

НЕКОТОРЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ОТНОСЯЩИЕСЯ К ВРАЩЕНИЮ ТЕЛ

С. В. Малащенко

(Киев)

Начиная с 1942 г., автор принимал участие в работах, которыми руководил М. А. Лаврентьев, или проводил исследования, пользуясь его консультацией. Здесь приводятся некоторые результаты этих работ и исследований, полученные автором в разное время.

Была разработана методика экспериментального изучения движения вращающихся тел, использованная для рассмотрения устойчивости вращательного движения тел, содержащих в полости жидкость. При этом обнаружены эффекты, существование которых в момент начала исследования не было очевидным (немонотонные зависимости между геометрией полости, заполненной жидкостью, и устойчивостью вращательного движения тела, волны на поверхности этой жидкости, влияние вязкости на резонанс, парадокс всплывания и др.).

Некоторые из проведенных опытов были подсказаны более ранней работой С. Л. Соболева об устойчивости вращательного движения волчка, содержащего в полости жидкость [1].

В исследовании большое участие принимали механики А. А. Корзин, главный механик Э. В. Вирт, инженеры А. П. Польшанная и Е. П. Карандеева и на заключительном этапе М. Е. Темченко, которым автор приносит глубокую благодарность.

1°. В описываемых ниже исследованиях для сообщения телам большой угловой скорости применялся струнный привод.

Схема струнного привода показана на фиг. 1, где 1 — мотор, регулируемый в широком диапазоне чисел оборотов, 2 — испытуемый объект, 3 — весьма гибкая приводная струна (нить), 4 — система так называемых гасящих опор, устанавливаемых лишь в случае необходимости устранить поперечные колебания струны, возникающие при вращении с числом оборотов, превышающим критическое. Некоторые результаты, полученные на этой установке, уже опубликованы [2].

Установка позволяет осуществлять практически неограниченное по времени вращение тела с постоянной или регулируемой угловой скоростью. Возможность почти точного совмещения точки крепления струны к телу с центром его тяжести (лишь для тел, снабженных центральным отверстием) позволяет в большой мере устранить влияние струны на угловые колебания подвешенного тела. Прямой опыт показал, что потери энергии движения тела в этом случае малы.

Вращение осесимметричного тела на струнном приводе при достаточной угловой скорости будет всегда происходить вокруг его главной оси инерции, даже если точка крепления струны к телу не совпадает с этой осью.

Указанный эффект «самобалансирования» вращающегося на струне тела дает исключительно большие возможности при экспериментах; снимается вопрос о специальной балансировке испытуемого объекта, снижаются требования к точности его изготовления и др. Это, в частности, позволило с большой простотой и эффективностью осуществить разнообразные исследования вращаемых кумулятивных зарядов. Представилось возможным изучить в стендовых условиях влияние угловой скорости на работу кумулятивной струи.

Использование эффекта самобалансирования вращаемого тела, свойственное струнному приводу, позволяет качественно улучшить и упростить создание центрифуг для инженерных исследований. Применение струнного привода к таким конструкциям взамен обычно используемых жестких центрифуг позволило создать различные уникальные устройства.

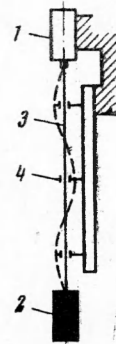
Разгонные устройства со струнным приводом позволили испытать на ползучесть и прочность изделия или их модели в поле центробежных сил, а также изучать устойчивость элементов оболочек, нагружаемых путем ускорения.

Для решения последней задачи использовалась установка, схематически показанная на фиг. 2.

Вращаемая на струне 2 траверса 3 несет исследуемые мягкие оболочки 4, сжимаемые в посадочном гнезде траверсы; 1 — мотор, 5 — постоянный магнит, связанный с траверсой 3. Неподвижная индукционная катушка, расположенная в стороне и присоединенная к стрелочному частотомеру, позволяет неконтактным способом определить число оборотов траверсы.

Плавное наращивая угловую скорость, можно определить момент, при котором модель оболочки в результате потери устойчивости вылетает из своего гнезда, что легко устанавливается на слух.

При помощи струнного привода возможно испытание вращающихся моделей в вакууме. Случай применения струнного привода в устройстве для определения трения тел о воздух рассмотрен А. П. Польшанной [3].



Фиг. 1

2°. Вращающееся на струнном приводе тело имеет пять степеней свободы, оно может совершать несколько типов движений, устойчивость которых определяется механическими характеристиками тела, размещением точки крепления струны относительно центра тяжести, значением угловой скорости вращения тела и внешними возмущениями. Опыт показал, что характеристики стальных струн (и, тем более, гибких нитей, например, капроновых) мало влияют на особенности движения подвешенного на них тела. При больших угловых скоростях это влияние вообще не отмечается.

Наблюдаются следующие основные типы движения тела при струнном приводе, три из которых рассматривались в работе [2]:

(1) — вращение тела вокруг своей оси при наличии переносного движения на струне типа движения конического маятника (фиг. 3, а).

(2) — вращение тела вокруг вертикальной оси, которая в данном случае будет совпадать с его главной осью инерции (фиг. 3, б).

(3) — коническое движение быстро вращающегося тела вокруг его центра тяжести (фиг. 3, в). Опыт показал, что при достаточной угловой скорости этот случай соответствует быстрой прецессии вращающегося тела.

(4) — медленная прецессия вращающегося тела.

(5) — движение, которое можно назвать «планетарным», характерное тем, что ось быстро вращающегося тела сохраняется вертикальной, в то время как струна, кроме собственного вращения, описывает в пространстве конус подобно движению 1) (фиг. 3, г).

Описанные выше типичные формы движения вращающихся тел на струнном приводе могли самопроизвольно переходить из одной в другую. Эти переходы свидетельствуют о наличии неустойчивых режимов движения, некоторые из них стали объектом нашего исследования. Представилось возможным изучать влияния малых факторов на движение модели.

Мы наблюдали, например, что непосредственной причиной, способствующей возникновению и развитию движения, отвечающего случаю 5), являются силы Магнуса при наличии осевой асимметрии в потоке воздуха, циркулирующего возле вращающегося тела. Такая асимметрия может быть создана, например, каким-либо препятствием, расположенным в зоне циркуляции. Это же движение может быть вызвано и силами трения приводной струны в отверстии нижней гасящей опоры, если там есть зазор и, как следствие, окатывание струной внутренней поверхности отверстия.

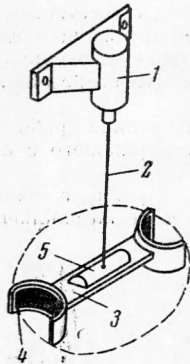
Как показали опыты, струнный привод представляет собою весьма чувствительное устройство для исследования устойчивости движения тел. Важным является возможность в стендовых условиях точно оценить условия вращения и изучить роль малых изменений параметров явления, что часто исключается при натурных испытаниях.

Можно указать, что для тела, подвешенного ниже центра тяжести и вращаемого на струнном приводе, движение его подобно движению «спящего» волчка, с той разницей, что здесь отсутствует трение ножки о твердую опору и к телу от приводной струны приложен момент, компенсирующий трение его о воздух. При снижении угловой скорости такой «спящий» на струне волчок при некотором числе оборотов теряет устойчивость и опрокидывается. Наблюдаемые здесь зависимости хорошо соответствуют формуле Маиевского.

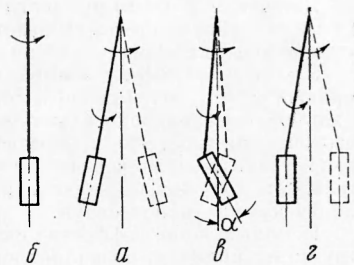
Как видно, можно рассматривать угловые движения 2) и 3) тела, вращающегося на струнном приводе, как движения такого же тела, свободно движущегося по инерции. Такое заключение, естественно, справедливо в пределах малых углов отклонений и тем достовернее, чем ближе точка крепления струны к центру тяжести подвешенного тела.

Как показано в работе [2], модель, подвешенная выше центра тяжести, всегда может совершать вращения типа 2) — вращение вокруг вертикальной оси (фиг. 3, б). Однако не всегда эта форма движения неизменна. Под влиянием малого возмущения, начиная с некоторого числа оборотов, движение 2) стремится перейти в движение 3) (рис. 3, в). Предельное положение вращающегося тела в положении 3) есть вращение вокруг экваториальной оси тела А, что, например, в случае полета снаряда отвечает его полному опрокидыванию. Будем условно называть далее движение 2) «устойчивым» и движение 3) — «неустойчивым» и переход одной формы в другую соответственно «стабилизацией» или «потерей устойчивости».

Для каждой модели, вращаемой на струнном приводе (при данных условиях подвеса), совершенно четко определяется критическое значение угловой скорости, ниже которой форма движения 2) стремится перейти в движение по форме 3) — модель те-



Фиг. 2



Фиг. 3

ряет устойчивость — «разбалтывается». Выше этой критической угловой скорости модель, даже совершающая движение 3), постепенно «стабилизируется», переходя к движению 2). Время «стабилизации» или «разбалтывания» модели тем больше, чем ближе значение угловой скорости к ее критическому значению.

В зоне критического значения угловой скорости возможно стабилизировать неустойчивое вращение модели наложением на нее весьма малого тушающего момента или незначительным увеличением ее угловой скорости. Для контроля можно апробировать устойчивость или неустойчивость вращения модели, например, весьма легкими ударами по ней, наблюдая в дальнейшем изменения (рост или уменьшение) угла наклона оси вращения тела к вертикали (угол быстрой прецессии) во времени.

Удалось провести также и количественную оценку величины неустойчивости вращательного движения тела на струнном приводе по изменению этого угла.

Не следует смешивать вопрос устойчивости или неустойчивости вращения модели на струнном приводе с вопросами движения модели в момент ее запуска — начала раскрутки. Модели, у которых осевой момент инерции (C) меньше, чем момент инерции экваториальный (A), в начале запуска всегда неустойчивы. В связи с этим их запуск возможен лишь при наложении дополнительного гасящего момента на приодную струну во время раскрутки.

Модели, у которых отношение $A : C$ лежит в интервале значений от 1 до 2, в опытах также мало удобны. При значении C , большем A , (диск) модель запускается без всяких затруднений. Такое тело устойчиво вращается при любом числе оборотов.

Выбор наиболее рациональных соотношений в размерах моделей и детали техники запуска их на струнном приводе здесь не рассматривается.

3°. Опыт показал, что тело, обладающее при данной угловой скорости на струнном приводе устойчивостью вращательного движения 2), в результате введения во внутреннюю полость даже небольшого количества жидкости теряет эту устойчивость — происходит постепенный переход движения к форме 3). Опытами было установлено малое влияние характеристик струны на результаты наблюдений, большая чувствительность методики исследования на струнном приводе и возможность осуществлять количественные исследования и в этом случае.

Применялись полые прозрачные модели, содержащие жидкость, и производились искровые съемки их при вращении на струнном приводе. Использовались монолитные и сборные модели, что позволило менять их динамические характеристики и форму внутренней полости за счет применения сменных пустотелых вкладышей различной формы с перегородками и др. Модели заполнялись жидкостью различной вязкости. Многие опыты осуществлялись на установке, которая позволяла автоматически регистрировать скорость изменения амплитуды прецессии испытуемого тела. Это достигалось путем фотографирования следа движения световой точки, образованной лучем, отраженным от сферического зеркала, которое закреплялось на торце вращающейся модели.

На каждом кадре фотографировались также стрелки секундомера, что позволило в дальнейшем строить графики изменения амплитуды отклонения тела по точкам.

При помощи начальной регулировки положения отражающего зеркала и системы прерывистого освещения (с известной частотой следования световых импульсов) получались фотозаписи движения тела, по которым вычислялись угловая скорость собственного вращения тела, угловая скорость и угол его прецессии.

Следующий опыт был основным. Пустотелая модель, вращаемая с угловой скоростью 9000 об/мин., обнаруживала полную устойчивость вращательного движения типа 2).

После введения внутрь полости незначительного количества воды модель при тех же числах оборотов проявляла неустойчивость вращательного движения 2), переходя постепенно к движению 3). Полностью заполненная водой, она проявляла большую неустойчивость. Замороженная модель приобрела полную устойчивость вращения в тех же условиях.

По мере нагревания вращающейся модели и, следовательно, таяния льда модель начинала постепенно терять устойчивость вращательного движения. После появления весьма незначительного количества талой воды потеря устойчивости становилась совершенно очевидной.

Опыты с моделями, заполненными парафином, показали те же закономерности. После расплавления парафина в ходе естественного охлаждения модели производилось определение устойчивости ее вращения на струнном приводе через 6, 15 и 60 мин. от момента полного расплавления.

Полностью остывшая модель выявила совершенную устойчивость вращения.

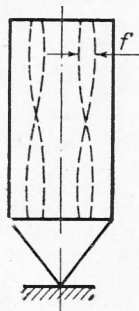
Специальные испытания показали, что и в этом случае какого-либо влияния струны (диаметром 0,3 мм, длиной не менее 200 мм) на результаты испытания не отмечалось. В некоторых опытах использовались модели с вкладной цилиндрической полостью, содержащей внутреннюю перегородку, перестановкой которой можно было изменять соотношение внутренних ее размеров или соотношения размеров отсеков в ней. В итоге, на основании многочисленных проведенных на струнном приводе опытов было установлено, что наличие жидкости в полости модели во всех случаях снижает устойчивость вращательного движения. Особо важным является то, что, как показал опыт,

существуют соотношения размеров полости, когда такое влияние жидкости становится очень сильным.

Это позволяет говорить о некоторых «резонансных» соотношениях этих величин, при которых наблюдается резкое снижение устойчивости вращательного движения модели.

Изменение коэффициента неустойчивости в зависимости от совместного влияния, вязкости и соотношения размеров полости исследовалось на цилиндрической пустотелой модели. При определенном их соотношении наблюдался резонансный эффект. Потеря устойчивости при резонансе с ростом вязкости наполнителя происходит быстрее. Как показал опыт, она линейно растет с увеличением угловой скорости вращения.

Если размеры полости в модели не отвечают резонансным соотношениям, можно было найти такое ее заполнение, при котором проявлялся «резонанс», в результате чего модель становилась совершенно неустойчивой при вращении.



Фиг. 4

Приведенные выше результаты наблюдений с замораживанием жидкости в полости модели, как видно, исключают возражения о заметном влиянии струны на устойчивость вращательного движения на ней твердой модели. В опытах вращения моделей, содержащих в полости жидкость, устанавливается эффект смещения точек бифуркации движения под влиянием изменения малых параметров явления, которым и в данном случае является смещение подвижной жидкости в полости вращающегося тела.

Если допустить, что влияние струны на движение тела и имеет место при наличии в полости тела жидкости, то эти возмущения можно отождествить с таковыми, например, от аэродинамических вихрей, срывающихся с корпуса снаряда в момент полета.

В результате исследования мы пришли к заключению, что даже не входя в исчерпывающие обоснования, какой механической схеме отвечает струнный привод, четко определилась возможность использования его для изучения роли жидкости и формы занимаемой ею полости, а также влияния этих факторов на устойчивость вращательного движения тела.

Результаты, устанавливаемые на струнном приводе, как видно, отражают закономерности, наблюдаемые при свободном полете вращающегося тела, в частности, содержащего в полости жидкость.

4°. По итогам исследований, кратко описанных выше, представилось возможным сформулировать выводы:

а) струнный привод может стать устройством (прибором) для изучения многих задач механики;

б) неустойчивость вращательного движения тела, содержащего в полости жидкость, определяется не общим изменением момента инерции тела в результате введения внутрь жидкости, а свойствами наполнителя — фактором ее подвижности;

в) ход разбалтывания модели на струнном приводе и в случае наличия в полости жидкости может быть весьма удовлетворительно представлен показательным по времени законом нарастания амплитуды отклонения оси тела от направления его устойчивого вращения (в пределах углов отклонения порядка 3—4°);

г) в опытах показано наличие критических соотношений размеров полости, заполненной жидкостью, вызывающих особо быструю потерю устойчивости вращательного движения модели. Эти критические соотношения условно названы «резонансными». Резонансные соотношения могут быть получены также путем изменения размеров свободного объема в жидкости, наполняющей данную модель;

д) показано экспериментально, что с ростом вязкости наполнителя возрастет эффект неустойчивости вращательного движения тела (что исследовалось для вязкости наполнителя не выше вязкости чистого глицерина);

е) установлено, что «резонансные» соотношения размеров полости сохраняются и с изменением вязкости наполнителя. Таким образом, на потерю устойчивости вращательного движения влияет сочетание факторов: вязкости наполнителя, формы и размеров полости;

ж) с увеличением угловой скорости неустойчивость вращения модели, обусловленная наличием жидкости, возрастает;

з) выводы о вращательном движении тел, содержащих в полости жидкость, полученные в испытаниях на струнном приводе, мы считали возможным перенести и на оценки свободного движения тел. Это заключение было подтверждено прямым исследованием нами вращающихся моделей, содержащих жидкость и сбрасываемых с высоты (см. ниже).

5°. Вращаемое прозрачное тело, содержащее в полости жидкость, фотографировалось с помощью освещения электрической искрой. При этом фиксировалась мгновенная картина движения свободной поверхности жидкости. Помещая внутрь основной жидкости несмешивающуюся с ней более легкую жидкость или вводя внутрь ее мельчайшие пузырьки воздуха, можно было с известным приближением получить представление и о движениях жидкости в ее объеме. Исследовались модели с цилиндрической и эллипсоидальной полостями.

Если модель с цилиндрической полостью вращается на ножке в форме «спящего» волчка, можно при некоторых угловых скоростях установить наличие вибраций жидкости. Образующая воздушной полости в модели при визуальном наблюдении представляется двоянной, как это схематически показано на фиг. 4. Вибрация жидкости с течением времени постепенно нарастает, далее происходит резкий срыв колебаний — внезапное уменьшение амплитуды f , повторное медленное нарастание амплитуды, срыв и т. д.

Существенным в описанном опыте является то, что вибрационный процесс, происходящий в жидкости, не оказывает заметного влияния на движение твердого корпуса модели, вращающейся на ножке. Описанный процесс колебаний жидкости во внутренней полости спящего волчка не воспроизводится однообразно в каждом эксперименте. Очень малые вибрации опоры, на которой совершается движение модели, как видно, способствуют возникновению колебаний жидкости.

Движение ножки модели по опорной плоскости всегда должно быть представлено как перемещение по кругу, пусть и очень малого радиуса, причем силы трения скольжения создают импульсы возбуждения, частота которых будет отвечать числу его оборотов, но она также создает момент, который гасит колебания корпуса, вызываемые колебанием жидкости в полости тела. Характеристики системы отвечают жесткому возбуждению.

В опытах по устойчивости вращения на струнном приводе очень малые возмущения от приводной струны, возможно, играют такую же роль в смысле начала колебаний жидкости. Но существенно меньшая величина потерь энергии в струне сравнительно с потерями энергии в опоре спящего волчка позволяет наблюдать на струнном приводе развитие явлений, связанных с наличием жидкости в полости, не наблюдаемых в случае вращения модели в форме волчка на ножке.

Особенности движения тела, вращаемого на струнном приводе, связанные с наличием в его полости жидкости, наблюдаются особо ярко в случае «резонансного» заполнения. В момент устойчивого вращения тела с таким «резонансным» заполнением (для чего необходимо наложить на него гасящий момент, например путем удержания струны рукою, или подтормаживанием ножки модели подобно случаю движения волчка) свободная поверхность жидкости внутри тела представляется в форме правильного цилиндра без признаков возмущений ее поверхности.

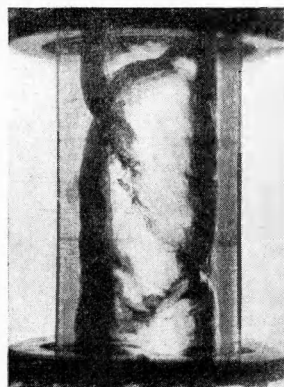
При снятии момента модель на струне начинает «разбалтываться» (быстро или медленно), в ходе чего можно наблюдать движение жидкости, не совпадающее с движением корпуса. В начальной стадии свободная поверхность в жидкости приобретает форму цилиндра с пространственно изогнутой осью (фиг. 5), в дальнейшем на ней появляется своеобразный волновой процесс (фиг. 6, 7). В эллипсоидальной полости не замечалось столь явного искривления оси воздушной полости или высокочастотных колебаний свободной поверхности жидкости.

По косвенным признакам можно судить, что малые колебания свободной поверхности жидкости, находящейся в полости модели, начинаются ранее, чем становится заметным возмущение в движении корпуса. Соответственно, колебания жидкости исчезают лишь через некоторое время после прекращения колебаний корпуса (если, например, на «болтающийся» корпус наложить гасящий момент).

Искровые фотографии движений жидкости внутри полости вращающейся модели показали, что в случае цилиндрической формы полости имеет место более сложное протекание явления сравнительно со случаем эллипсоидальной полости. Безусловным



Фиг. 5



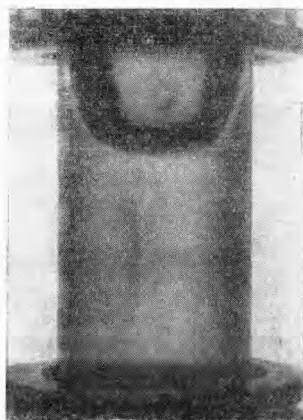
Фиг. 6



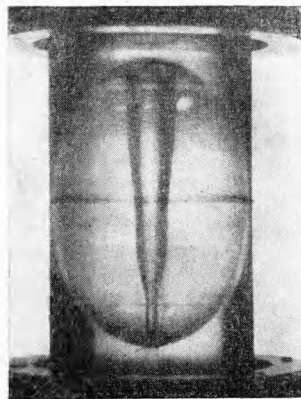
Фиг. 7

является то, что в обоих случаях жидкость совершает движение, не совпадающее с движением корпуса, причем в случае цилиндрической полости это движение явно не осесимметричное.

Наблюдая движение жидкости в модели через прозрачный торец, можно установить, что в момент прецессирования угол наклона корпуса модели к вертикали всегда больше, чем угол наклона оси воздушной полости, имеющейся в жидкости. Следова-



Фиг. 8



Фиг. 9

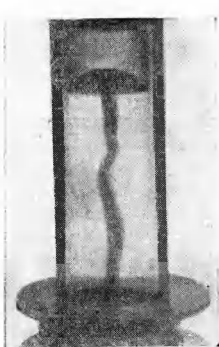
тельно, твердая модель, совершая одновременно вращение и коническое движение, как бы «откатывает» объем жидкости, находящейся внутри ее. В связи с этим становится более ясной роль пограничного слоя и роль вязкости.

По искривлению мениска у границы воздушной полости можно судить о возможной толщине пограничного слоя.

Описанная выше картина колебательного движения жидкости внутри модели в основном сохраняется

и при нерезонансных заполнениях и с увеличением вязкости жидкости. При этом лишь ослабевают высокочастотные слагающие колебания по поверхности, но общий характер особенностей движения жидкости в полости остается прежним.

Форма колебаний свободной поверхности жидкости внутри вращающейся неустойчивой модели, совершающей свободное падение, как показало наблюдение, аналогична рассмотренным случаям вращения этой модели на струне (фиг. 6).



Фиг. 10



Фиг. 11

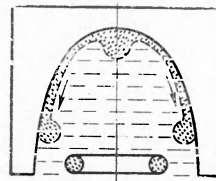
6°. Наблюдалась быстрая раскрутка и вращение жестко укрепленной к мотору прозрачной модели, в полости которой находилась прозрачная жидкость. В жидкость, в зависимости от требований опыта, дополнительно вводился воздух, непрозрачные жидкости, не смешивающиеся с основной (более легкие), легкие тела различной формы.

Можно было наблюдать движение жидкости и введенных в нее тел в момент быстрой раскрутки и дополнительных изменений углового положения раскручиваемой модели. Некоторые стадии движения фотографировались искровой съемкой. Опуская подробности отметим некоторые наблюдавшиеся эффекты.

При установившемся вращательном движении модели вокруг вертикальной оси свободная поверхность жидкости внутри тела должна представлять параболоид. При быстром вращении этот параболоид превращается в цилиндр, ось которого совмещена с осью вращения. В начальной стадии раскрутки можно наблюдать, как вершина параболоида становится плоской (фиг. 8), а также имеют место особые его формы (например, фиг. 9), указывающие на сложность явления раскрутки жидкости в полости, об этом свидетельствуют также наблюдаемые осевые колебания вершины воздушной полости, особенно в момент приближения ее к торцу полости. В момент изменения угла наклона вращающейся модели, содержащей в полости жидкость, можно отметить наличие нерегулярных движений в ней жидкости, что видно на фиг. 10, где видны искажения в области центральной зоны (заполненной подкрашенным бензином).

Уже отмечалось, что эллипсоидальная и цилиндрическая формы полости различаются в смысле особенностей движения в них жидкости при «разбалтывании» модели. Это различие существует и в смысле особенностей раскрутки жидкости в начальный момент вращения модели. Наблюдения на прозрачных моделях показали, что объемы жидкости, непосредственно соприкасающиеся с контуром полости и с ее торцом, при раскрутке получают большую угловую скорость сравнительно с жидкостью в централь-

ных зонах. При этом торец полости начинает играть роль центробежного насоса, в результате чего в жидкости в период раскрутки возникает циркуляционный поток. К сожалению, это явление не удалось зафиксировать в виде отчетливых фотографий (фиг. 11), поэтому на фиг. 12 приведена схема: точечной штриховкой показано небольшое количество окрашенного бензина, введенного внутрь рабочей жидкости, движение которого как-то иллюстрировало ход раскрутки, — бензин, подсасываясь к торцу полости, отбрасывается вдоль к ее периферии и двигается далее в форме вихревых торов (фиг. 11). Отброшенные торы отдают свою энергию центральным объемам жидкости, раскручивая ее. Исследовались плоские, конические и эллипсоидальные формы торца полости; оказалось, что наиболее энергичное «метающее» действие торца, в смысле отбрасывания вихревых торов в осевом направлении, наблюдается у сферической и эллипсоидальной форм. Можно считать, что в силу этого жидкость в эллипсоидальной полости раскручивается более интенсивно и с меньшими градиентами скорости по радиусу.



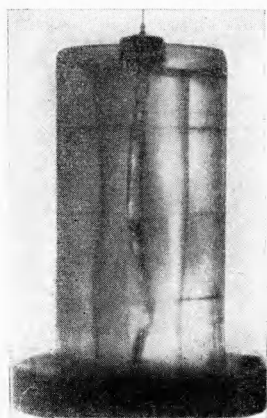
Фиг. 12

Не следует, конечно, отождествлять в приведенных опытах движение более легкого бензина с движением однородной жидкости, но косвенные представления об особенностях поведения жидкости у торца и на границах полости в период раскрутки из опытов можно получить.

Наблюдение над потерей устойчивости вращательного движения модели с малым количеством введенной в полость жидкости показали, что первоначально равномерно распределенная по внутренней поверхности жидкости (слой 2 мм) в момент потери устойчивости соскальзывает в зоны, удаленные от центра колебания. В результате этого смещения жидкости в модели создается определенный «небаланс», причем мгновенное положение центра тяжести смещенного объема жидкости не лежит на плоскости, проходящей через ось модели и ось, отвечающую направлению ее устойчивого вращения.

В ходе исследования роли тонких слоев жидкости, находящейся в полости модели, было показано, что на потерю устойчивости вращательного движения тела влияет не только весь объем жидкости, но особенно ее слои, примыкающие к внутреннему контуру полости.

Вводя внутрь цилиндрической полости модели, содержащей жидкость, небольшое количество более тяжелой и маловязкой жидкости, можно заметить существенное уменьшение коэффициента неустойчивости вращательного движения модели.



Фиг. 13

7°. Легкое тело, помещенное внутри жидкости, при вращении модели занимает положение в центре полости и вращается вместе с жидкостью. При наблюдении всплытия такого тела было обнаружено кажущееся нарушение привычных представлений. В невращающейся жидкости время всплытия легкого тела тем меньше, чем ниже вязкость жидкости. Во вращающейся жидкости всплытие легкого тела в спирте происходит более чем в 2 раза медленнее, чем в более вязком глицерине.

Этот «парадокс всплытия» поясняется наличием градиента угловых скоростей в потоке жидкости, обтекающей всплывающее тело. Это связано с необходимостью сохранения момента количества движения частиц в слое обтекания и влиянием вязкости на скорость послонной раскрутки жидкости в объемах перед всплывающим телом, или соответственно послонным ее торможением (в объемах за всплывающим телом).

В результате этого за всплывающим телом создается вихревая зона разрежения и зона повышенного давления перед телом. Суммарное их действие снижает скорость всплытия тела. Следует ожидать, что с дальнейшим снижением вязкости жидкости замедление всплытия легкого тела будет еще более заметным и в пределе — в идеальной вращающейся жидкости легкое тело вообще может не всплывать.

На фиг. 13 показана искровая фотография модели, содержащей внутри воду, керосин и воздух с нерезонансным заполнением, но вращающейся неустойчиво; максимальные возмущения в движениях жидкости сосредоточены вдоль оси полости.

Поступила 25 VI 1960

ЛИТЕРАТУРА

1. С о б о л е в С. Л. О движении симметричного волчка с полостью, наполненной жидкостью. ПМТФ, 1960, № 3.
2. И п л и н с к и й А. Ю., М а л а ш е н к о С. В., Т е м ч е н к о М. Е. О развитии устойчивых положений динамических равновесий одной механической системы. Изв. АН СССР. ОН, 1958, № 8.
3. П о л ы в я н н а я А. П. Методика определения момента трения о воздух вращающегося тела. Прикл. механика, 1955, № 4, вып. 1 (Изд-во АН УССР).