

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ ВОЛНООБРАЗОВАНИИ

В. Г. Щигунов

Астраханский государственный технический университет, Астрахань — Россия

1. Введение

Численными методами исследуется волнообразование при мгновенном старте и последующем равномерном поступательном перемещении крыльевого профиля под свободной поверхностью тяжёлой жидкости. Изучаются диапазоны таких режимов движения, при которых форма свободной поверхности со временем не устанавливается. Исследуется трансформация набегающего волнения крыльевым профилем, обусловленная нестационарностью процесса взаимодействия.

2. Метод решения

Для решения применён гранично-интегральный подход. Из условий на произвольном разрыве в идеальной жидкости получено уравнение для определения разрыва касательной скорости на границе раздела. Для временной дискретизации применён маршевый алгоритм по времени; на каждом временном шаге задача решалась итерациями.

3. Численные результаты

3.1. Неустойчивость. Исследовалось движение сегментного профиля 9%-ной толщины под свободной поверхностью на глубине 0.2 хорды при углах атаки 0 и 8° в диапазоне чисел Фруда 0.3—5.0; ординаты свободной поверхности для угла атаки 0° показаны на рис. 1. Крутизна первой за профилем волны максимальна при $Fr=0.5$; волновой след при этом имеет нерегулярный характер и формируется благодаря неустойчивой динамике этой волны. Зависимости суммарных динамических характеристик от времени для чисел Фруда $0.5 < Fr < 0.7$ сохраняют нестационарный характер в течение всего времени движения; для усреднённых по времени значений коэффициента подъёмной силы характерен кризис. Неустойчивость генерируемой волны приводит к отличию расчётных динамических характеристик от предсказаний линейной теории, где эта неустойчивость не учитывается.

3.2. Опрокидывание. При увеличении интенсивности возмущений границы раздела происходит опрокидывание генерируемых профилем волн. На рис. 2 представлены картины течения для сегментного профиля 9%-ной толщины, погружённого на глубину 0.1 хорды при нескольких значениях числа Вебера. На рис. 2(a-c) для $We=0$ показано последовательное формирование струи, выбрасываемой гребнем первой за профилем волны, вплоть до момента её разрушения. Картины течения для расчётов с $We=10^4$ (d) и 10^2 (e) свидетельствуют о стабилизирующем влиянии поверхностного натяжения.

3.3. Трансформация набегающего волнения. Набегающее волнение создавалось расположенной вверх по потоку гидродинамической особенностью с гармонически зависящей от времени интенсивностью. Частота пульсаций σ варьировалась от 0 до 2π , глубина погружения профиля от 0.2 до 5.0 хорды. На рис. 3 показаны ординаты свободной поверхности (за вычетом ординат в отсутствие набегающего волнения). Заметно уменьшение амплитуды набегающей волны вниз по потоку от профиля по мере уменьшения глубины. Набегающее волнение вызывает периодическое изменение подъёмной силы на профиле, что сопровождается сходом вихревого следа с задней кромки профиля с периодически изменяющейся интенсивностью. Взаимодействие такого вихревого следа с набегающим волнением вниз по потоку от профиля вызывает в свою очередь уменьшение амплитуды волн на поверхности и волновое движение следа.

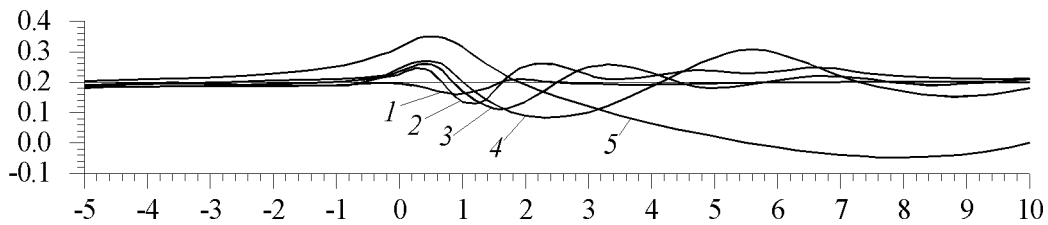


Рисунок 1. Волновые ординаты при числах Фруда 0.3(1), 0.5(2), 0.7(3), 1.0(4) и 2.0(5).

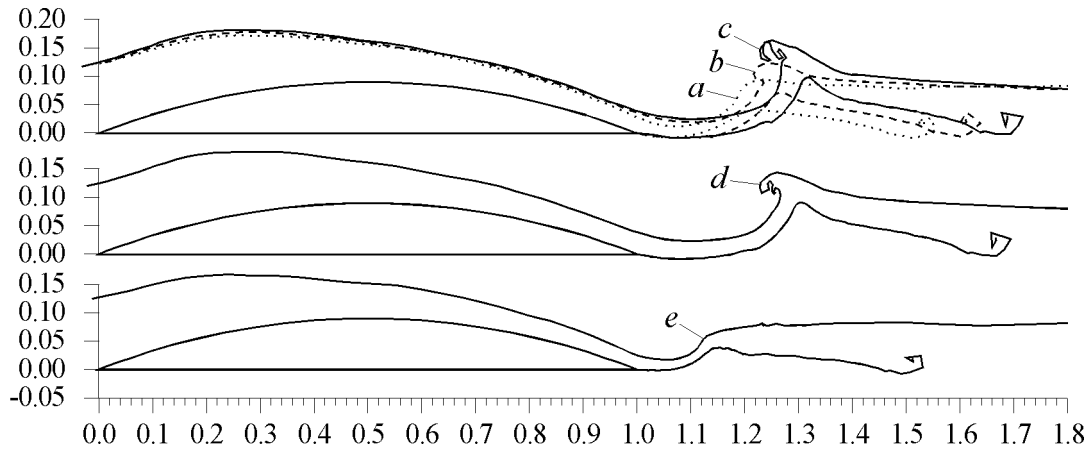


Рисунок 2. Картины течения при $We=0$, $t=0.610(a)$, $0.705(b)$ и $0.800(c)$; при $We=10^{-4}$, $t=0.773(d)$ и при $We=10^{-2}$, $t=0.589(e)$.

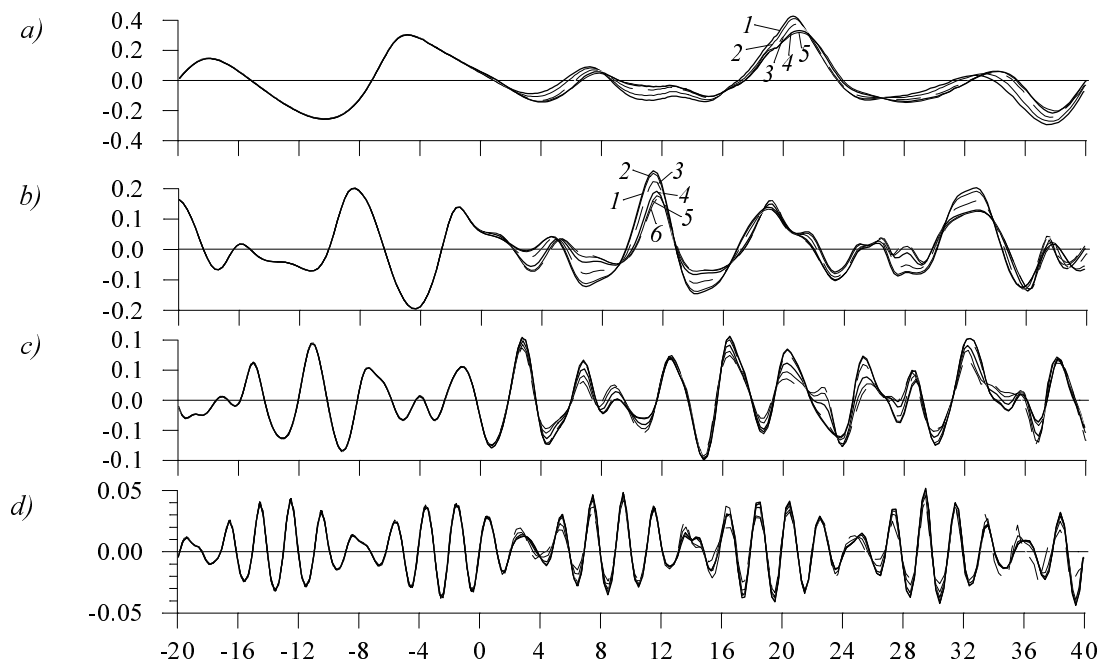


Рисунок 3. Волновые ординаты при трансформации свободного набегающего волнения для глубин погружения профиля 5.0(1), 2.0(2), 1.0(3), 0.5(4), 0.3(5) и 0.2(6) хорды и частот набегающего волнения $\sigma=\pi/8$ (a), $\pi/4$ (b), $\pi/2$ (c) и π (d).

4. Заключение

Выявлен ряд особенностей динамики свободной поверхности, обусловленных нестационарностью процесса волнообразования. Опрокидывание волны, происходящее при сильном возмущении границы раздела, приводит к изменению связности области течения и необходимости некоторой модификации расчётного метода. Трансформация свободного набегающего волнения подводным профилем представляет прикладной интерес и требует подробного изучения.