

- 
3. Лыков А. В., Перельман Т. Л. О нестационарном теплообмене между телом и обтекающим его потоком жидкости//Тепло- и массообмен тел с окружающей средой. Минск. 1965.
  4. Перельман Т. Л. О сопряженных задачах теплообмена//Тепло- и массоперенос. Минск. Изд-во АНБССР. 1963. Т. 5
  5. Дорфман А. Ш. Теплообмен при обтекании неизотермических тел. М. Энергия. 1982. 192с.
  6. Дорфман А. Ш., Липовецкая О. А. Теплопередача произвольно неизотермических поверхностей при градиентном турбулентном течении несжимаемой жидкости в широком диапазоне чисел Прандтля и Рейнольдса.//Теплофизика высоких температур. 1976. Т. 14. N1.

Кривошей Ф.О., Богдан Ю.О.

#### ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЧНИХ УМОВ ТЕПЛОВІДАЧІ ПРИ ОБТІКАННІ НЕІЗОТЕРМІЧНИХ ПОВЕРХОНЬ СУДНОВИХ ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТІВ

*Отримано вираз для визначення густини теплового потоку на неізотермічній поверхні охолоджувача наддувального повітря.*

*Ключові слова: теплопередача, неізотермічна поверхня, тепловий потік.*

Krivoshey F. A., Bogdan Y. A.

#### DETERMINATION OF BOUNDARY CONDITIONS OF HEAT TRANSFER AT FLOWING AROUND NON-ISOTHERMAL SURFACES OF SHIPS' HEAT EXCHANGERS

*Solution for heat transfer for non-isothermal cylindric surface of air cooler.*

*Keywords: heat transfer, non-isothermal surface, heat flux.*

УДК 629.12.001.11

Майборода А.Н., Косяковский А.В., Олійник К.А.

#### ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ СКАЧКОВ УПЛОТНЕНИЯ В ВОДЕ ПРИ СВЕРХЗВУКОВЫХ СКОРОСТЯХ ДВИЖЕНИЯ

*Рассматривается проявление сжимаемости воды при движении со сверхзвуковыми скоростями при числах  $M \leq 1.5$ . Выполнен сравнительный анализ основных параметров и условий присоединения скачков уплотнения в воде и воздухе. Получены зависимости угла отклонения потока воды в скачке уплотнения от угла наклона скачка. Построена зависимость числа  $M$  присоединения скачка уплотнения в воде от угла атаки тонкого профиля. Полученные результаты могут быть использованы для расчёта гидродинамических нагрузок на сверхскоростных подводных телах.*

*Ключевые слова: вода, сжимаемость, сверхзвуковые скорости, скачки уплотнения.*

Интерес к изучению газодинамических свойств воды вызван потребностью разработки методов расчёта гидродинамических характеристик сверхскоростных технических средств, взаимодействующих с водной средой (спускаемые космические аппараты, подводные средства поражения и др.).

При движении со сверхзвуковой скоростью перед телом движется скачок уплотнения, форма и относительное положение которого определяются числом  $M$  и геометрией носовой оконечности тела.

Изоэнтروпический характер уравнения состояния воды [1] в принятом диапазоне чисел  $M \leq 1.5$  позволяет рассматривать закономерности образования и распространения этого скачка в квазиакустическом приближении и использовать условия динамической совместности [2] и основные соотношения, отличающиеся от известных для газа только добавкой постоянного значения энтропийной функции  $B$  к давлению.

Для дальнейшего удобно рассматривать симметричное сверхзвуковое обтекание водой бесконечного клина с углом  $2\theta$  при вершине.

В этом случае возможны три характерные области обтекания клина при  $M > 1$ :

$1 < M < M'$  – обтекание с отсоединённым скачком уплотнения, где  $M'$  – число  $M$ , при котором скачок присоединяется к клину, и максимальный угол поворота в скачке равен углу  $\theta$  полураствора клина;

$M' \leq M \leq M''$  – обтекание с присоединённым криволинейным скачком уплотнения, где  $M''$  – число  $M$ , при котором скорость за скачком становится сверхзвуковой;

$M'' < M$  – сверхзвуковое обтекание за присоединённым косым скачком уплотнения.

Величина интервала  $\Delta M = M'' - M'$  зависит от числа  $M$  набегающего потока и для  $M \leq 1.5$  в воде не превышает значения 0.05 [3]. Ввиду малости интервала  $\Delta M$  с достаточной для практических целей точностью можно принять  $\Delta M = 0$  и в качестве числа  $M_s$  присоединения скачка, когда скорость за скачком становится сверхзвуковой, считать значение  $M_s = M'$ .

При указанных допущениях был выполнен расчёт углов поворота потока и наклона скачка уплотнения в воде при  $M \leq 1.5$

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{2\left[(M^2 - 1)\operatorname{tg}^2\beta - 1\right]}{\left[(n-1)M^2 + 2\right]\operatorname{tg}^3\beta + \left[(n+1)M^2 + 2\right]\operatorname{tg}\beta},$$

где  $n = 7.15$  – показатель изоэнтропы Тэта в уравнении состояния воды [1].

Результаты расчёта показаны на рис. 1, где приведены углы  $\theta$  отклонения потока в скачке уплотнения с углом наклона  $\beta$  при числах  $M \leq 1.5$  в воде и для сравнения – в воздухе

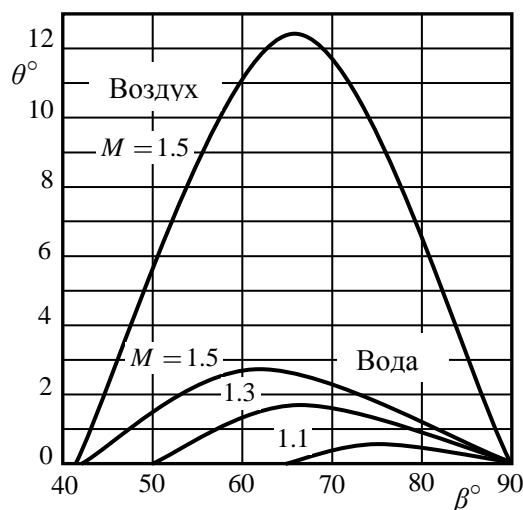


Рис. 1. Зависимость угла отклонения потока воды и воздуха в скачке уплотнения от угла наклона скачка

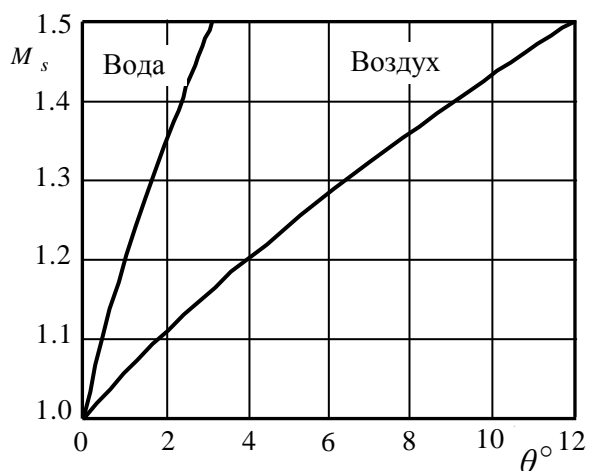


Рис. 2. Зависимость числа  $M_s$  присоединения скачка уплотнения в воде и воздухе от угла полураствора клина

при  $M = 1.5$ . Двухзначность определения  $\beta$  по заданному значению  $\theta$  отражает возможность существования двух режимов течения за косым скачком. Большее значение  $\beta$  соответствует сильному косому скачку, который переводит сверхзвуковой поток в дозвуковой. Меньшее значение  $\beta$  соответствует слабому скачку, сохраняющему поток сверхзвуковым.

Как видно (рис. 1), диапазон углов  $\theta$  отклонения потока в слабом скачке при одном и том же числе  $M$  в воде значительно уже, чем в воздухе. Этот факт, подчёркивающий исключительно малую сжимаемость воды, дополнительно иллюстрируется результатами выполненного расчёта зависимости числа  $M_s$ , при котором скачок присоединяется к клину, от угла  $\theta$  полураствора клина (рис. 2). Для сравнения на рис. 2 показана соответствующая зависимость для воздуха.

Как видно (рис. 2), плоский клин с углом полураствора  $\theta > 2.6^\circ$  в рассматриваемом диапазоне скоростей движения  $M \leq 1.5$  всегда обтекается с отсоединённым скачком уплотнения. Для воздуха при этих скоростях движения минимальный угол полураствора клина, при котором отсоединяется скачок уплотнения, составляет  $12^\circ$ . Другими словами, интенсивность возмущения сверхзвукового потока воды клином с углом при вершине порядка  $5^\circ$  эквивалентна возмущению потока воздуха клином с углом при вершине  $24^\circ$ .

Ударная адиабата или адиабата Гюгонио для воды имеет вид

$$\frac{p_2 + B}{p_1 + B} = \frac{(n+1)\frac{\rho_2}{\rho_1} - (n-1)}{n+1 - (n-1)\frac{\rho_2}{\rho_1}}$$

и в отличие от изоэнтропической адиабаты Пуассона сопровождается необратимым переходом механической энергии в тепловую вследствие разрывного движения среды с конечным скачком параметров.

Для технических приложений представляет интерес сравнение потерь механической энергии воды и воздуха при прохождении ими прямого скачка уплотнения. С этой целью был выполнен расчёт коэффициента  $\chi$  восстановления полного давления за прямым скачком уплотнения в воде и воздухе по известному представлению [4]

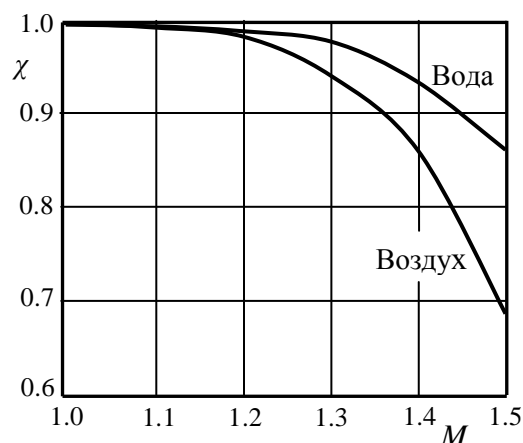


Рис. 3. Коэффициент восстановления полного давления в прямом скачке уплотнения в воде и воздухе

$$\chi = \frac{p_{02}}{p_{01}} = \left(\frac{n+1}{n}\right)^{\frac{n+1}{n-1}} \times \frac{M_1^{\frac{2n}{n-1}}}{\left(1 + \frac{n-1}{2} M_1^2\right)^{\frac{n}{n-1}} \left(n M_1^2 - \frac{n-1}{2}\right)^{\frac{1}{n-1}}}$$

На рис. 3 показаны результаты расчёта коэффициента восстановления полного давления за прямым скачком уплотнения в воде и воздухе в диапазоне чисел  $M \leq 1.5$ .

Как видно (рис. 3), скачки в воде являются относительно менее сильными, что оправдывает допустимость квазиакустического приближения при анализе процессов в скачках и расчёте систем скачков, в частности, вблизи свободной поверхности жидкости.

---

Полученные результаты анализа параметров и условий образования и присоединения скачков уплотнения в воде могут быть использованы для расчёта гидродинамических нагрузок на сверхскоростных подводных телах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Майборода А.Н., Косяковский А.В. Сжимаемость воды при дозвуковых скоростях движения // Водный транспорт. Сборник научных трудов КГАВТ. – 2012. – Вып. 2(14). – С. 54-56.
2. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука. 1987. – 840 с.
3. Коул Р. Подводные взрывы. – М.: Изд. иностр. лит., 1950. – 494 с.
4. Хилтон У.Ф. Аэродинамика больших скоростей. – М.: Изд. иностр. лит. 1955. – 504 с.

**Майборода О.М., Косаковський А.В., Олійник Л.А.**

#### **ОСОБЛИВОСТІ УТВОРЕННЯ СТРИБКІВ УЩІЛЬНЕННЯ У ВОДІ ПРИ НАДЗВУКОВИХ ШВИДКОСТЯХ РУХУ**

*Розглядається проявлення стисливості води при русі із надзвуковими швидкостями при числах  $M \leq 1.5$ . Виконано порівняльний аналіз основних параметрів і умов приєднання стрибків ущільнення у воді та повітрі. Отримано залежності кута відхилення потоку води у стрибку ущільнення від кута нахилу стрибка. Побудовано залежність числа  $M$  приєднання стрибка ущільнення у воді від кута атаки тонкого профілю. Отримані результати можуть бути використані для розрахунку гідродинамічних навантажень на надшвидкісних підводних тілах.*

**Ключові слова:** вода, стисливість, надзвукові швидкості, стрибки ущільнення.

**Mayboroda O.M., Kosakovsky A.V., Oliynik K.A.**

#### **FEATURES OF FORMATION OF shock IN Water AT supersonic SPEEDS of MOVEMENT**

*Water compressibility effect is considered at movement with supersonic speeds at numbers  $M \leq 1.5$ . The comparative analysis of key parameters and conditions of a shock attachment in water and air is made. Dependences of a corner deviation of a stream in shock from a corner of a shock inclination in water are received. Dependence of number  $M$  of shock attachment in water from a attack corner of a thin profile is constructed. The received results can be used for calculation of hydrodynamic loadings on superfast underwater bodies.*

**Keywords:** water, compressibility, supersonic speeds, shocks.

УДК 621.396.98

*Носовський А.М.*

#### **ВИСОКОТОЧНА НАВІГАЦІЯ ЗА ДАНИМИ ГЛОБАЛЬНИХ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ ДЛЯ ВНУТРІШНІХ ВОДНИХ ШЛЯХІВ СУДНОВОДІННЯ**

*Розроблений і верифікований алгоритм функціонування апаратно-програмного комплексу диспетчерської системи та надано опис його практичної реалізації у вигляді розробленого програмного забезпечення, призначенням якого є визначення, збереження і проведення обміну*