i beregoukrepitel'nye sooruzheniya* [Mooring and shore protection structures], 478 p.

8. Nudner I. S., Maksimov V. V. *Vozdeystvie voln tsunami na morskije gidrotekhnicheskie sooruzheniya* [Impact of tsunami waves on marine hydraulic structures]. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika – Fundamental and Applied Hydrophysics*, 2008, no. 2, pp. 45–56. ISSN: 2782-5221.

9. Rutman Yu. L., Fil'kov V. Yu. *Opreделение koefitsienta dinamichnosti pri vozdeystvii bora na ograditel'noe sooruzhenie gravitatsionnogo tipa* [Determination of the dynamics coefficient at influence of boron on a barrier structure of gravitational type]. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika – Fundamental and Applied Hydrophysics*, 2017, vol. 10, no. 3, pp. 91–96.

10. Yakovlev A. D. *Ob uchete vertikal'noy nagruzki ot tsunami na mostovye sooruzheniya* [On the account of vertical load from a tsunami on bridge structures]. *Seysmostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy – Seismic Resistant Construction. Safety of Structures*, 2021, no. 2, pp. 86–92.