

УДК 519.624:532.5:532.22:532.3

ДВУМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОГРУЖЕНИЯ ЖЕСТКОГО КОНТУРА ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ С УЧЕТОМ БРЫЗГОВОЙ СТРУИ ПО СХЕМЕ ЭЙЛЕРА—ЛАГРАНЖА

В. А. Тудоран

Национальный университет кораблестроения
Украина, г. Николаев
ora-viktoriya@yandex.ru

Рассматривается задача двумерного вертикального перемещения жесткого контура, пересекающего свободную поверхность воды. Модель создана на основе комплексного метода граничных элементов (КМГЭ) с использованием метода наименьших квадратов (МНК) и схемы Эйлера—Лагранжа. Предложена компьютерная модель для устранения неустойчивости решения в области образования брызговой струи. Модель проверена для задачи погружения контуров сложных форм.

Ключевые слова: проблема брызговой струи, математическое моделирование, течение со свободной поверхностью, комплексный метод граничных элементов.

В расчетах основных загрузок на корпус при качке судов рассматривается задача моделирования вертикального перемещения жесткого контура, который пересекает свободную поверхность воды, с целью определения гидродинамических нагрузок. Задача решается в нелинейной постановке. Область течения ограничена погруженной частью контура, свободной поверхностью жидкости осью симметрии шпонгоутного сечения, и произвольной линией на расстоянии, где ее влиянием на течение вблизи контура можно пренебречь. Задача эффективно решается комплексным методом граничных элементов (КМГЭ) с использованием схемы Эйлера—Лагранжа [1].

При значительных перемещениях жесткого контура в окрестности зоны стыка свободной поверхности и контура развиваются большие скорости, что приводит к образованию тонкой полоски жидкости — так называемой брызговой струи (рис. 1). Это является причиной возникновения турбулентности и разрушения границы области течения на свободной поверхности. Как видно из рис. 1, при небольших углах между жестким контуром и свободной поверхности находятся очень близко друг от друга. Точки струи переходят на свободную поверхность, граница разрушается. Погрешность вычислительных методов в окрестности точки пересечения свободной поверхности с контуром является причиной того, что расчет становится неустойчивым.

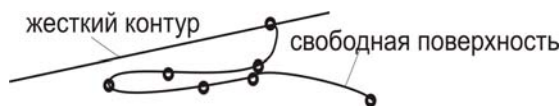


Рис. 1. Положение брызговой струи и свободной поверхности при небольших углах наклона жесткого контура к горизонтали

Теория комплексного потенциала может применяться для безвихревого течения при условии целостности границы. Учитывая, что давление на контур в области брызговой струи близко к атмосферному, воздействием струи на контур и область течения можно пренебречь. Для этого в ряде работ [2, 3] используется искусственное «отрезание» струи. В [2] предлагается отрезание струи у корня в направлении нормали к жесткому контуру. Такой способ показывает хорошие результаты при больших углах наклона контура к свободной поверхности, но приводит к проблеме «прямого угла». На свободной поверхности задан потенциал точек, на основе которого определяется скорость течения вдоль поверхности, то есть нормальная к контуру скорость; на контуре задана функция тока, которая тоже дает нормальную к контуру скорость. В зоне стыка могут возникать противоречия между этими

скоростями. При непрямом угле пересечения контура и свободной поверхности такое противоречие смягчается за счет касательной составляющей. При вертикальном борте и невозмущенной свободной поверхности нормальная к борту скорость равна 0 и со стороны контура, и со стороны свободной поверхности, поэтому в этом случае проблема не возникает.

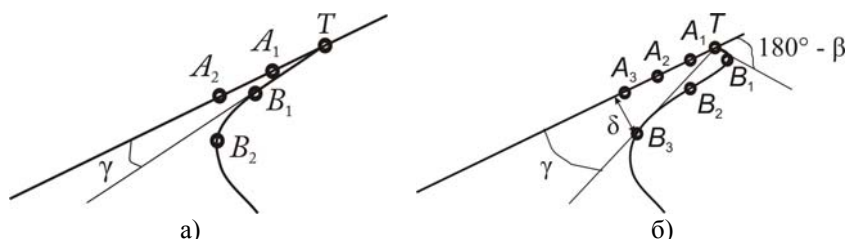


Рис. 2. Типы брызговых струй при острых (а) и прямых (б) углах между контуром и свободной поверхностью

В [3] предложен метод отрезания струи с контролем угла пересечения контура и свободной поверхности. На каждом шаге значение угла пересечения контура и свободной поверхности должно быть больше порогового. Этот способ является более гибким, к тому же позволяет контролировать появление не только острых углов, образованных брызговыми струями (рис. 2, а), но и прямых. Однако авторы проблему «прямого угла» не рассматривают.

Представленные в [2, 3] методы дают результаты при различных углах наклона контура к горизонтали. Но результаты представлены для тестовых примеров относительно клина, где угол наклона контура к горизонтали постоянный. В реальных шпангоутных сечениях судов на различных частях угол наклона контура к горизонтали меняется и, соответственно, должны меняться пороговые углы.

Таким образом, целью данной работы является совершенствование контроля брызговой струи с учетом проблемы прямого угла пересечения свободной поверхности и жесткого контура, а также изменения угла наклона контура сложной формы к горизонтали.

Моделирование брызговой струи. В данной работе метод, предложенный в [3], совершенствуется в нескольких направлениях. Во-первых, угол пересечения свободной поверхности и жесткого контура должен быть не только больше порогового, но и не попадать в окрестность значений, близких к прямому углу. При проведении расчетов оказалось, что в некоторых случаях образуются «замаскированные» брызговые струи (рис. 2, б). Непосредственно угол пересечения контура и свободной поверхности β приближается к прямому, однако тонкая полоска жидкости вдоль контура образуется за счет больших скоростей и подлежит отрезанию. Такие «замаскированные» струи определяются проверкой расстояния δ к контуру точек свободной поверхности в зоне стыка, и зона пересечения сводится к виду A_1TB_3 (рис. 2, б). Во-вторых, стабильность решения в зоне образования струи зависит от равномерности распределения узловых точек на свободной поверхности.

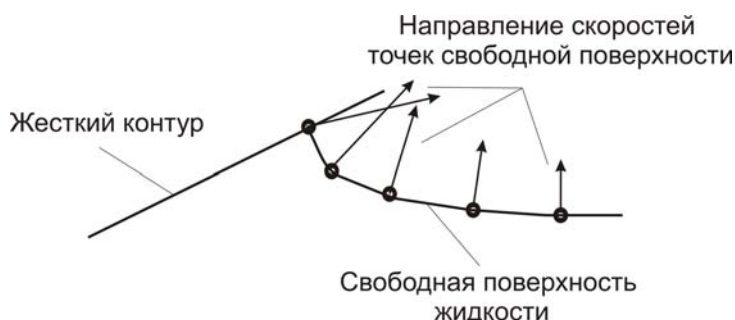


Рис. 3. Изменение расположения точек на свободной поверхности
 _____ предыдущий момент времени; → направление скорости

В начале расчета задается распределение узловых точек свободной поверхности. С перемещением на каждом шаге по времени точки меняют положение и могут сойтись вместе или, наоборот, разойтись на значительное расстояние (рис. 3). Согласно комплексному методу граничных элементов и потенциальной теории можно определить значение потенциала в любой точке области при известных значениях границы. Таким образом, в зоне стыка определяются дополнительные точки и их ско-

рость на предыдущем шаге, рассчитывается их положение в текущий момент времени. Для дальнейшего расчета оставляют только те точки, которые отвечают начальному распределению.

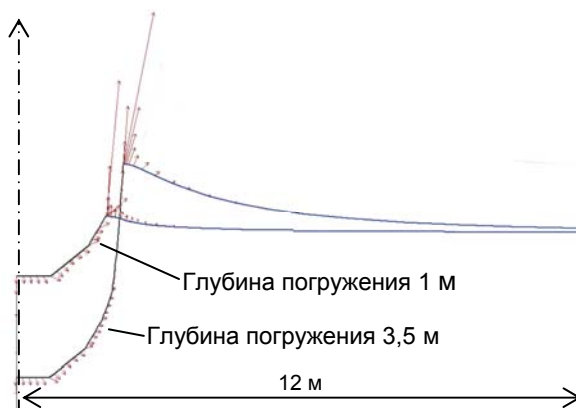


Рис. 4. Распределение скоростей по контуру области течения при погружении шпангоутного сечения с разными углами наклона к горизонтали

При моделировании до внесения указанных изменений расчет разрушался на начальных шагах. Учет брызговой струи и контроль распределения точек позволили получить реалистичную форму свободной поверхности и на начальных шагах, и продолжить расчет до полного погружения жесткого контура. Распределение скоростей для двух последовательных моментов времени представлено на рис. 4.

Таким образом, использование приведенного метода расчета позволило улучшить устойчивость решения задачи моделирования в области зоны стыка свободной поверхности и жесткого контура сложной формы.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Сулов С. В., Опанасенко В. А. Комплексний метод граничних елементів за найменшим квадратичним відхиленням для моделювання плоскої течії води, викликаної рухом контуру шпангоуту // Зб. наук. праць НУК.— Миколаїв: НУК, 2009.— № 1 (424).— С. 48–52.
2. Zhao R., Faltinsen O., Aarsnes J. Water entry of arbitrary Two-Dimensional Sections with and Without Flow Separation // Proc. of the 21st Symposium on Naval Hydrodynamics, Norway, Trondheim.— 1997.— P. 408—423.
3. Kihara K. Numerical models of Water Impact // Proc. of the 4th International Conference on High-Performance Marine Vehicles. Italy, Rome.— 2004.

V. A. Tudoran

Two-dimensional simulation of free surface water entry of an arbitrary shape rigid contour, subject to the jets, according to the Euler—Lagrange scheme.

The problem of two-dimensional vertical movement of a rigid contour intersecting the free water is studied. A complex boundary element method (CBEM) with the least square method (LSM) and the mixed Euler—Lagrange method (MEL) are employed for the model development. A computer model for elimination of the instability of solution in the jet-flow formation is proposed. This model is confirmed to be applicable for the problem of dipping of complex contours.

Keywords: *jet-flow task, mathematical simulation, free surface flow, complex boundary element method.*