

УДК 532.528

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ВЫСОКОСКОРОСТНОМУ ДВИЖЕНИЮ ИНЕРЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ В ВОДЕ В РЕЖИМЕ СУПЕРКАВИТАЦИИ

Ю. Н. САВЧЕНКО, А. Н. ЗВЕРХОВСКИЙ

*Институт гидромеханики НАН Украины, Киев**Отримано 06.04.2009*

Рассмотрены диапазоны скоростей, при которых возможно использование паровой суперкавитации на разных глубинах. Обоснованы основные пути увеличения дальности хода инерционных моделей. Представлена методика проведения экспериментов по высокоскоростному движению инерционных моделей и некоторые результаты таких экспериментов, в том числе и регистрация сверхзвукового движения в воде.

Розглянуті діапазони швидкостей, при яких можливе використання парової суперкавітації на різних глибинах. Обґрунтовані основні напрямки збільшення дальності ходу інерційних моделей. Приведена методика проведення експериментів з високошвидкісного руху інерційних моделей і деякі результати таких експериментів, у тому числі і реєстрування надзвукового руху у воді.

Range of velocities, at which using the vapor supercavitation is possible for various depths, are considered. Main ways of increasing the motion range of inertial models are grounded. A procedure of performing experiments on high-speed of the inertial models and some results including registration of supersonic motion are given.

1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, движение в воде при больших скоростях наиболее эффективно в режиме развитой кавитации. В режиме суперкавитации возможно получение развитой каверны за кавитатором, таким образом удается уменьшить или вообще исключить контакт движущегося тела с водой за кавитатором. Вследствие этого, на поверхности объекта, покрытого каверной, практически отсутствует сопротивление трения. При этом на движущуюся модель действует только сопротивление на кавитаторе.

Если давление в каверне падает до давления насыщенных паров воды, то каверна заполняется паром и называется паровой, а режим – режимом паровой суперкавитации. В случае, когда давление в каверне больше давления насыщенных паров воды и для образования и поддержки суперкаверны необходим поддув газа внутрь суперкаверны, то такой режим определен, как режим искусственной суперкавитации. Для суперкавитирующих объектов есть два источника энергии, обеспечивающих движение: запас кинетической энергии и запас топлива. Поэтому их можно классифицировать как инерционные, самоходные и комбинированные.

Для снижения сопротивления и обеспечения устойчивого движения суперкавитирующая модель должна быть полностью охвачена каверной. Рассмотрим возможность возникновения таких условий для паровой кавитации.

Основным параметром суперкаверны служит число кавитации:

$$\sigma = \frac{(P_0 - P_k)}{(\rho U^2)/2}, \quad (1)$$

где P_0 – наружное давление; P_k – давление в каверне; ρ – плотность воды; U – скорость.

На практике более удобным для представления формы каверны является удлинение каверны:

$$\lambda = \frac{L_c}{D_c}, \quad (2)$$

где L_c – длина каверны; D_c – диаметр миделя каверны, которые при малых σ определяются известными формулами Гарабеяна [1]:

$$D_c = d_n \sqrt{\frac{C_x}{\sigma}}; \quad L_c = \frac{d_n}{\sigma} \sqrt{C_x \ln \frac{1}{\sigma}}, \quad (3)$$

(здесь d_n – диаметр кавитатора; $C_x = C_{x0}(1+\sigma)$ – коэффициент кавитационного сопротивления, C_{x0} – коэффициент кавитационного сопротивле-

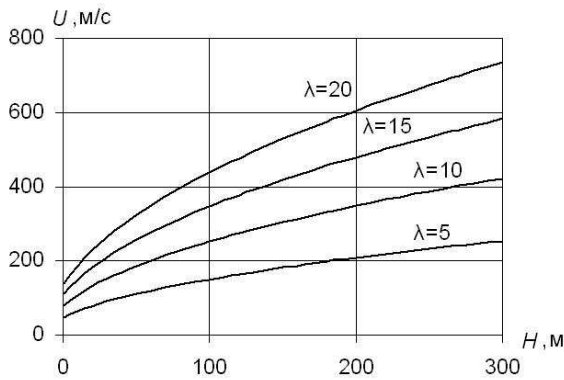


Рис. 1. Зависимость скорости движения от глубины и требуемого удлинения каверны

ния при $\sigma = 0$.) Для дискового кавитатора $C_{x0} = 0.82$. Следовательно,

$$\lambda = \frac{L_c}{D_c} = \sqrt{\frac{\ln \frac{1}{\sigma}}{\sigma}}. \quad (4)$$

Также геометрические размеры каверны можно определить с помощью эмпирических формул, выведенных в Институте гидромеханики НАН Украины:

$$R_{c/d} = \sqrt{3.659 + \frac{0.761}{\sigma}}; \quad L_{c/d} = 4 + \frac{3.595}{\sigma}. \quad (5)$$

Как видно из выражений (1) и (4), на удлинении паровой каверны ($P_k = 2336.8$ Па при $t = 20^\circ$ С [2]) влияют два параметра: скорость движения и наружное давление (для открытых водоемов – глубина). На рис. 1 построены графики зависимости скорости от глубины для различных удлинений каверны. Таким образом, можно оценить скорость, с которой должен двигаться объект на нужной глубине для получения паровой каверны требуемого удлинения.

Применительно к инерционным моделям этот график нужно понимать так, что если модель вписана с минимальными зазорами в каверну с удлинением λ (рис. 2), на глубине H , то U – минимальная скорость, при которой возможно движение в режиме суперкавитации.

Для обеспечения максимальной дальности при одинаковых начальных условиях возможна оптимизация следующим путем. Уравнение движения модели, масса которой равна m , записывается в виде [3]:

$$\frac{dV}{dt} = -kU^2, \quad (6)$$

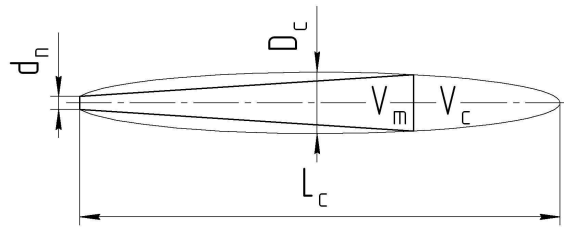


Рис. 2. Схема модель-каверна

где

$$k = \frac{\rho C_x S_n}{2m}, \quad (7)$$

S_n – площадь кавитатора.

Его решение дает зависимость пути S от скорости в виде:

$$S(U) = \frac{1}{k} \ln \frac{U_0}{U}, \quad (8)$$

где U_0 – начальная скорость модели; U – скорость, при которой удлинение каверны уменьшается до критического значения, при котором происходит замыв модели. Учитывая, что каверны имеют форму, близкую к эллипсоиду с известным диаметром и длиной, можно приближенно вычислить объем суперкаверны:

$$V_c = \frac{2}{3} \pi R_c^2 L_c. \quad (9)$$

Часть объема каверны занимает модель. Введем коэффициент заполнения моделью объема суперкаверны:

$$K = \frac{V_m}{V_c}, \quad (10)$$

где V_m – объем модели.

Сделаем анализ влияния критического удлинения на пройденное расстояние при одинаковой массе модели $m = 0.01$ кг, начальной скорости $U_0 = 1000$ м/с, $K = 0.5$, $H = 1$ м и двух разных удельных весах модели ρ_m .

В таблице 1 приведены данные для кривых, представленных на рис. 3 (зависимостях изменения скорости моделей от удлинения конечной каверны и от удельного веса модели).

Таблица 1

№ кривой	λ	d_n , мм	ρ_m , кг/м ³	S , м
1	8	2,0	7850	21
2	12	1,29	7850	44
3	18	0,82	7850	95
4	8	15	18000	36
5	12	0,98	18000	77
6	18	0,62	18000	165

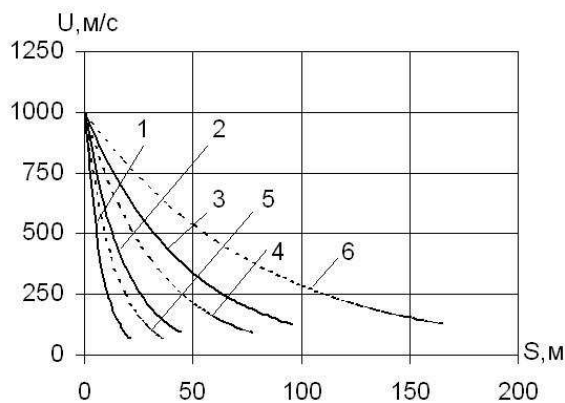


Рис. 3. Влияние удлинения и плотности модели на дальность

Из зависимостей видно, что для достижения максимальной дальности необходимо использовать модели с максимально возможным удлинением и удельным весом. Также возможно повысить дальность хода при увеличении масштаба модели. При увеличении линейных размеров объем увеличивается в кубе, а сопротивление при этом – в квадрате. На рис. 4 показана зависимость скорости от дальности для двух моделей, геометрические размеры которых отличаются в два раза. Кривой 1 соответствует модель с $d_n = 0.82$ мм и массой 0.01 кг, а кривой 2 – $d_n = 1.64$ мм и массой 0.08 кг. В обоих случаях $\lambda = 18$, а остальные условия соответствуют предыдущим расчетам.

На основе многолетнего опыта теоретических и экспериментальных исследований суперкавитационных течений в ИГМ НАНУ разработан комплекс программ [4], позволяющих рассчитывать и моделировать на экране компьютера большинство практически важных типов суперкавитационных процессов [6]. Программы комплекса предназначены для работы на обычных персональных компьютерах под управлением операционной системы Windows. Для расчета формы нестационарных суперкаверн в программах комплекса применяется математическая модель нестационарной тонкой осесимметричной суперкаверны, базирующаяся на известном принципе независимости расширения сечения каверны Г.В.Логвиновича. Искаже-

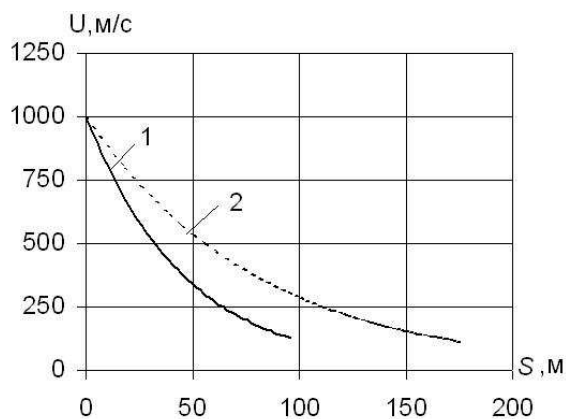


Рис. 4. Влияние размера модели на дальность

ние формы каверн под влиянием силы тяжести и поперечной силы на кавитаторе учитывается с помощью аппроксимационных формул, согласованных с экспериментальными данными. Программа "SC Design, Version 2.5" объединяет возможности предыдущих версий двух отдельных программ "SCAV" и "STAB". Она предназначена для выполнения расчетов при проектировании высокоскоростных суперкавитирующих моделей, а также для компьютерного моделирования динамики суперкавитирующих моделей, движущихся по инерции или под действием постоянной тяги движителя, с учетом их конструкции.

Программа "SC Design, Version 2.5" дает возможность:

- проектировать составные модели сложной конструкции, позволяющей при неизменной форме и массе изменять положение их центра тяжести и момент инерции;
- рассчитывать форму и размеры стационарных суперкаверн за дисковыми или коническими кавитаторами и распределение зазоров с учетом угла установки кавитатора и угла тангажа модели;
- моделировать на экране компьютера движение свободных и самодвижущихся суперкавитирующих моделей, запущенных на глубине под произвольным углом к горизонту;
- рассчитывать траекторию движения моделей и отклонение моделей от прямолинейной траектории;
- исследовать движение моделей при заданных начальных условиях, а также в случае воздействия возмущений внешнего давления;
- рассчитывать распределение упругих напряжений в сечениях моделей, возникающих под воздействием силы кавитационного сопротивления и при взаимодействии моделей со стенками каверны

в режиме рикошетирования;

- моделировать на экране компьютера процесс входа модели в воду через свободную поверхность, а также движение суперкавитирующей модели на произвольном участке траектории в неподвижной системе координат;

- получать результаты расчетов в виде графических документов на экране компьютера, сохранять их в файлах и распечатывать на системном принтере Windows;

- сохранять числовые результаты расчетов в виде таблиц в файлах.

Таким образом, программа "SC Design, Version 2.5" позволяет в интерактивном режиме "человек-компьютер" исследовать динамику суперкавитирующих моделей составной конструкции и устойчивость их движения, проектировать форму и конструкцию моделей, устойчиво проходящих заданную дистанцию и удовлетворяющих условиям прочности и жесткости, определять допустимый уровень начальных возмущений при входе моделей в воду.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Проведение экспериментов связано с высокоэнергетическими процессами. Поэтому, в первую очередь, экспериментальная установка должна обеспечивать безопасность работы для персонала. Высокой энергетикой обладает как и ускорительное устройство, так и сама модель после разгона, имеющая большой запас кинетической энергии. Для безопасности эксплуатации ускорительного устройства целесообразно размещать его в воде в начале испытательного канала. Для остановки модели в конце дистанции используется либо металлический щит, либо преграда с мягким наполнением, таким как песок, дерево, что обеспечивает целостность модели после остановки. При отклонении модели от траектории безопасную остановку модели должны обеспечить прочные металлические стенки канала, как происходит в гидродинамической лаборатории ИГМ НАНУ, (рис. 5, а). Также можно использовать последовательно расположенные поперечные металлические листы с отверстиями по траектории движения, как сделано в SHSB в NUWC [5], (рис. 5, б). В таком случае при отклонении модели от прямолинейной траектории модель ударяется в щит.

Для ускорения моделей чаще всего применяются газодинамические катапульты. В ИГМ НАНУ имеется большой опыт в создании и эксплуата-

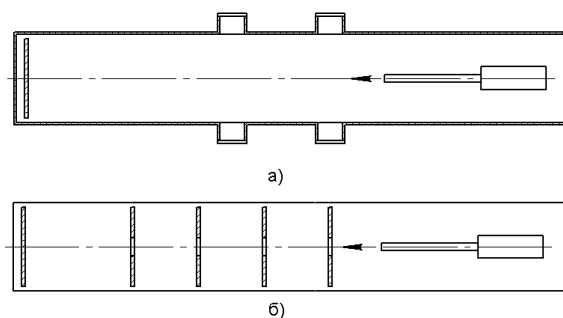
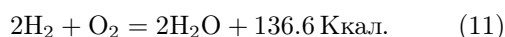


Рис. 5. Варианты схем каналов, обеспечивающих безопасность при отклонении модели от траектории: а – в ИГМ НАНУ, б – в SHSB NUWC

ции таких установок с использованием при этом экологически чистых компонент: воды различных состояний, сжатого воздуха, электролизного газа. Для исследования свободного движения моделей в воде с околосвуковой и сверхзвуковой скоростью создана катапульта, использующая энергию сгорания электролизного газа, согласно известной реакции соединения водорода с кислородом [6]:



Газы для реакции образуются в электролизере под действием электрического тока. В результате сгорания кислорода и водорода образуется вода, что обеспечивает экологичность эксплуатации установки. На рис. 6 изображена схема такой катапульты.

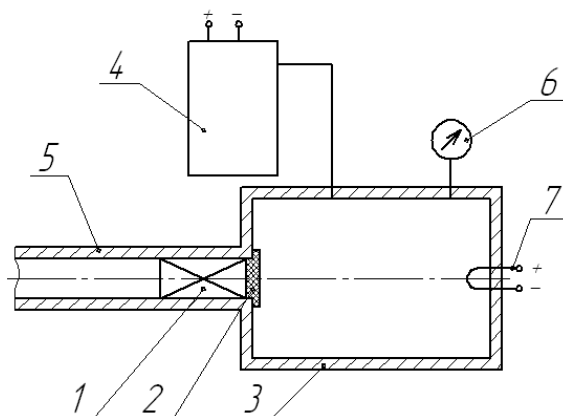


Рис. 6. Схема электрохимической катапульты

Газы из электролизера 4 поступают по трубопроводу в камеру сгорания катапульты 3. При достижении необходимого давления в камере сгорания (6 – манометр) газогенератор выключается. Для поджога газов применяется тонкая медная

проволока 7, которая сгорает при прохождении через нее электрического тока. При повышении давления диафрагма 2 разрушается, и снаряд 1 ускоряется по стволу 5. В экспериментах использовались гладкие стволы диаметрами 17, 19 и 30 мм, и длиной от 1.35 до 4 м. Заряд может представлять собой либо калиберную, либо подкалиберную модель. Для уменьшения массы снаряда используются подкалиберные модели. Один из наиболее успешных таких снарядов представлен на рис. 7, где 1 – модель, 2 – контейнер, 3 – поддон.

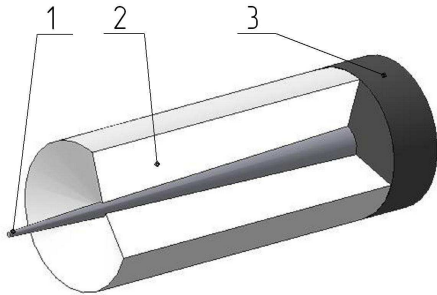


Рис. 7. Схема заряда

Особую сложность при подводном старте представляет разделение контейнера и модели, с обеспечением минимальных начальных возмущений, и исключение воздействий на каверну и модель сопутствующих деталей и газовой струи, которая выходит из ствола за моделью. Эти условия во многом определяют успешность запуска.

В процессе экспериментов с инерционными суперкавитирующими моделям исследуются следующие вопросы:

- динамика суперкаверны и модели;
- стабилизация модели в каверне;
- геометрическая форма, физические и прочностные свойства модели, обеспечивающей движение на интересующих режимах движения;
- особенности старта модели;
- возможность обеспечения начальных условий (скорости, отклонений модели от начального вектора скорости).

Регистрация картины обтекания возможна с помощью фото- и видеоаппаратуры. Каждый из способов имеет свои преимущества и недостатки. К преимуществам фоторегистрации можно отнести высокую разрешающую способность и качество снимка, а к недостаткам – сложную систему синхронизации аппаратуры, а также необходимость дополнительных средств измерения скоро-

сти. Преимущество видеорегистрации – это возможность проследить динамику движения модели и развития каверны в области съемки, что особенно важно при исследовании входа в воду и образования каверны. Недостатком такой системы есть низкая разрешающая способность кадров.

Рассмотрим особенности каждого из способов регистрации и возможных схем их применения. В случае фоторегистрации для получения мгновенного кадра необходимо использовать импульсную вспышку с малой длительностью импульса. Инициировать вспышку можно путем замыкания моделью пары контактов. Пара контактов может представлять собой два листа алюминиевой фольги, закрепленной на рамке с зазором [7]. Две пары таких контактов с известным расстоянием между ними может использоваться для измерения скорости. Схема такой системы представлена на рис. 8.

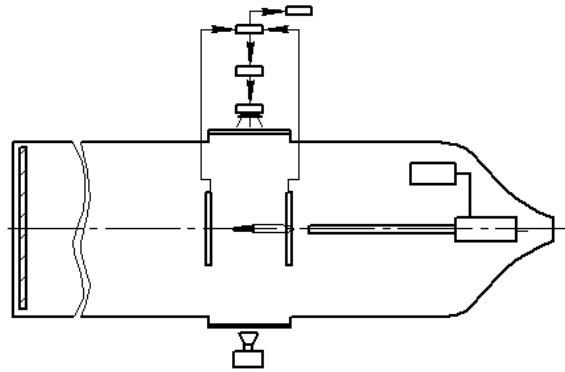


Рис. 8. Схема экспериментальной установки с использованием системы фоторегистрации

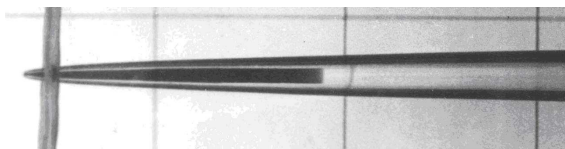


Рис. 9. Фотография модели в суперкаверне замыкающая пару контактов

На рис. 9 показана фотография модели, движущейся в каверне, которая замыкает контакты. Фотография получена описанным выше способом. Скорость при этом была около 1050 м/с. В данном случае использовалась вспышка с длительностью импульса около $2 \cdot 10^{-6}$ с. В таком случае смазка при скорости 1000 – 1500 м/с составляет около 2–3 мм. Для регистрации с помощью скоростных видеокамер можно использовать источник постоянного света либо импульсные осветители, например стробоскоп. Современная цифро-

вая апаратура дозволяє проводити реєстрацію з високими параметрами частоти зйомки, часу експозиції та чутливості ПЗС матриці. В гідродинамічній лабораторії ІГМ НАНУ реєстрація картини обтекання високоскоростних об'єктів проводилася з допомогою високоскоростної цифрової відеокамери X-Stream XS-4 фірми Integrated Design Tools. Максимальна частота зйомки камери залежить від розрешаючої здатності кадру і коливається від 5130 до 200000 кадр/с при відповідному розрешенні 512×512 і 512×8 . Мінімальне час експозиції 1 мкс, що дозволяє реєструвати рухомих об'єктів з швидкістю більше 1500 м/с при постійному джерелі світла. В якості освітлення використовується батарея галогенних освітлювальних елементів сумарною потужністю 10 кВт.

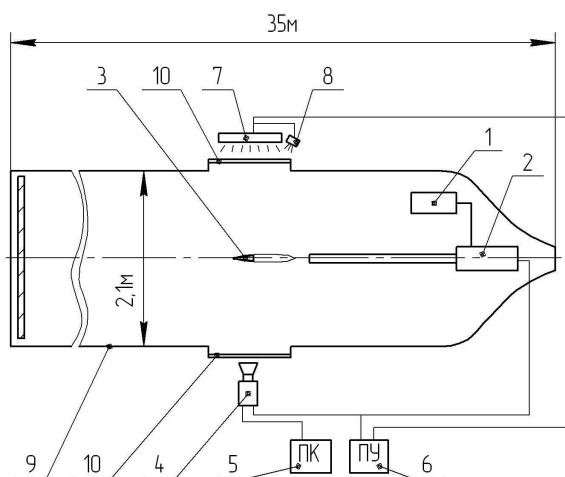


Рис. 10. Схема експериментальної установки з використанням системи відеореєстрації

На рис. 10 показана схема експериментальної установки з використанням такої схеми реєстрації, де 1 – газогенератор; 2 – катапульта; 3 – рухома модель; 4 – відеокамера; 5 – персональний комп'ютер; 6 – пульт управління; 7, 8 – освітлювальні прилади, 9 – канал гідродинамічної труби, 10 – вікно.

На рис. 11 представлена кінограма руху моделі на швидкості 1330 м/с. Частота зйомки – 50000 Гц, час експозиції – $1 \cdot 10^{-6}$ с, крок масштабної сітки – 50 мм.

Нижче наведено послідовність дій, які виконуються для проведення експерименту. Після підготовчих операцій канал гідродинамічної труби заповнюється водою, а катапульта – робочим газом. Відеокамера розміщується з однієї сторони пари вікон, а освітлю-

вальні прилади – з іншої, як показано на рис. 10. Визначається масштаб в площині руху моделі відносно положення відеокамери. Після налаштування та перевірки апаратури включаються освітлювальні прилади і одночасно подається керуючий сигнал на піджиг газу і запуск відеокамери. Результати реєстрації можуть бути представлені в формі послідовності кадрів з інтервалом в часі $\frac{1}{N}$, де N – частота зйомки. По отриманій кінограмі можна визначити швидкість руху моделі та особливості процесу обтекання.

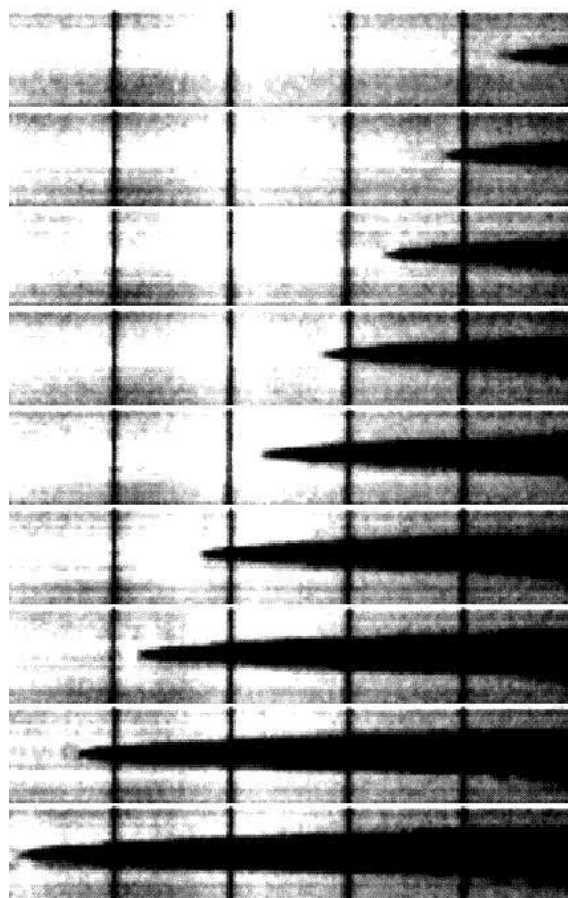


Рис. 11. Кінограма руху моделі в суперкамері

Як видно з наведених на рис. 12, а, б кадрів, в проведених експериментах отримано реєстрацію руху не тільки моделі, але і створені нею ударні хвилі.

Це підтверджує досягнення швидкості звуку в воді і, в свою чергу, дозволяє використовувати дві методики визначення швидкості руху моделі: 1 – за пройденою відстанню між сусідніми кадрами; 2 – за кутом конуса Маха.

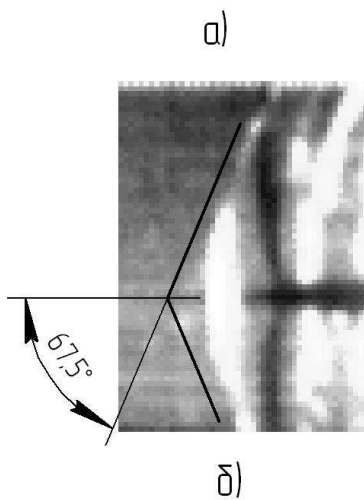


Рис. 12. Регистрация сверхзвукового движения в воде: а – кинограмма, б – определение угла Маха

Данный эксперимент проводился при следующих условиях:

- параметры окружающей среды:
- температура воды $t = 4^\circ\text{C}$;
 - скорость звука в воде, $a = 1422$ м/с;
 - глубина $H = 0.5$ м;
- параметры модели:
- диаметр кавитатора $d_n = 1.2$ мм;
 - длина модели – 85 мм;
- параметры регистрации:
- частота съемки – 25000 Гц;
 - время экспозиции – 1 мкс;
 - шаг масштабной сетки – 50 мм.

По результатам первого метода скорость составила 1550 м/с. Для расчетов по второму методу воспользуемся следующими формулами:

$$\sin \alpha = \frac{1}{M}; \quad M = \frac{V}{a}. \quad (12)$$

где M – число Маха, α – полуугол конуса Маха;

$$V = \frac{a}{\sin \alpha} = \frac{1422}{\sin(67.5)} = 1540 \text{ м/с}. \quad (13)$$

Таким образом, удалось получить движение при числе Маха $M = 1.08$.

ВЫВОДЫ

Рассмотрены возможности использования паровой суперкавитации при различных условиях. Определены основные пути увеличения дальности хода инерционных моделей в режиме суперкавитации. Изложена методика проведения экспериментов по исследованию сверхскоростного движения в воде. Представлены результаты регистрации сверхзвукового движения в воде.

1. Савченко Ю. М. Моделирование суперкавитационных процессов // Прикладная гидромеханика. – 2000. – Вып. 74. – С. С. 75–86.
2. А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; Под редакцией И.С. Мейхилова Физические величины: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
3. Путилин С. И. Некоторые особенности динамики суперкавитирующих моделей // Прикладная гидромеханика. – 2000. – Вып. 74. – С. 65–74.
4. Semenenko V.N. Some problem of supercavitating vehicle design, Int. Conf. on innovative approaches to further increase speed of fast marine vehicles, moving above, under and in water surface, SuperFAST. – t. Petersburg, Russia. – 2008.
5. Kirschner I.N. Results of selected experiments involving supercavitating flows, RTO AVT Lecture Series on "Supercavitating Flows held at the von Karman Institute (VKI) in Brussels, Belgium, 12-16 February 2001.
6. Савченко Ю. М. О движении в воде на суперкавитационных режимах обтекания // Гидромеханика. – 1996. – Вып. 70. – С. 105–115.
7. Vlasenko Yu. D. Experimental investigation of supercavitation flow regimes at subsonic and transonic speeds // Fifth International Symposium on Cavitation (cav2003) Osaka, Japan, November 1-4, 2003.
8. Власенко Ю.Д. Экспериментальные исследования суперкавитационных режимов обтекания самоходных моделей // Прикладная гидромеханика. – 2000. – Вып. 74. – С. 26–39.
9. Savchenko Yu.N. July 2008. Perspectives of the supercavitation flow applications, Int. Conf. on innovative approaches to further increase speed of fast marine vehicles, moving above, under and in water surface, SuperFAST'2008', St. Petersburg, Russia.
10. Savchenko Yu.N., Semenenko V.N., Putilin S.I. and others June 2005. Designing the high-speed supercavitating vehicles, Int. Conf. on Fast Sea Transportation "FAST'2005", St. Petersburg, Russia.