

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЖИДКОСТИ В БАКАХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ В ПРОЦЕССЕ ДВИЖЕНИЯ

*Амуров А.В., Бразалук Ю.В., канд. физ.-мат. наук,
Губин А.И., канд. техн. наук, доцент, Евдокимов Д.В.*

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, Украина

Abstract. Large amount of liquids are transported with the specific designed vehicles. Special tanks containing the liquids undergo some mechanical actions, which generate motion of fluid. Investigation of such motion is extremely actual for modern transport development and exploitation. An ideal potential fluid flow model is applied to describe the considered fluid motion. Boundary element method is used for numerical solution of the formulated problem. The correspondent software was developed by the authors. Several series of numerical calculation were made to determine free surface flow in the tank and mechanical influences of fluid motions on the construction in whole. The results of the present work can be useful in space-missile, sea transport and aviation.

Ключевые слова: ТОПЛИВНЫЙ БАК, ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ, МЕТОД ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ИНТЕГРАЛ КОШИ-ЛАГРАНЖА, ПОТЕНЦИАЛЬНОЕ ТЕЧЕНИЕ, ИДЕАЛЬНАЯ ЖИДКОСТЬ.

Введение. Заметная часть современных транспортных средств предназначена для перевозок разнообразных жидких продуктов, для чего такие транспортные средства оборудуются специальными баками, танками и другими емкостями, предназначенными для перевозки жидкостей. С другой стороны, большинство современных транспортных средств работает на жидком топливе, которое также следует перевозить в специальных емкостях. Общеизвестно, что транспортное средство во время движения подвергается разнообразным внешним механическим воздействиям, которые могут вызвать не только изменение его траектории, но и стимулировать движение жидкости в баках [1 – 3]. Если масса жидкости в баке составляет незначительную часть общей массы транспортного средства, то движение жидкости не окажет существенного влияния на общее движение аппарата и будет представлять собой лишь локальный механический эффект. Однако для ряда категорий

транспортных средств масса жидкости составляет существенную, а иногда и большую часть массы подвижного технического устройства. Такая ситуация имеет место, например, для ракет-носителей на жидком топливе, где исходная масса топлива составляет 80-90% от стартовой массы ракеты-носителя. Близкая по массовым соотношениям ситуация наблюдается и для океанских танкеров, например, перевозящих нефть, или для пассажирских самолетов. Приведенные примеры очевидно показывают актуальность выбранной проблематики исследования для современной транспортной отрасли.

Основной материал. В случае транспортировки жидкости в топливных баках, практически на протяжении всего времени движения они остаются не полностью заполненными, то есть, в них присутствует свободная поверхность жидкости, а объем самой жидкости, ограниченной данной свободной поверхностью и стенками бака, постоянно уменьшается. В зависимости от интенсивности внешних механических воздействий, которая выражается в их частотных и амплитудных характеристиках, в баках, содержащих жидкость, могут возникать малые движения жидкости, среди которых особый интерес представляют периодические или квазипериодические колебания [2 – 5], и течения жидкости с отклонениями свободной поверхности от начального положения, соизмеримыми с размерами бака. Несмотря на определенную схожесть физических причин процессов течения жидкости при указанных воздействиях, математические и вычислительные аспекты их изучения разнятся практически кардинально. При малых колебаниях система описывается линейными задачами о волновых движениях жидкости в ограниченной области конечной глубины, а наибольший интерес представляют колебания с частотой, близкой к резонансной [2 – 5]. Следовательно, основной проблемой для малых колебаний является определение собственных частот в системе жидкость-бак.

Течения с большими отклонениями свободной поверхности от равновесного состояния описываются краевыми задачами с нелинейными граничными условиями (например, интеграл Коши-Лагранжа), и основная проблема при решении таких задач состоит в расчетной методике реализации нелинейных граничных условий на подвижной границе [6]. В настоящей работе

основным предметом рассмотрения являются течения с большими отклонениями свободной поверхности. При построении математической модели рассматриваемых течений использовалась концепция потенциального течения идеальной несжимаемой жидкости, описываемого уравнением Лапласа.

Для численного решения сформулированных краевых задач для уравнения Лапласа в настоящей работе использовался метод граничных элементов [7 – 10], а для расчета продвижения свободной поверхности применялся метод Эйлера.

Предложенный подход был проиллюстрирован несколькими примерами численных расчетов на модельных задачах, подтвердивших работоспособность и эффективность построенного алгоритма.

Выводы. В работе, на основании общей математической модели потенциальных течений идеальной несжимаемой жидкости, применение которой обосновано как на качественном уровне, так и благодаря совпадению результатов расчетов с известными результатами экспериментальных исследований, построена специальная математическая модель исследуемых процессов в виде граничных интегральных уравнений теории потенциала. На основе предложенной интегральной математической модели и метода граничных элементов разработан специальный алгоритм расчета, значительно превосходящий по эффективности конечноразностные и конечноэлементные аналоги. Преимущество предложенного расчетного подхода основывается на общеизвестных достоинствах метода граничных элементов: отсутствию численного дифференцирования, что обеспечивает высокую точность расчетов; возможности проводить процедуру решения задачи только на границе области решения задачи, что позволяет работать с областями сложной геометрической формы; простоте алгоритмов отслеживания эволюции подвижной границы. В работе были рассмотрены течения со свободной поверхностью в баках различных геометрических форм, в том числе и неканонических, под действием разного рода внешних механических нагрузок.

Литература

1. Микишев Г.Н., Рабинович Б.И. Динамика твердого тела с полостями, частично заполненными жидкостью: монография. М.: Машиностроение, 1968. 532 с.
2. Моисеев Н.Н., Петров А.А. Численные методы расчета собственных частот колебаний ограниченного объема жидкости: монография. М.: ВЦ АН СССР, 1966.
3. Лимарченко О.С., Ясинский В.В. Нелинейная динамика конструкций с жидкостью: монография. К: Национальный технический университет Украины «КПИ», 1997. 348 с.
4. Копачевский Н.Д. Гидродинамика в слабых силовых полях. Малые колебания идеальной жидкости. *Изв. АН СССР, МЖГ*. 1966. № 2. С. 141–144.
5. Копачевский Н.Д. О колебаниях несмешивающихся жидкостей. *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.* 1973. Т. 13, № 5. С. 1249–1263.
6. Поляков Н.В. Методы решения нелинейных краевых задач. Задачи проникания: монография. Д.: Изд-во ДНУ, 2005. 356 с.
7. Бенерджи П., Баттерфилд Р. Метод граничных элементов в прикладных науках: монография. М.: Мир, 1984. 494 с.
8. Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л. Методы граничных элементов: монография. М.: Мир, 1987. 524 с.
9. Евдокимов Д.В. Разработка прямых регулярных алгоритмов вычислительной теории потенциала с точками коллокации внутри области решения. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2015. № 2/7 (74). С. 16–25.
10. Амуров А.В., Бразалук Ю.В., Губин А.И., Евдокимов Д.В. Численное исследование процесса эволюции жидкого контура. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. Херсон: ХНТУ, 2019. № 2(69), частина 2. С. 140–152.

References

1. Mikishev G.N., Rabinovich B.I. Dinamika tverdogo tela s polostyami, chastichno zapolnennyimi zhidkostyu: monografiya. M.: Mashinostroenie, 1968. 532 s.
2. Moiseev N.N., Petrov A.A. Chislennyye metodyi rascheta sobstvennyih chastot kolebaniy ograniченного ob'ema zhidkosti: monografiya. M.: VTs AN SSSR, 1966.
3. Limarchenko O.S., Yasinskiy V.V. Nelineynaya dinamika konstruktsiy s zhidkostyu: monografiya. K: Natsionalnyiy tehnicheskiy universitet Ukrainyi «KPI», 1997. 348 s.
4. Kopachevskiy N.D. Hidrodinamika v slabyih silovyih polyah. Malyie kolebaniya idealnoy zhidkosti. *Izv. AN SSSR, MZhG*. 1966. № 2. S. 141–144.
5. Kopachevskiy N.D. O kolebaniyah nesmeshivayuschihsiya zhidkostey. *Zh. vyichisl. matem. i matem. fiz.* 1973. T. 13, № 5. S. 1249–1263.

6. Poliakov M.V. *Metody resheniya nelineynykh kraevykh zadach. Zadachi pronikaniya: monografiya.* D.: Izd-vo DNU, 2005. 356 s.
7. Benerdzhii P., Batterfield R. *Metod granichnykh elementov v prikladnykh naukakh: monografiya.* M.: Mir, 1984. 494 s.
8. Brebbiya K., Telles Zh., Vrobel L. *Metody granichnykh elementov: monografiya.* M.: Mir, 1987. 524 s.
9. Yevdokymov D.V. *Razrabotka pryamykh regulyarnykh algoritmov vychislitelnoy teorii potentsiala s tochkami kollokatsii vnutri oblasti resheniya. Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy.* 2015. № 2/7 (74). S. 16–25.
10. Amurov A.V., Brazaluk Iu.V., Gubin O.I., Yevdokymov D.V. *Chislennoe issledovanie protsessu evolyutsii zhidkogo kontura. Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu.* Kherson: KhNTU, 2019. № 2(69), chastyna 2. S. 140–152.