

УДК 532.528

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СУПЕРКАВИТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ ОБТЕКАНИЯ САМОХОДНЫХ МОДЕЛЕЙ

Ю. Д. ВЛАСЕНКО

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

Получено 15.06.2000

Излагается методика и результаты экспериментального исследования суперкаверн на самоходных моделях с различными типами привода, движущихся в гидрлотке по направляющей проволоке в режимах вентилируемой и естественной паровой кавитации в диапазоне скоростей $V = 30 \div 140$ м/с. Приводятся данные регистрации параметров стационарных паровых и вентилируемых суперкаверн и эффектов взаимодействия паровой суперкаверны с корпусом и реактивным двигателем модели. Рассматриваются некоторые характерные типы нестационарных процессов на различных стадиях движения самоходных моделей по направляющей проволоке.

Викладається методика та результати експериментального дослідження суперкаверн на самохідних моделях з різними типами рушіїв, що рухаються у гідролотку по направляючому дроту у режимах вентильованої та природної парової кавітації у діапазоні швидкостей $V = 30 \div 140$ м/с. Наводяться дані реєстрації параметрів стаціонарних парових та вентильованих суперкаверн та ефектів взаємодії парової суперкаверни з корпусом та реактивним двигуном моделі. Розглядаються деякі характерні типи нестационарних процесів на різних стадіях руху самохідних моделей по направляючому дроту.

The methods and the results of experimental investigation of the supercavities on the different types of wire riding self-propelled models at the ventilated and vapour supercavitating flow regimes in the motion velocity range $V = 30 \div 140$ m/s are presented. The data of registered parameters of steady vapour and ventilated supercavities and effects of interaction between the vapour supercavity and the model hull and reactive engine are adduced. Some characteristic types of unsteady processes at different motion stages of wire riding models are considered.

ВВЕДЕНИЕ

При изучении гидродинамики тел, движущихся в воде в режиме суперкавитационного обтекания, используют различные типы экспериментальных установок, которые могут быть разделены на две большие группы [1, 2, 4, 7]. К первой относятся установки типа гидродинамических труб и лотков, позволяющие изучать процессы обтекания тел в обращенном движении на моделях сравнительно крупного калибра порядка 40 ÷ 100 мм и более. Это дает возможность исследовать в стационарном режиме гидродинамику достаточно сложных кавитирующих комплексов, однако достижимые в этом случае скорости ограничены величинами порядка 30 м/с при неизбежном влиянии возмущений, связанных с турбулентностью набегающего потока, влиянием стенок и поддерживающих устройств модели и т.п. Установки другой группы предназначены для исследования обтекания тел при их свободном движении в невозмущенной жидкости. В этом случае могут быть получены скорости, измеряемые сотнями метров в секунду вплоть до скоростей, сопоставимых со скоростью звука в воде $a = 1430$ м/с [4, 7]. Применяемые в подобных экспериментах модели, однако, представляют собой обычно тела простой геоме-

трической формы и малых размеров, обладающие свойством автостабилизации движения. Поэтому представляет интерес создание таких экспериментальных технических средств, которые позволили бы проводить исследования суперкавитационных режимов обтекания с использованием моделей достаточно крупного калибра и, соответственно, сложной конструкции при скоростях обтекания до 100 – 150 м/с, обеспечивающих получение режимов естественной паровой кавитации без решения проблемы устойчивости движения. Важными условиями являются также отсутствие внешних возмущений при обтекании модели и возможность проведения экспериментов в лабораторных условиях. Последнее условие накладывает ограничения на габариты всей установки, а также требует достаточной экологической чистоты и безопасности обслуживания экспериментальной техники.

В ИГМ НАН Украины накоплен определенный опыт создания лабораторного оборудования такого типа и проведения с его помощью экспериментов по изучению суперкавитационного обтекания моделей калибром 40 – 60 мм при их свободном движении в воде со скоростями свыше 100 м/с. В экспериментах использовались различные системы привода моделей, в которых в качестве рабочего тела применялись экологиче-

ски чистые компоненты: вода в различных фазовых состояниях и сжатый воздух. Для разделения проблем динамики каверны и устойчивости движения путем стабилизации траектории модели в воде наиболее эффективной оказалась система скольжения тела по направляющей проволоке. Описываемые ниже технические средства и методика экспериментов обеспечивали возможность изучения суперкавитационного обтекания самоходных моделей сравнительно сложной конструкции без проблемы стабилизации их движения в достаточно широком диапазоне скоростей и режимов обтекания от искусственной вентилируемой кавитации до естественной паровой кавитации при скоростях движения в воде $V \approx 30 - 140$ м/с. К недостаткам описываемой техники эксперимента относится, главным образом, сложность регистрации характеристик процесса при движении модели в воде с большими скоростями. Основная информация в этом случае обеспечивается изучением кинематики движения модели и фото-кинорегистрацией картины ее обтекания. При этом определенную техническую сложность может представлять синхронизация работы регистрирующей аппаратуры с определенными фазами движения модели в воде.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Опыт проведенных экспериментов показал, что для организации устойчивого движения модели в каверне определяющее значение имеет формирование развитой каверны на возможно более коротком начальном участке ее траектории в воде, который в пределе можно считать близким длине модели. В этом случае обеспечивается быстрая стабилизация режима движения, и регистрация картины обтекания может быть осуществлена на сравнительно коротком рабочем участке траектории. Одним из необходимых условий формирования суперкаверны на начальной стадии движения в воде является достаточно высокая начальная скорость модели, которая достигается с помощью стартовой катапульты, т.е. преимущественно за счет "пушечного эффекта". При этом масса модели выполняет роль аккумулятора кинетической энергии, способного обеспечить устойчивое движение по инерции. В данном случае оснащение модели реактивным двигателем не имеет принципиального значения для ее динамики. Рассматриваемые в данной статье виды рабочего тела двигателя при их ограниченном бортовом запасе способны развивать лишь весьма кратковременную тягу, которая не дает решающего приращения величины ско-

рости и достигается ценой уменьшения массы модели в процессе движения. В некоторых случаях для увеличения дистанции свободного пробега модели при одной и той же начальной скорости, может быть выгоднее вместо двигателя с запасом рабочего тела увеличить инерционную массу модели за счет заполнения корпуса материалом с более высокой плотностью, например, металлом. Поэтому в данном случае использование моделей с реактивным двигателем представляет интерес для комплексного изучения гидродинамических аспектов взаимодействия каверны с работающим двигателем.

Исследования проводились в гидродинамической лаборатории ИГМ НАН Украины в открытом гидрлотке с размерами 1.0 x 1.0 x 42 м. Общая схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Траектория движения модели располагалась на глубине 0,5 м по оси лотка, что позволило осуществлять фото-кинорегистрацию картины обтекания через окна в стенках лотка и через свободную поверхность с помощью камер 6 и импульсных осветителей 7.

В стартовом положении модель находится в катапульте и подключена к общему с ней источнику энергоснабжения, образуя одну систему. В зависимости от способа подвода энергии к такой системе и вида используемого рабочего тела, а также связанных с этим конструктивных особенностей ниже рассматриваются следующие типы систем модель – катапульта:

- модель с водопаровым реактивным двигателем и водопаровой катапульты;
- инерционная модель с пневматической катапульты;
- модель с водометным двигателем и пневматической катапульты.

Проведенные эксперименты показали, что в ряде случаев высокой начальной скорости модели недостаточно для формирования развитой каверны на начальном участке подводной траектории. Такая ситуация возникает, например, при относительном уменьшении диаметра кавитатора модели по сравнению с диаметром ее корпуса, даже если в расчетном стационарном режиме размер кавитатора достаточен для образования каверны требуемых размеров. В таких случаях организация устойчивого режима движения модели в суперкаверне достигалась с помощью дополнительных технических средств. Для этой цели в гидрлотке 1 была выделена стартовая камера 8 с помощью перегородки 9 со сменными люками и устройствами, регулирующими условия входа модели в воду после её старта из катапульты.

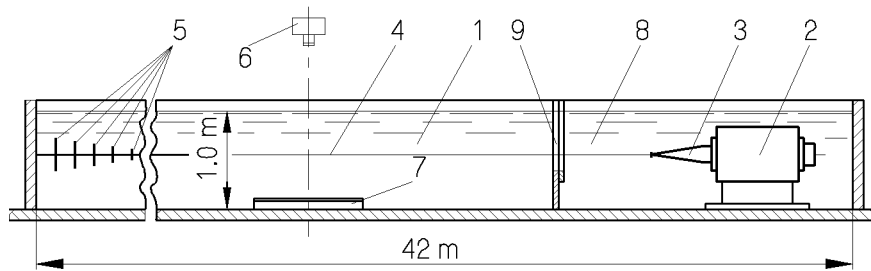


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – лоток; 2 – катапульта; 3 – модель; 4 – направляющая проволока; 5 – устройство для гидродинамического торможения моделей в виде установленных на проволоке металлических дисков с последовательно увеличивающимся диаметром

ОБТЕКАНИЕ МОДЕЛЕЙ С ВОДОПАРОВЫМ РЕАКТИВНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Водопаровой реактивный двигатель представляет собой разновидность энергодвигательной установки, в которой происходит прямое преобразование тепловой энергии в работу силы тяги и протекают одновременно гидродинамические и термодинамические процессы, включающие фазовые превращения рабочего тела.

Применение горячей воды в качестве рабочего тела реактивных двигателей имеет значительную историю. В разное время, начиная с античности, появлялись различные варианты приборов, использующих для выполнения работы реактивную струю пара. Серьезные работы по применению горячей воды для ракет начали проводиться, по-видимому, перед Второй мировой войной в Германии, а после войны – в Западной Германии, США и Италии [5–8]. Интерес к двигателям такого типа обусловлен прежде всего их экономичностью и экологическими показателями. Значительный объем исследований по тепловым гидрореактивным двигателям, включая водопаровые двигатели, проведен в ИГМ НАН Украины [1, 9, 11]. Исследования проводились применительно к задаче создания скоростных подводных аппаратов, использующих для работы двигателя забортную воду. Наряду с теоретическими работами был выполнен значительный объем экспериментальных исследований характеристик водопарового двигателя [11]. На установках различного масштаба изучались как интегральные характеристики двигателя (тяга, расход, давление, температура), так и детальная картина течения в реактивном сопле. Эксперименты включали нагрев воды в за-

мкнутом сосуде до состояния насыщения или близкого к насыщению (недогретая вода) с последующим истечением через реактивное сопло. Зарегистрированные картины течения являются чрезвычайно сложными по структуре рабочего тела, изменяющего в процессе истечения свое агрегатное состояние. При расширении в сопле недогретая вода испаряется и образует пароводяную смесь. При этом в процессе течения в сопле Лавала недогретая вода последовательно проходит стадии насыщения, перегрева и парообразования, которые взаимосвязаны. Соответственно меняется структура потока – из однородной капельной в пузырьковую, а затем в парокapельную. Значительное влияние на параметры течения могут оказывать флуктуации растворенного воздуха и посторонних взвесей в воде [11].

Ввиду значительной сложности указанных процессов для практического расчета характеристик водопарового двигателя используются различные приближенные методы, один из которых предложен Г.В.Логвиновичем [1]. Рассматривается идеализированный реактивный двигатель (рис. 2, а), обладающий соплом с площадью сечения F_j , через которое истекает поток массы \dot{m} со скоростью c . Скорость истечения есть функция параметров рабочего тела внутри камеры двигателя и давления на срезе сопла P_j . Для контрольной поверхности, пересекающей выходное сечение сопла P_j и проходящей вдоль внутренней поверхности сопла и камеры двигателя (штриховая линия на рис. 2, а), применяется теорема импульсов и определяется результирующая сила давления на внутренние стенки камеры двигателя и сопла как условная полная тяга двигателя $\dot{m}c + P_j F_j$. Для двигателя, помещенного в пространство с внешним

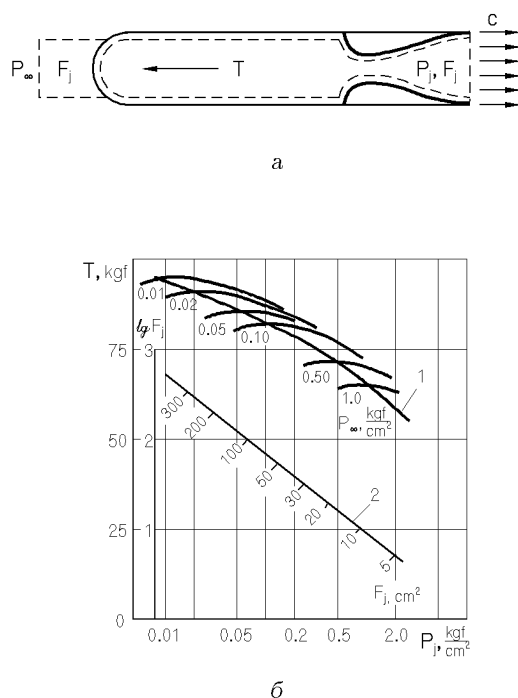


Рис. 2. К расчету характеристик водопарового двигателя [10]:

а – схема идеализированного реактивного двигателя; б – диаграмма для определения тяги двигателя

статическим давлением P_∞ , учитывается результирующая внешних сил $-P_\infty F_j$ и определяется величина стендовой тяги T двигателя в покоящейся среде по формуле

$$T = \dot{m}c + F_j(P_j - P_\infty). \quad (1)$$

Для такого двигателя рассматривается идеализированный рабочий цикл, в котором к соплу подводится нагретая вода, испаряющаяся частично в самом сопле. При этом процесс расширения предполагается адиабатическим и равновесным. На основании общих термодинамических соотношений для воды и водяного пара рассчитаны характеристики истечения из сопла пароводяной смеси в случае, когда к соплу подведена вода с нулевым паросодержанием под давлением $P = 100 \text{ кгс/см}^2$ и при температуре $t = 309^\circ \text{C}$. Соответствующая диаграмма приведена на рис. 2,б. В сопле происходит расширение рабочего тела до давления P_j , отложенного по оси абсцисс. По оси ординат отложена величина тяги T , развиваемой при истечении 1 кгс воды за 1 с. Кривая 1 соответствует слагаемому $\dot{m}c$ в формуле (1). Пересекающие ее кривые соответствуют полным значениям тяги по формуле (1), рассчитанным для различных

величин внешнего давления P_∞ . Точки $P_j = P_\infty$ соответствуют работе двигателя с "расчетными соплами", когда тяга максимальна и определяется только слагаемым $\dot{m}c$. На той же диаграмме отложены расчетные значения выходного сечения сопла (кривая 2).

В работе приводится также конкретный пример расчета величины тяги водопарового двигателя, работающего в пространстве с давлением $P_\infty = 0,02 \text{ кгс/см}^2$, что соответствует давлению в естественной паровой камере при температуре воды 20°C и близко к условиям описываемых ниже экспериментов. При давлении на срезе сопла $P_j = 0,1 \text{ кгс/см}^2$ и истечении 1 кгс воды в секунду получена величина развиваемой двигателем тяги $T = 87,5 \text{ кгс}$.

Экспериментальная установка для испытания моделей с водопаровым реактивным двигателем по принципу действия весьма близка к рассмотренной идеализированной схеме. Рабочий цикл двигателя модели включает нагрев воды в замкнутом объеме с последующим истечением бортового запаса нагретой воды через реактивное сопло для создания кратковременной тяги при свободном движении модели в воде. В связи с этим отметим, что изложенная в работе [1] упрощенная расчетная методика соответствует условиям стационарного истечения рабочего тела из сопла водопарового двигателя. Поэтому приведенные количественные характеристики могут использоваться только для приближенных оценок параметров рассматриваемой ниже экспериментальной установки. Конструктивная схема модели с водопаровым двигателем приведена на рис. 3,а. Цилиндрическая часть 1 корпуса модели содержит запас рабочего тела водопарового двигателя. Реактивное сопло 2 двигателя установлено в конце корпуса и имеет центральное тело, которое заканчивается выступающим из корпуса модели хвостовиком 3. Хвостовик предназначен для стыковки с замком катапульты и удержания модели в процессе нагрева и роста давления воды в модели и катапульте. Носовая коническая часть 4 корпуса модели герметически изолирована от цилиндрической части. На ее носу установлен сменный кавитатор 5. Общий вид такой модели с диаметром корпуса 58 мм представлен на фотографии рис. 3,б.

Схема водопаровой катапульты с установленной в ней моделью дана на рис. 4. Катапульта представляет собой осесимметричную конструкцию с герметичным корпусом 1, допускающим ее установку в подводном положении. В корпусе установлены электронагреватели 2, окруженные теплоизолирующим материалом 3 и питаемые по кабе-

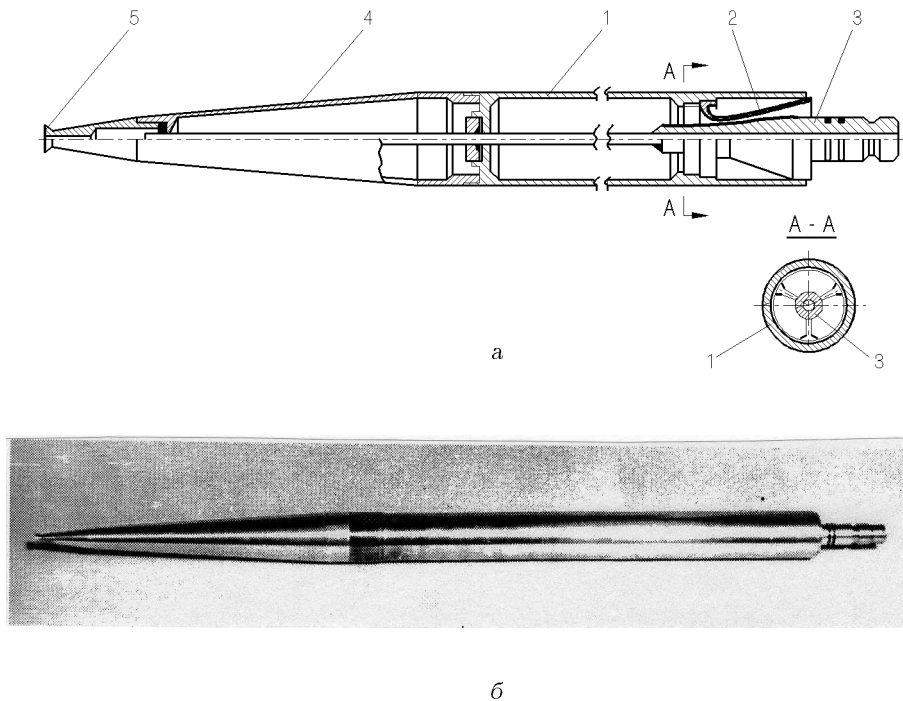


Рис. 3. Конструктивная схема (а) и фотография (б) модели с водопаровым реактивным двигателем

лям 4 с герметичной изоляцией. По оси катапульты расположена рабочая камера 5, в которой устанавливается модель 6 с водопаровым двигателем. Внутренний объем рабочей камеры с установленной в ней моделью герметизируется резиновыми уплотнениями 7, расположенными на стыках с корпусом и хвостовиком модели, которая удерживается в катапульте за хвостовик с помощью замка 8. При установке модели в катапульту внутренний объем цилиндрического корпуса модели и рабочей камеры катапульты заполняется водой, для измерения температуры которой используется термометр 9. Старт модели из катапульты после достижения требуемых параметров воды осуществляется путем открывания удерживающего модель замка 8, снабженного пневматическим приводом.

На графиках зависимости давления P нагреваемой воды от ее температуры t (рис. 5) данные экспериментальных измерений обозначены точками, сплошная кривая построена по справочным данным для химически чистой воды [12]. В экспериментах использовалась технически чистая водопроводная вода без каких-либо специальных мер по ее очистке, поэтому определенный разброс экспериментальных данных следует объяснить нали-

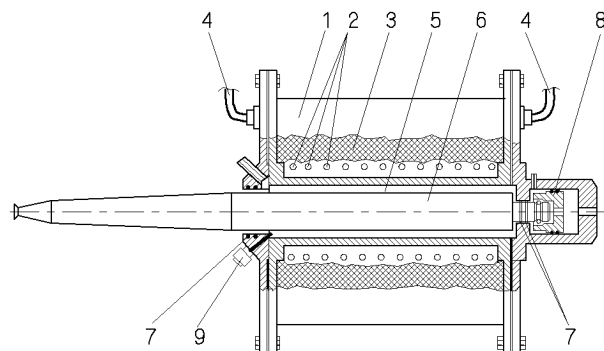


Рис. 4. Схема водопаровой катапульты с установленной в ней моделью

чием посторонних примесей, в том числе растворенного воздуха в используемой воде. Отметим, что полученные в экспериментах параметры нагреваемой воды близки либо превышают параметры $P = 100 \text{ кгс/см}^2, t = 309^\circ \text{C}$, принятые для построения диаграмм из работы [1], (см. рис. 2).

Некоторые характерные результаты испытания моделей с водопаровым реактивным двигателем представлены на рис. 6 и 7.

Из приведенных характерных графиков измене-

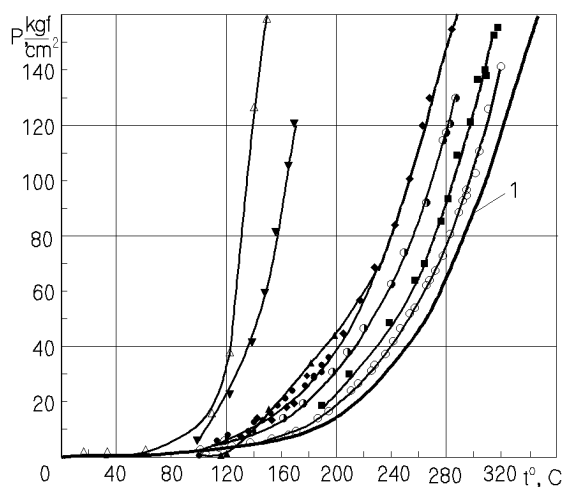


Рис. 5. Экспериментальные зависимости давления нагреваемой в катапульте воды от ее температуры

ния скорости V модели вдоль дистанции l ее свободного движения в воде (рис. 6) видно, что после старта из катапульты скорость модели на начальном участке пути возрастает, после чего в ряде случаев зарегистрировано движение с практически постоянной скоростью на длине пути около 20 м. В связи с этим представляет интерес вернуться к приведенному выше примеру расчета тяги водопарового двигателя из работы [1] и сопоставить его с экспериментальными результатами. Бортовой запас нагретой воды в применявшихся моделях составлял 0,90 – 0,95 кгс при начальных параметрах, близких к принятым в расчетной методике. Условия проведения экспериментов отличались от расчетных конечной величиной запаса нагретой воды, близкой к расчетному сундному расходу, и неизбежным падением давления в камере двигателя в момент старта модели из катапульты. Можно, однако, предположить, что указанные различия не отражаются существенным образом на величине тяги двигателя в течение короткого интервала его работы, который при средней скорости модели 110 м/с и длине рабочего участка траектории около 20 м составляет менее 0,2 с. Такое предположение подтверждается результатами испытаний, в которых зарегистрированы режимы движения модели с практически постоянной по длине скоростью и получены фотографии картины обтекания модели. В этих случаях модель двигалась в суперкаверне без замывов корпуса, т. е. ее полное сопротивление было равно сопротивлению носового кавитатора и должно было соответствовать развиваемой двигателем тяге.

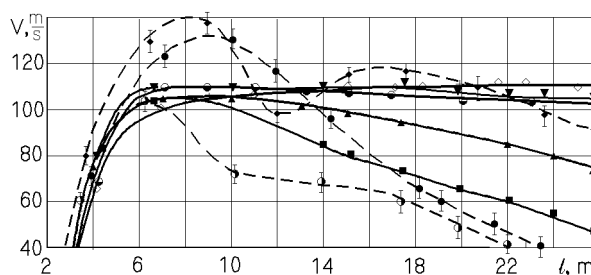


Рис. 6. Изменение скорости модели с водопаровым двигателем вдоль дистанции свободного пробега

Величина сопротивления R_x дискового кавитатора диаметром D_n определяется по формуле [23]

$$R_x = c_x F_n \frac{\rho V^2}{2}, \quad (2)$$

где $c_x = 0,82$ – коэффициент сопротивления для диска; $F_n = \frac{\pi D_n^2}{4}$ – смоченная площадь кавитатора; ρ – плотность воды; $V \approx 110$ м/с – характерная для рассматриваемых режимов движения скорость модели. Для моделей с дисковыми кавитаторами размером $D_n = 12 \div 16$ мм получены значения кавитационного сопротивления в диапазоне $R_x = 57 \div 101$ кгс, что удовлетворительно соответствует приведенной выше расчетной величине тяги двигателя $T = 87,5$ кгс.

На рис. 6 штриховыми линиями нанесены также графики $V(l)$ с резкими изменениями величины скорости модели вдоль пути. Такие режимы движения зарегистрированы для моделей с относительно малыми размерами носового кавитатора $D_n = 10$ мм. При подводном старте для таких моделей не удалось обеспечить формирование осесимметричной суперкаверны на начальном участке траектории, результатом чего явился неустойчивый режим движения с частичными несимметричными замывами корпуса и переменной по длине величиной полного сопротивления модели.

Из фотографии режима суперкавитационного обтекания модели без замыва корпуса (рис. 7, а) при скорости модели $V = 124$ м/с видно, что реактивный двигатель модели работает в естественной паровой каверне, т. е. в среде с давлением насыщенных паров воды, соответствующим принятой в расчетном примере величине $P_\infty = 0,02$ кгс/см².

Результаты обмера профиля зарегистрированных стационарных паровых каверн представлены графиками на рис. 7, б. Экспериментальные данные на графике сопоставляются с уравнением контура каверны, предложенным Г.В.Логвиновичем

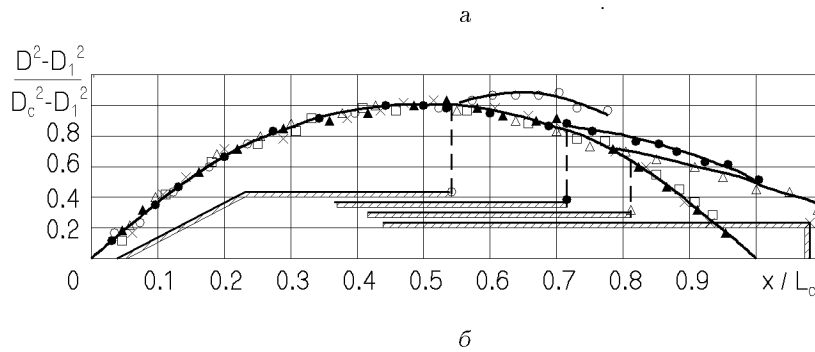


Рис. 7. Фотография паровой суперкаверны при ее замыкании на струю реактивного двигателя (а) и результаты обмера контуров паровых суперкаверн (б)

[23]:

$$\frac{D}{D_c} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{D_1^2}{D_c^2}\right) \left(1 - \frac{2x}{L_c}\right)^2}, \quad (3)$$

где D, x – текущие диаметр и координата сечения каверны; D_c, L_c – диаметр миделевого сечения и длина каверны; $D_1 = 1,92D_n$.

На графиках рис. 7, б в соответствующем масштабе нанесены также контуры кормовой части модели и положение выходного сечения реактивного сопла относительно каверны, а также зарегистрированные контуры паро-водяной реактивной струи, истекающей из сопла. Сопоставление показывает хорошее совпадение экспериментальных данных с расчетным профилем по всей длине каверны вплоть до точки её замыкания на корпус модели либо на реактивную струю. Это свидетельствует об отсутствии влияния струи реактивного двигателя модели на параметры паровой каверны.

ОБТЕКАНИЕ ИНЕРЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

Использование горячей воды и пара в системе привода моделей связано со значительными техническими сложностями и практически исключает возможность размещения в корпусе модели каких-либо устройств, кроме двигательной установки. В то же время, как отмечалось, стабильные режимы суперкавитационного обтекания могут быть получены при инерционном движении модели в воде с требуемой скоростью. В этом случае для старта

модели используется энергия сжатого воздуха, а внутренний объем корпуса модели может быть использован для других целей, в том числе для обеспечения поддува каверны в процессе движения модели.

Конструктивная схема варианта такой модели представлена на рис. 8. В данном случае концевая часть цилиндрического корпуса 1 модели герметически перекрыта сменной кормой 2, геометрия которой может видоизменяться в зависимости от требуемого режима обтекания модели. В таком варианте эта часть корпуса может использоваться для бортового запаса сжатого воздуха, предназначенного для поддува каверны. Зарядка модели сжатым воздухом осуществляется через впускной клапан 3. Из цилиндрической части 1 сжатый воздух через жиклер 4 поступает в носовую часть модели. Для равномерного выпуска воздуха в каверну за носовым кавитатором 5 установлено кольцевое сопло 6.

Расход воздуха для поддува каверны определяется величиной давления воздуха в цилиндрическом корпусе 1 и пропускной способностью жиклера 4. Специальными экспериментами установлено, что для жиклеров с диаметром канала менее 1 мм при давлениях закачиваемого в модель воздуха $P = 40 \div 120 \text{ кгс/см}^2$ расход воздуха из кольцевого сопла модели остается практически стабильным в течение 2 – 5 с в зависимости от типа жиклера и начальной величины давления в модели. Это значительно превышает продолжитель-

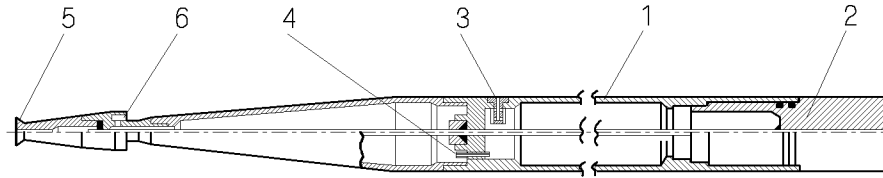


Рис. 8. Конструктивна схема інерційної моделі

ність движения модели на рабочем участке траектории, которая в описываемых экспериментах не превышала 0,4 с. При проведении экспериментов необходимый режим истечения воздуха из модели устанавливался непосредственно перед стартом.

Для запуска инерционных моделей описанного типа использовалась пневматическая катапульта с разгонным стволом длиной до 4,5 м, что при давлении сжатого воздуха в системе до 160 кгс/см² обеспечивало значения начальной скорости модели до 130 м/с. Полученные экспериментальные результаты охватывают диапазон чисел паровой кавитации $\sigma_{\text{пар}} = 0,012 - 0,054$ и чисел Фруда $\text{Fr}_{D_n} = 102 - 392$, где

$$\sigma_{\text{пар}} = \frac{p_{\infty} - p_{\text{пар}}}{\rho V^2 / 2}; \quad \text{Fr}_{D_n} = \frac{V}{\sqrt{g D_n}}.$$

Как видно из графиков, приведенных на рис. 7, в указанном диапазоне параметров σ и Fr влияние весомости практически отсутствует и длина каверны может значительно превосходить длину модели. Поэтому при отсутствии у модели реактивного двигателя возможно было экспериментально получить свободную паровую каверну с возвратной струей в зоне смыкания ее границ при отсутствии таких искажающих факторов, как унос газа из каверны в условиях вентилируемой кавитации. Соответствующая этому случаю схема обтекания показана на рис. 9, а в системе координат, связанной с кавитатором. Суммарная энергия E_{Σ} , характеризующая процесс движения модели в каверне, складывается в данном случае из кинетической энергии модели и энергии, переносимой каверной, которая может быть определена как работа силы гидродинамического сопротивления R_x модели на пути, равном длине каверны L_k , т.е.

$$E_{\Sigma} = \frac{MV^2}{2} + \int_0^{L_k} R_x dL_k, \quad (4)$$

где M – масса модели. При движении в воде по инерции скорость модели непрерывно падает и каверна сокращается. В зависимости от скорости схлопывания каверны $\dot{L}_k = dL_k/dt$ скорость возвратной струи V_R может в большей или в меньшей степени превышать по величине скорость модели, т.е. $V_R \simeq V - \dot{L}_k$. В результате на определенном участке траектории возможно динамическое воздействие возвратной струи на кормовую часть модели, которая должна при этом получить кратковременный импульс в направлении движения. Естественно предположить, что указанный нестационарный эффект должен проявиться в импульсном повышении скорости движения модели.

Для проверки указанных предположений проведены эксперименты с моделями, кормовая часть которых снабжалась специальными деталями различной геометрии – так называемыми замыкателями, предназначенными для возможно более эффективного использования энергии возвратной струи каверны. При этом скорость движения модели измерялась с помощью датчиков, которые устанавливались в воде попарно с интервалом 1 м вдоль траектории и реагировали на изменение поля давления в сечениях гидролотка, пересекаемых моделью. Полученные результаты представлены на рис. 9, б в виде графиков изменения скорости модели вдоль траектории, где зафиксировано импульсное повышение скорости движения на участке траектории $l = 14 - 16$ м.

Исследование режимов вентилируемой кавитации проводилось на моделях калибром $D_m = 58$ мм с кавитатором диаметром $D_n = 12$ мм в диапазоне скоростей $V = 31 - 104$ м/с. В этом случае процесс формирования каверны после входа модели в воду происходил под влиянием фиксированной величины поддува, характеризуемого безразмерным коэффициентом расхода воздуха $C_Q = Q/VF_m$, где Q – объемный расход поддувае-

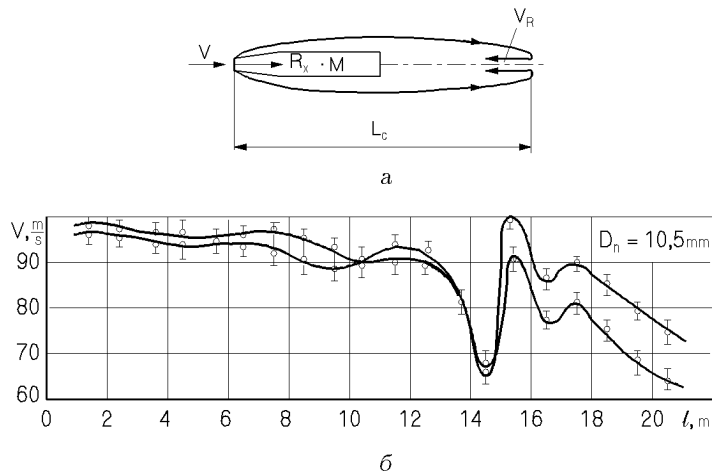


Рис. 9. Схема движения модели в свободной каверне с возвратной струей (а) и экспериментальные графики изменения скорости инерционной модели при движении в свободной паровой каверне (б)

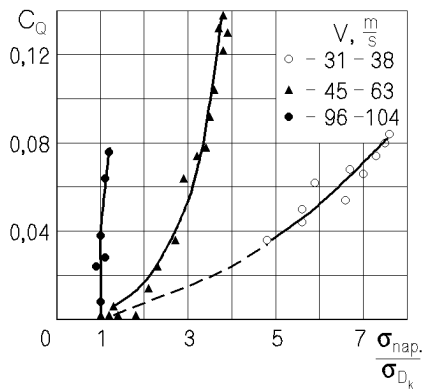


Рис. 10. Зависимость режима кавитационного обтекания модели от интенсивности поддува при различных скоростях движения в воде

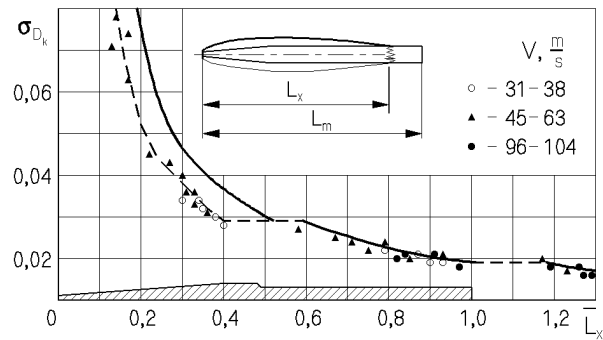


Рис. 11. Зависимость размеров каверны от режима замыкания на различных участках корпуса модели

мого воздуха, $F_M = \pi D_M^2 / 4$ – площадь сечения корпуса модели. В экспериментах регистрировались параметры стационарных каверн при их замыкании на различных участках корпуса модели и при свободном замыкании. В данном случае для анализа экспериментальных результатов представляет интерес сопоставление числа паровой кавитации $\sigma_{пар}$, определяемого по измеренной скорости модели, с фактической величиной числа кавитации σ_{D_k} , определяемой по результатам обмера фотографий каверн из выражения [23]

$$\frac{D_k}{D_{нпр}} = \sqrt{\frac{c_{x0}(1 + \sigma)}{K \sigma_{D_k}}}$$

откуда

$$\sigma_{D_k} = \frac{1}{\frac{K}{c_{x0}} \left(\frac{D_k}{D_{нпр}} \right)^2 - 1}$$

Здесь $c_{x0} = 0.82$ – коэффициент сопротивления диска при нулевом числе кавитации; $K \approx 0.98$ – эмпирический коэффициент; $D_{нпр} = \sqrt{D_n^2 - d_0^2}$; $d_0 = 2,5$ мм – диаметр направляющей проволоки. Полученные результаты представлены графиками на рис. 10 – 11, характеризующими параметры сформировавшихся под влиянием поддува стационарных каверн при различных скоростях движения модели в воде.

На рис. 10 представлены графики $C_Q \left(\frac{\sigma_{пар}}{\sigma_{D_k}} \right)$ для различных скоростей движения, из которых видно уменьшение влияния поддува на параметры каверны с ростом скорости модели. При скоростях дви-

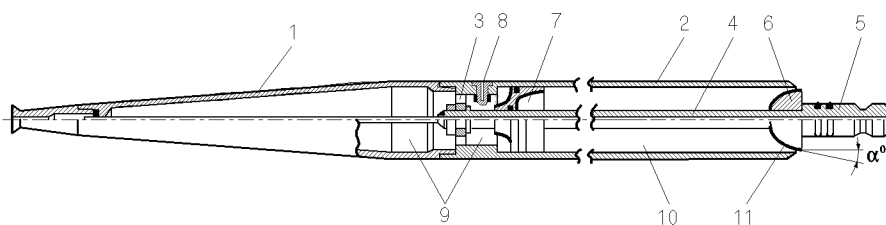


Рис. 12. Конструктивная схема модели с водометным двигателем

жения около 100 м/с режим обтекания модели приближается к режиму паровой кавитации и практически перестает зависеть от интенсивности поддува. На рис. 11 представлена зависимость безразмерной длины каверны $\bar{L}_x = L_x/L_M$ от числа кавитации $\sigma_{Dк}$ при замыкании каверны на различных участках корпуса модели, профиль которой нанесен на графике в соответствующем масштабе, и при свободном замыкании. Экспериментальные данные на графике сопоставляются с расчетом по уравнению (3) (сплошная линия). Отмечается совпадение экспериментальных данных с расчетом на цилиндрической части корпуса и при свободном замыкании каверны и относительное уменьшение размеров каверны при ее замыкании на конической носовой части модели, которая является осложняющим фактором на начальной стадии формирования каверны при входе модели в воду.

ОБТЕКАНИЕ МОДЕЛЕЙ С ВОДОМЕТНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

При изучении гидродинамики объектов с суперкавитационным режимом обтекания могут возникать специфические задачи, касающиеся взаимодействия суперкаверны со струей водометного двигателя. Соответствующая конструктивная схема модели с водометным двигателем, запускаемой с помощью пневматической катапульты, представлена на рис. 12. Корпус модели состоит из конической носовой части 1 и цилиндрической части 2, сообщающихся между собой через отверстия 3. По оси цилиндрической части установлен направляющий шток 4, который заканчивается хвостовиком 5, предназначенным для стыковки с удерживающим замком катапульты. В корме модели на штоке 4 установлено сменное центральное тело 6 кольцевого сопла водометного двигателя.

На штоке 4 установлен также подвижный пор-

шень 7 с кольцевыми уплотнениями по линиям стыка с корпусом и штоком. На схеме поршень 7 показан в предстартовом положении. При таком положении поршня модель через впускной клапан 8 заряжается сжатым воздухом, бортовой запас которого сосредоточен в передней части 9 корпуса модели. Часть 10 объема корпуса за поршнем заполняется водой, которая после старта модели вытесняется через кольцевое сопло 11, создавая реактивную тягу. Площадь выходного сечения сопла 11 и угол α^0 выпуска кольцевой струи воды устанавливаются с помощью сменного центрального тела 6. В качестве примера взаимодействия каверны с кольцевой струей воды на рис. 13 приведена фотография обтекания модели в гидродинамической трубе. В данном случае достигается стабилизация длины каверны при замыкании ее на конусную струю воды, истекающую из кольцевого сопла с углом конусности $\alpha = 15^0$.

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ИСПЫТАНИИ САМОХОДНЫХ МОДЕЛЕЙ

Как отмечалось, формирование развитой каверны на стадии входа модели в воде является необходимым условием получения устойчивого режима суперкавитационного обтекания на последующей части траектории. Опыт испытаний самоходных моделей показал, что при подводном старте высокая начальная скорость модели не всегда обеспечивает формирование осесимметричной каверны за кавитатором, результатом чего обычно является несимметричный замыв носового конуса и резкое изменение ориентации модели относительно вектора начальной скорости. В наибольшей мере это относится к моделям с относительно малым, по сравнению с диаметром корпуса, диаметром кавитатора. В связи с этим возникает необ-

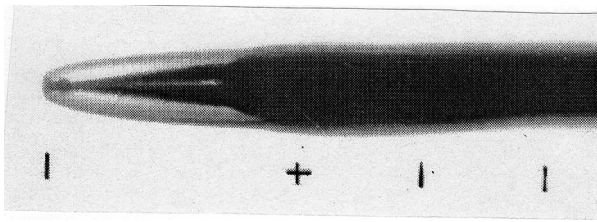
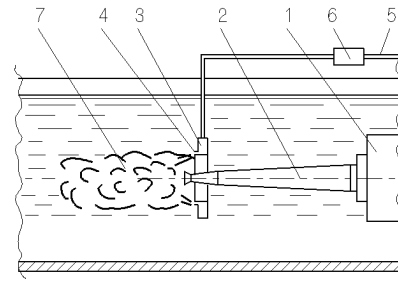


Рис. 13. Замыкание каверны на конусную струю водометного двигателя

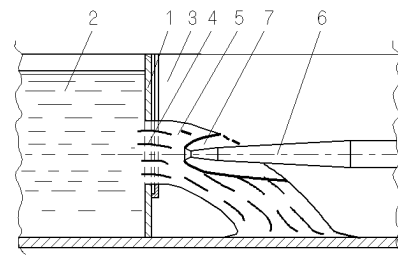
ходимость специальных устройств, предназначенных для регулирования условий входа модели в воду и оптимизации процесса формирования каверны за кавитатором. Устройства такого типа монтировались в изображенной на схеме рис. 1 стартовой камере гидролотка с установленной на ней катапульты.

Один из способов оптимизации процесса формирования каверны состоит в организации входа модели в воду через начальный воздушный пузырь. Схема создания такого пузыря для условий подводного старта модели приведена на рис. 14, а, где изображена катапульта 1 с установленной в ней моделью 2. Возле кавитатора модели соосно с ней установлена кольцевая распределительная камера 3 с кольцевым соплом 4. По магистрали 5 к устройству подводится сжатый воздух, подача которого в кольцевую камеру 3 регулируется с помощью электроклапана 6. Путем подбора параметров кольцевой камеры и сопла, давления сжатого воздуха и момента его выпуска в воду можно получить в момент старта модели воздушный пузырь 7, который в течение короткого промежутка времени сохраняет ориентацию по оси модели. В этом случае воздух из пузыря может захватываться в каверну и способствовать процессу ее формирования. Опыт испытаний показывает, однако, что подобная методика не обеспечивает стабильных результатов. Объяснением этому следует считать неоднородность внутренней структуры такого пузыря с хаотичным распределением масс воды и воздуха.

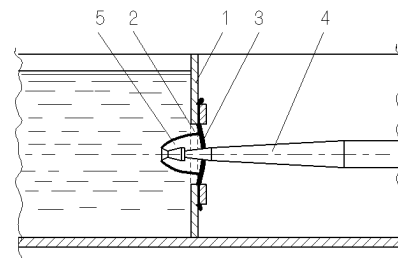
Наиболее стабильные результаты по обеспечению формирования каверны получены при организации старта модели из осушенной стартовой камеры в соответствии со схемой, приведенной на рис. 14, б. В этом случае в перегородке 1, отделяющей заполненный водой лоток 2 от сухой стартовой камеры 3, люк 4 закрыт подвижной заслонкой, которая непосредственно перед стартом открыва-



а



б



в

Рис. 14. Схемы входа модели в воду: через начальный воздушный пузырь (а); во встречную струю воды (б) и через эластичную диафрагму (в)

ет люк. В результате образуется встречная струя воды 5, в которую модель 6 входит после старта из катапульты. Благоприятные условия для формирования каверны 7 за кавитатором обусловлены в данном случае захватом в каверну атмосферного воздуха и тем, что давление в свободно истекающей струе равно давлению захватываемого атмосферного воздуха.

Неконтролируемый захват атмосферного воздуха в каверну, однако, недопустим при изучении количественных характеристик влияния поддува на процесс формирования каверны. В таких случаях вход модели в воду может быть организован в соответствии со схемой, приведенной на рис. 14, в. Для этого в перегородке 1, отделяющей сухой стартовый отсек от заполненного водой лотка, входной люк 2 перекрывается эластич-

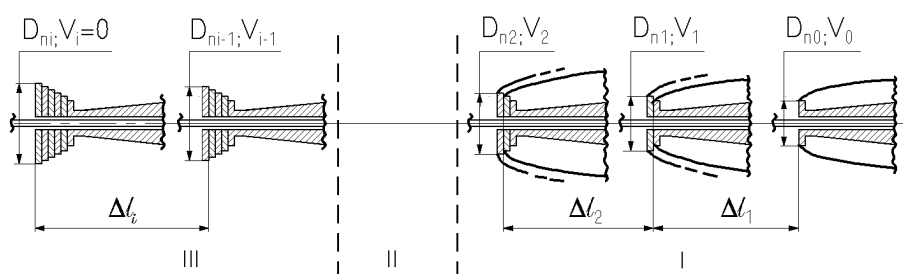


Рис. 15. Схема изменения режима обтекания модели вдоль тормозного пути

ной пластмассовой диафрагмой 3. Модель 4 при старте пробивает диафрагму, которая выполняет роль эластичного уплотнения, препятствующего проникновению атмосферного воздуха в заполненную водой область. В этом случае начальная каверна 5 формируется под влиянием заранее установленной величины поддува, осуществляемого из модели.

Следует отметить некоторые особенности используемой в экспериментах направляющей системы, которые касаются динамики системы в целом в процессе движения модели по проволоке. Известно, что движение объектов по упругим направляющим системам может сопровождаться некоторыми специфическими эффектами, например, в виде образования бегущей волны, которые обусловлены взаимодействием объекта с направляющей системой. Изучению таких процессов посвящена значительная литература [14–16]. В рассматриваемом случае влияние подобных эффектов на гидродинамические процессы обтекания моделей можно считать пренебрежимо малым по следующим причинам. Во-первых, на динамику натянутой в воде направляющей проволоки оказывает стабилизирующее действие эффект присоединенной массы [17]. Во-вторых, по своей энергетике и действующим силам нестационарные процессы, связанные с колебаниями направляющей проволоки, несопоставимы с соответствующими параметрами процессов обтекания модели при скоростях движения до 100 м/с и выше. Поэтому, с точки зрения устойчивости системы в целом и безопасности эксперимента, определяющую роль, как указывалось, играет характер обтекания модели на начальной стадии формирования каверны.

Специфической формой нестационарного процесса является обтекание модели при ее торможении в конце траектории. Расположенные на направляющей проволоке тормозные металлические

диски (см. рис. 1) после контакта с моделью движутся вместе с ней как кавитаторы с последовательно увеличивающимся диаметром и величиной гидродинамического сопротивления. В процессе торможения модель толкает перед собой увеличивающийся вдоль пути пакет таких дисков до полной остановки, как это изображено на схеме, приведенной на рис. 15. На схеме условно показаны три характерных участка тормозного пути, на которых качественно изменяется режим обтекания модели: участок I с преимущественно кавитационным режимом обтекания; участок III с безотрывным режимом обтекания и расположенный между ними участок II с переходным режимом. Таким образом, гидродинамическая сторона процесса торможения модели достаточно сложная. С практической точки зрения важным является то, что такое устройство позволяет простейшими средствами задавать любую требуемую интенсивность торможения от весьма плавного снижения скорости модели до резкой ее остановки. Нужный эффект достигается подбором диаметров тормозных дисков и интервалов между ними. Путем изменения одного из указанных параметров можно регулировать интенсивность тормозного процесса в весьма широких пределах.

В качестве иллюстрации к изложенному можно привести результаты расчета изменения скорости модели вдоль тормозного пути l_T при следующих условиях: вес модели 3.0 кгс; скорость перед участком торможения $V_0 = 100$ м/с; диаметр кавитатора $D_{n0} = 12$ мм; тормозные диски установлены с равными интервалами $\Delta l_1 = \Delta l_2 = \dots \Delta l_i = 1$ м; разница диаметров дисков на каждом интервале $\Delta D_n = D_{n_{i+1}} - D_{n_i}$ постоянна вдоль тормозного пути. С целью упрощения учитывалось только кавитационное сопротивление диска, для расчетов использовалась разработанная в ИПМАН У краины программа SCAV.

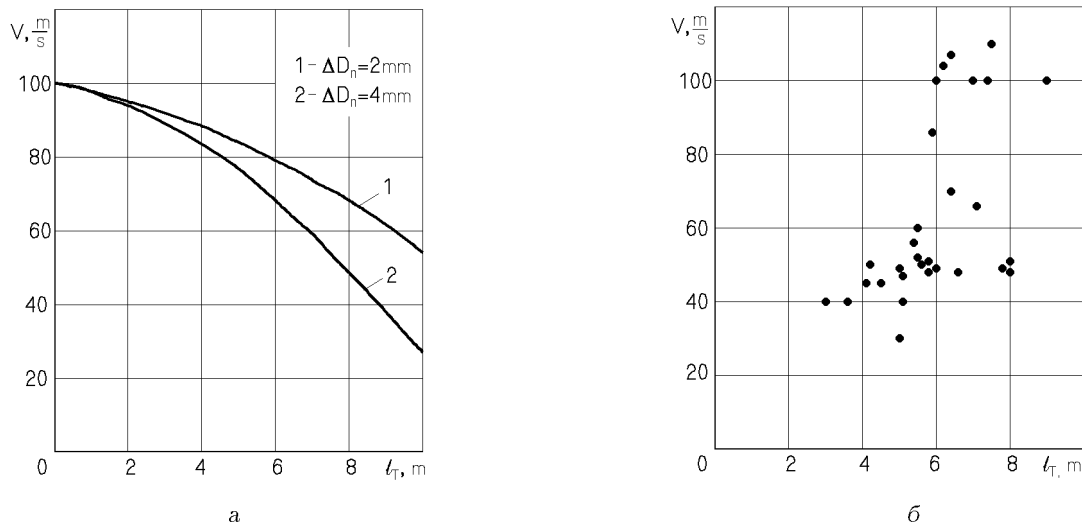


Рис. 16. Характеристики процесса гидродинамического торможения моделей:
а – расчет интенсивности падения скорости; б – экспериментальная регистрация длины тормозного пути

Как видно из приведенных на рис. 16, а графиков, принятая разница в размерах тормозных дисков обусловила двукратную разницу конечных значений скорости при равной длине тормозного пути. В реальных условиях падение скорости модели должно быть более значительным благодаря неучтенным составляющим полного гидродинамического сопротивления, которые в данном случае обусловлены как замывом корпуса модели, так и специфическими ударными процессами в начальный момент контакта модели с очередным тормозным диском.

Результаты опытной регистрации длины тормозного пути l_T приведены на рис. 16, б в виде экспериментальных точек в координатной системе $V(l_T)$, где в данном случае V – начальная скорость при старте модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенная методика проведения экспериментов с самоходными кавитирующими моделями показала свою эффективность в процессе многочисленных лабораторных испытаний. Приведенные экспериментальные результаты, касающиеся характеристик паровых суперкаверн и эффектов их взаимодействия системами модели, были получены на описанном экспериментальном комплексе впервые.

Опыт проведенных исследований показал, что методика испытания моделей, движущихся по проволоке, позволяет решать довольно широкий круг

задач, касающихся гидродинамики суперкавитирующих объектов, включая:

- образование суперкаверны;
- отработки системы поддува искусственной суперкаверны;
- режимов разгона и торможения;
- взаимодействие суперкаверны с двигателем и выступающими элементами конструкции;
- оптимизации условий замыкания каверны, а также ряд других задач, связанных с влиянием на динамику объекта, решение которых невозможно в других условиях из-за опасности потери устойчивости движения объекта.

1. Кнепп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф. Кавитация. – М: Мир, 1974. – 687 с.
2. Горшков А.С., Русецкий А.А. Кавитационные трубы. – Л: Судостроение, 1972. – 322 с.
3. Савченко Ю.Н. О движении в воде на суперкавитационных режимах обтекания // Гидромеханика. – 1996. – Вып. 70. – С. 105 – 115.
4. Kirschner Ivan, N. Supercavitating projective experiments at supersonic speeds // High Speed Body Motion in Water (AGARD, Report 827). – Kyiv. – 1998. P. 23 – 27.
5. Kolle H.H. Über die Wirtschaftlichkeit von Wasserdampftraketen als Horizontal - Starthilfen. – München. 1955. – 345 p.
6. Schwarzler K. Untersuchungen an Heiss Wasserraketen rum Start von Flugzeugen // Zeitschrift für Flugwissenschaften 6. Jahrgang, Heft 1. Januar. – 1958. – 465 p.
7. Etheimer I.P. Beiträge zu den Problemen der Heisswasserraketen. – Luftfahrt. Forschungsber. – 1962, n. 12. – 243 p.

8. Tunge Tohn F. Steam rocket successfully tested. Missiles and Rockets. – 1962. – n. 11. – 132 p.
9. Бабицкий А.Ф., Ивченко В.М. Струйная теория теплового гидрореактивного двигателя // Гидромеханика.– Вып. 5.– 1968.– С. 67 – 78.
10. Логвинович Г.В. Работа реактивного двигателя с эжекторным насадком // Гидромеханика.– Вып. 19.– 1971.– С. 3 – 9.
11. Ивченко В.М., Приходько Н.А., Григорьев В.А. Оптимальные гидрореактивные системы.– Красноярск: Изд-во Красноярского университета, 1985.– 218 с.
12. Под ред. Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. Физические величины. Справочник.– М: Энергоатомиздат, 1991.– 254 – 255 с.
13. Логвинович Г.В. Гидродинамика течений со свободными границами.– К: Наук. думка, 1969.– 208 с.
14. Кажяев В.В., Уткин Г.А. Движение массы вдоль струны под действием сил волнового давления. Дифференциальные и интегральные уравнения // Горький.– Изд-во ГГУ.– 1989.– С. 112 – 117.
15. Уткин Г.А. Постановка задач динамики упругих систем с движущимися по ним объектами. Волновая динамика машин // М.– Наука.– 1991.– С. 4 – 14.
16. Дерендяев Н.В., Солдатов И.Н. О движении точечной массы вдоль колеблющейся струны // Прикладная математика и механика.– Т. 61. Вып. 4.– 1997.– С. 703 – 706.
17. Федяевский К.К., Войткунский Я.И., Фаддеев Ю.И. Гидромеханика.– Л: Судостроение, 1968.– 568 с.