

УДК 532.528

МЕХАНИЗМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ КАВИТАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВСТРЕЧНЫХ ПОТОКОВ ЖИДКОСТИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТРУБАХ

© 2011 г.

В.П. Карликов¹, С.Л. Толоконников¹, А.В. Розин²¹Московский госуниверситет им. М.В. Ломоносова²НИИ механики Московского госуниверситета им. М.В. Ломоносова

karlikovvp@mail.ru

Поступила в редакцию 16.05.2011

Рассмотрена новая задача в классе течений жидкости со свободными границами. Сложность решения связана с пространственным характером течения, его нестационарностью и с учетом весомости жидкости. Экспериментально и численно исследованы эффекты нестационарного кавитационного взаимодействия в цилиндрической трубе соосных монолитной водяной и кольцевой газовой струй со встречным потоком воды. Изучены механизм возникновения и основные закономерности регулярных автоколебательных режимов взаимодействия. Определена зависимость средней частоты автоколебаний от отношения скоростей встречных потоков воды и от расхода газовой струи. Сделан анализ влияния числа Фруда на частоту автоколебаний. Установлен характер изменения с ростом расхода подаваемого газа максимального значения продольного перемещения носика колеблющейся развитой кавитационной полости во встречный поток и амплитуды этого перемещения. Получена информация о распределении давления вдоль кавитационной полости на разных стадиях развития течения. Аналогичные зависимости найдены для нескольких относительных загромождений потока в трубе кавитационной полостью. Они дают представление о влиянии стенок трубы на характеристики нестационарных течений с развитой кавитацией.

Ключевые слова: автоколебания, струйный кавитатор, встречные потоки.

Изучены автоколебательные режимы кавитационного взаимодействия потоков, возникающие при соударении в цилиндрической трубе соосных монолитных водяной и кольцевой газовой струй со встречным потоком воды.

Такие существенно нестационарные режимы взаимодействия оказались практически востребованными в разного рода технологиях, связанных, например, со смешением потоков в гидрореакторах, в которых используется искусственная кавитация, создаваемая с помощью струйных кавитаторов.

Исследование проводилось с целью получения информации об основных особенностях таких течений, необходимой для оптимизации указанных технологических процессов. Возможность возникновения автоколебательных режимов кавитационного взаимодействия потоков была обнаружена при реализации указанного в 1972 г. Л.И. Седовым [1] нового способа создания стационарных развитых кавитационных течений с помощью струйных кавитаторов. Оказалось, что в случае когда скорость встречной струи превышает скорость натекающего потока, существуют широкие диапазоны определяющих параметров задачи, в которых

существуют устойчивые регулярные продольные автоколебания кавитационных полостей [2].

Представлены результаты детального экспериментального изучения механизма возникновения и основных закономерностей таких течений в цилиндрическом рабочем участке гидродинамической трубы Института механики МГУ с диаметром $D = 0.4$ м, а также численного анализа с использованием пакета вычислительных программ STAR-CD.

Опыты и численные расчеты проводились в диапазонах скорости натекающего потока $5 \leq V \leq 8$ м/с, скорости встречной струи $5 \leq V_c \leq 10$ м/с, массовых расходов газа $3 \cdot 10^{-3} \leq G_m \leq 6 \cdot 10^{-3}$ кг/с и давления в трубе $10^4 \leq p_0 \leq 3 \cdot 10^4$ кгс/м².

Одной из основных измеряемых характеристик являлась средняя частота продольных автоколебаний кавитационной полости f . Согласно анализу размерностей безразмерное значение частоты при фиксированном диаметре трубы

$$St = \frac{fd}{V} = \Phi \left(\frac{V_c}{V}, \frac{G_m}{\rho V d^2}, \frac{V}{\sqrt{gd}}, \frac{p_0}{\rho V^2} \right),$$

где d – диаметр встречной струи, ρ – плотность

жидкости.

Изучены вид этой зависимости и характер последовательного развития картин течения. Найдены относительные значения величины максимального проникания кавитационных полостей во встречный поток X_{\max}/d , амплитуда этих перемещений A/d , скорости перемещения носовой части каверны при движении навстречу потоку в трубе, при сносе ее потоком назад и др. Кроме того, проведен численный анализ зависимости искомого параметра от относительного загромождения потока в трубе кавитационной полостью в диапазоне относительных диаметров трубы $26 \leq D/d \leq 68$.

При численном анализе предполагалась несжимаемость газа, что не привело к качественному отличию результатов от полученных в экспериментах.

Параллельное использование экспериментального и численного методов, позволившее протестировать последний, существенно сократило объем экспериментальных исследований, проведение которых в ряде случаев было бы практически трудно осуществимым.

Наблюдается полное соответствие некоторых результатов решения столь сложной пространственной нестационарной задачи, полученных экспериментально и численно. Это относится и к картинам течения в разные моменты времени, и к виду зависимости числа Струаля St от параметра V_c/V .

Проведенные исследования объяснили механизм возникновения автоколебаний и обнару-

жили очень сильную зависимость частоты автоколебаний кавитационных полостей от отношения скоростей встречной струи и натекающего потока. Было установлено, что изменение расхода газовой струи в изученных диапазонах его значений не вызывает существенного изменения частоты автоколебаний, а увеличение числа Фруда приводит к ее росту. Получена информация о распределении давления вдоль кавитационной полости на разных стадиях развития течения. Обнаружено, что рост степени загромождения натекающего потока кавитационной полостью увеличивает частоту автоколебаний, но слабо сказывается на скорости продольного перемещения кавитационной полости навстречу натекающему потоку. Определенная часть указанных результатов представлена в [3].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 10-01-00392, 11-01-00188).

Список литературы

1. Седов Л.И. Об обтекании идеальной жидкостью тела со встречной струей // ДАН СССР. 1972. Т. 206, №1. С. 41–42.
2. Карликов В.П., Хомяков А.Н., Шоломович Г.И. О новом способе организации развитых кавитационных течений. В кн.: Некоторые вопросы механики сплошной среды / Под ред. С.С. Григоряна. М.: Изд-во МГУ, 1978. С. 34–47.
3. Карликов В.П., Розин А.В., Толоконников С.Л. Об автоколебательных режимах кавитационного взаимодействия встречных потоков жидкости // Изв. РАН. МЖГ (принята в печать).

THE ONSET AND PROPERTIES OF SELF-OSCILLATING REGIMES OF CAVITATION INTERACTION OF COUNTERMOVING FLUID FLOWS IN CYLINDRICAL PIPES

V.P. Karlikov, S.L. Tolokonnikov, A.V. Rozin

A new free-surface flow problem is considered. The problem is complicated by the unsteady and three-dimensional nature of the flow and the ponderability of the fluid. The features of unsteady cavitation interaction of coaxial water and annular gas jets with countermoving water flow in cylindrical pipe are investigated numerically and experimentally. The onset pattern and main features of regular self-oscillating interaction regimes are studied. The dependence of mean oscillation frequency on countermoving jets velocity ratio and gas jet discharge is determined. The influence of the Froude number upon the frequency of self-oscillations is analyzed. The relation between the increase in supplied gas discharge and both the maximum longitudinal displacement of cavity tip into counter-current flow and the amplitude of displacement is determined. The pressure distribution along the cavity is obtained at different stages of flow formation. Similar relationships are found for some values of relative cross-section area reduction due to the presence of cavity. These relationships give an estimate of the pipe walls influence on the characteristics of unsteady developed cavity flows.

Keywords: self-oscillations, jet cavitator, countermoving flows.