

В. В. Орлов, А. Н. Темнов,  
Г. Н. Товарных

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ

*Приведены краткое описание и результаты экспериментальных исследований характеристик вращающейся жидкости, вытекающей из ограниченного объема. Эксперименты проведены в учебно-экспериментальном центре МГТУ им. Н. Э. Баумана в целях определения остатков жидкости, вытекающей из вращающегося цилиндрического бака.*

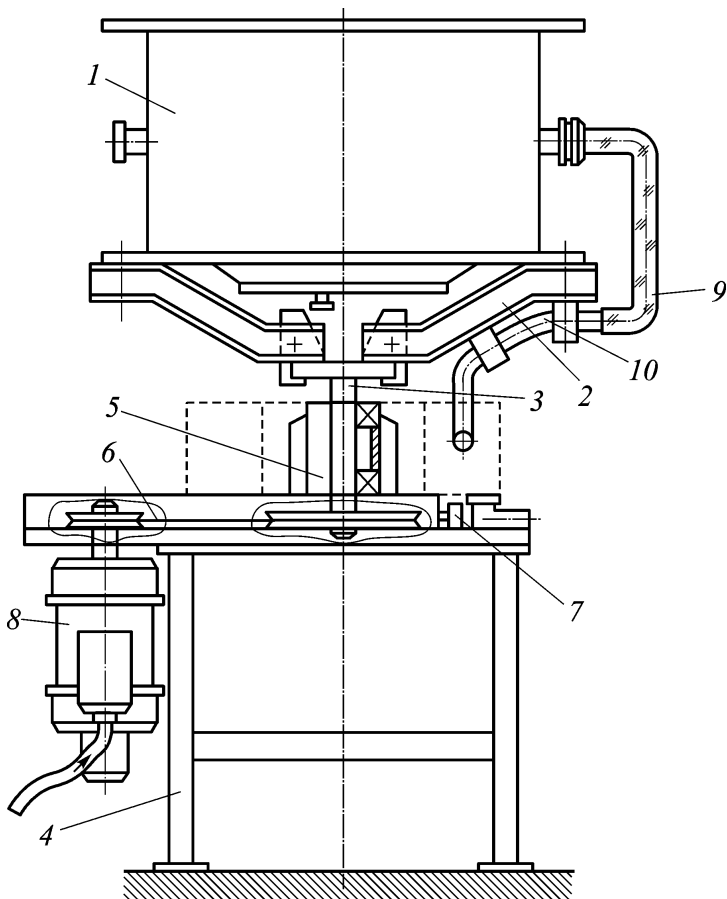
**E-mail:** [temnov@m1.sm.bmstu.ru](mailto:temnov@m1.sm.bmstu.ru)

**Ключевые слова:** жидкость, истечение, вращающаяся емкость, гидравлические остатки.

Процессы, сопровождающиеся вращением жидкости, которое является одним из фундаментальных видов движения, широко встречаются на практике. В последнее время появились работы [1, 2], посвященные изучению процессов воронкообразования при истечении вращающейся жидкости. Проблемы, связанные с истечением любой жидкости, подробно рассмотрены в монографиях [3] и [4]. Различные гидродинамические аспекты движения вращающейся жидкости применительно к природным явлениям изложены в монографии [5].

*Новизна исследований* по истечению вращающейся жидкости, которые были проведены в учебно-экспериментальном центре МГТУ им. Н.Э. Баумана, обусловлена асимметрией места стока относительно оси вращения и наличием внутрибаковых устройств. На первом, предварительном этапе эксперименты проводились на модельной емкости, а затем на конструктивно подобных моделях топливных баков. Большая часть экспериментов посвящена исследованию одной из интегральных характеристик истечения — гидравлическим остаткам, образующимся в сосуде вследствие нарушения сплошности вытекающего потока жидкости.

**Постановка экспериментальных исследований.** Эксперименты проводились с использованием прозрачного вертикально расположенного цилиндрического сосуда 1, установленного на вращающейся платформе 2 (рис. 1), соединенной с ведомым валом 3, который закреплен на силовом столе 4 посредством подшипников, расположенных в корпусе 5. Вращение платформы осуществлялось приводом, состоящим из электродвигателя постоянного тока 8, клиноременной передачи 6, натяжного устройства 7, электромагнитного усилителя, тахогенератора, трехфазного асинхронного двигателя, источника питания постоянного тока и реостата. Схема электропривода позволяла плавно



**Рис. 1. Схема экспериментальной установки:**

1 — емкость с жидкостью; 2 — лонжероны крепления емкости; 3 — вал; 4 — станина крепления привода; 5 — коробка привода; 6 — ремень привода; 7 — регулировочное устройство; 8 — электродвигатель; 9 — прозрачный шланг; 10 — патрубок слива жидкости

регулировать число оборотов двигателя в пределах 6... 300 об/мин при постоянном крутящем моменте на валу. В качестве рабочей жидкости использовалась вода, истечение происходило из открытого сосуда. Эксперименты проводились для нескольких режимов вращения сосуда:

- установившегося вращения, когда угловая скорость постоянна;
- раскрутки жидкости от состояния покоя до угловой скорости, равной установленной угловой скорости вращения сосуда;
- мгновенной остановки вращения сосуда, когда жидкость продолжала вращаться.

На каждом режиме проводились три серии экспериментов:

- истечение вращающейся жидкости через отверстие в дне емкости;
- истечение через отверстие в боковой поверхности;

— истечение вращающейся жидкости через торовое заборное устройство.

Каждый эксперимент повторялся 3 раза. Всего было проведено 138 экспериментов. Во всех экспериментах сливной шланг крепился к подвижной платформе так, что верхний изгиб шланга находился выше начального уровня заливки сосуда жидкостью, а нижний конец шланга с присоединенным к нему металлическим патрубком крепился так, чтобы выходное отверстие сливного патрубка находилось ниже плоскости дна сосуда. При таком способе крепления сливного шланга прорыв воздушных пузырей со стороны вращающейся жидкости при прохождении через верхний изгиб приводил к автоматическому прекращению истечения жидкости.

В процессе проведения экспериментов иногда возникало волнообразование на свободной поверхности жидкости, которое свидетельствовало о наличии биений оси вала вращающейся платформы. Этот факт использован для исследования и регистрации волновых движений свободной поверхности в режиме мгновенного торможения емкости. Свободная поверхность, имеющая форму, близкую к параболоиду вращения, во время волновых движений искажалась пространственными возмущениями в виде острых гребней и пологих впадин. По мере истечения и уменьшения скорости вращения жидкости волновые движения затухали, а поверхность принимала форму искаженного усеченного конуса. Волновые движения регистрировались виброизмерительной аппаратурой ВИБ-ТН, укомплектованной датчиками давления ДД-6, смонтированными в боковую поверхность цилиндрического сосуда. После регистрации волновых движений проводилась центровка установки до уровня биений менее 1 мм, измеряемых с помощью индикатора перемещений ИП-001.

Сливной патрубок открывался, и начиналось истечение жидкости в режиме установившегося вращения в момент времени, когда скорость вращения жидкости становилась равной угловой скорости вращения сосуда. Равенство угловых скоростей определялось визуально с помощью мелких частиц пенопласта, находящихся на свободной поверхности жидкости.

В процессе экспериментов измеряли начальный и конечный уровни свободной поверхности жидкости, период вращения сосуда, время слива жидкости, изменение давления на смачиваемой поверхности в режиме мгновенной остановки.

Начальный и конечный уровни свободной поверхности жидкости в сосуде измеряли с помощью мерной линейки (цена деления 0,001 м), закрепленной на внешней поверхности цилиндрической стенки сосуда. Начальный уровень невращающейся жидкости составлял 0,3 м. Время стока жидкости фиксировалось с помощью секундомера. В процессе эксперимента проводилась кинофотосъемка.

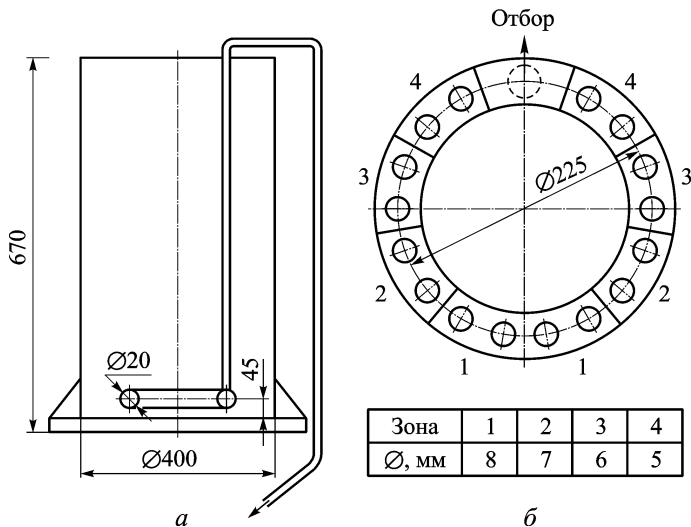


Рис. 2. Схема размещения торового заборного устройства (а) и его отверстий (б)

В первой серии экспериментов сток жидкости происходил через круглый штуцер диаметром 0,0195 м, ввернутый в днище на расстоянии 0,1 м от оси сосуда. Торцевой штуцер заделан заподлицо с дном сосуда. К наружному выводу штуцера присоединен гибкий прозрачный шланг (рис. 1), через который жидкость из вращающегося сосуда стекала в промежуточную неподвижную емкость.

Во второй серии экспериментов забор жидкости проводился через тот же штуцер, ввернутый в боковую стенку сосуда на расстоянии 0,1 м от дна. К наружному концу штуцера присоединялся гибкий прозрачный шланг.

В третьей серии экспериментов жидкость стекала через торовое заборное устройство (рис. 2), изготовленное из гибкого прозрачного шланга с внутренним диаметром 0,02 м. Забор жидкости происходил через 16 отверстий разного диаметра, просверленных в нижней части тора. Схема расположения отверстий показана на рис. 2, б. Торовое заборное устройство диаметром 0,225 м крепилось ко дну сосуда с помощью четырех подставок и хомутов. Расстояние между заборными отверстиями тора и дном сосуда составляло 0,035 м. Жидкость из тора отводилась по гибкому прозрачному шлангу, присоединенному к тройнику тора через боковую стенку сосуда.

**Анализ результатов.** Результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 3–10. Из рисунков следует, что при любом способе истечения жидкости ее конечный объем  $V_k$  (гидравлические остатки) зависит от скорости вращения.

При стоке жидкости через торовое заборное устройство во всем диапазоне изменений скорости вращения (см. рис. 4) не отмечены случаи, когда появлялись бы воронки. Воздух в сливную магистраль про-

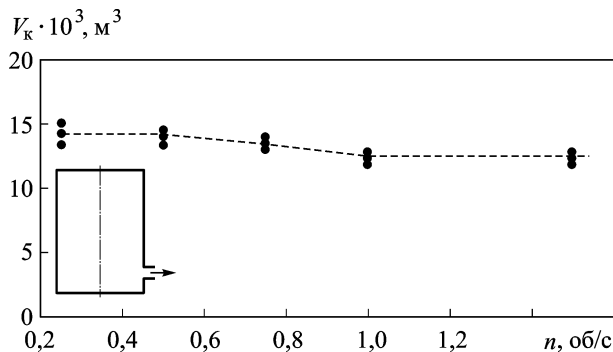


Рис. 3. Зависимость  $V_k(n)$  при сливе через боковое отверстие

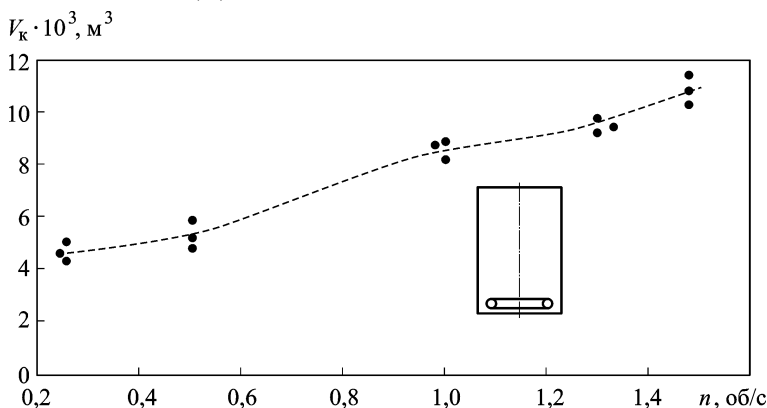


Рис. 4. Зависимость  $V_k(n)$  для торового заборного устройства

рывался лишь тогда, когда поверхность жидкости касалась кромок заборных отверстий торового коллектора (см. рис. 2).

Поверхность жидкости при малых скоростях вращения  $n = 0,25 \dots \dots 0,5$  об/с практически все время оставалась плоской и горизонтальной, а воздушные пузыри прорывались фактически сразу через все отверстия коллектора.

При скорости вращения  $n = 0,75 \dots 1,5$  об/с форма свободной поверхности жидкости претерпевала изменения от параболоида вращения в начале истечения до усеченного конуса в конце. Конус своей усеченной частью при оседании на коллектор касался сначала зоны 1 (рис. 2, б), в то время как зазор между диаметрально противоположной стороной конуса и коллектором составлял 15...20 мм.

При стоке жидкости через отверстие в боковой стенке (см. рис. 3) объем гидравлических остатков имел тенденцию к уменьшению с ростом угловой скорости вращения сосуда. Так, при изменении числа оборотов сосуда от нуля до 1,5 об/с объем гидравлических остатков уменьшался в 1,13 раза. Такой характер зависимости гидравлических остатков жидкости от угловой скорости вращения сосуда можно объяснить геометрией поверхности параболоида вращения в момент ее приближения к сливному отверстию.

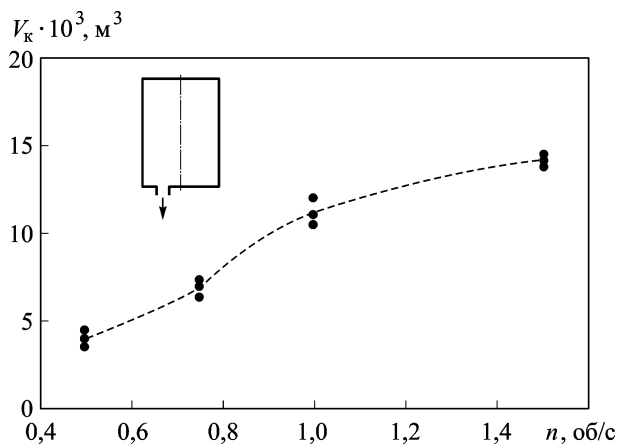


Рис. 5. Зависимость  $V_k(n)$  при сливе через донное нецентральное отверстие

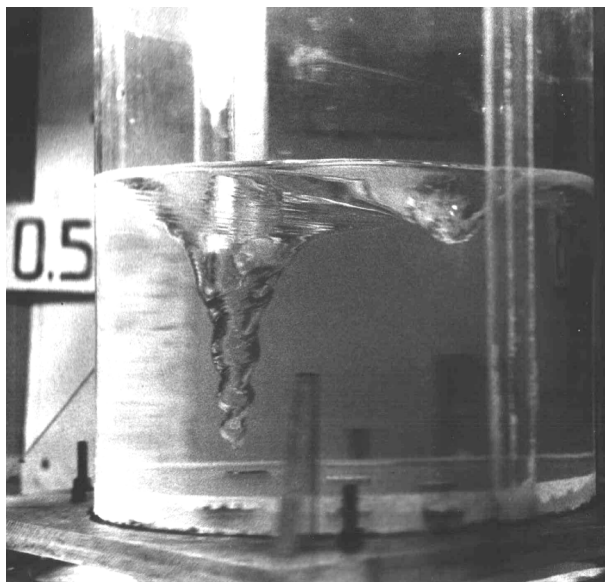
При малых оборотах ( $n = 0,25 \dots 0,75$  об/с), когда поверхность жидкости по мере истечения подходила к сливной горловине, на поверхности появлялись небольшие провалы (зарождающиеся воронки), которые из-за отставания скорости вращения жидкости от скорости вращения бака смещались в окружном направлении от сливного отверстия. Воздух в сливной патрубке прорывался в тот момент, когда поверхность жидкости подходила к верхней кромке бокового отверстия.

При скорости вращения  $n = 0,75 \dots 1,5$  об/с особенность физической картины исследуемого процесса состояла в том, что к началу прорыва воздуха в сливной патрубок поверхность жидкости становилась больше, чем была в начальный момент истечения, и сток жидкости прекращался, как только воздух попадал в сливной шланг.

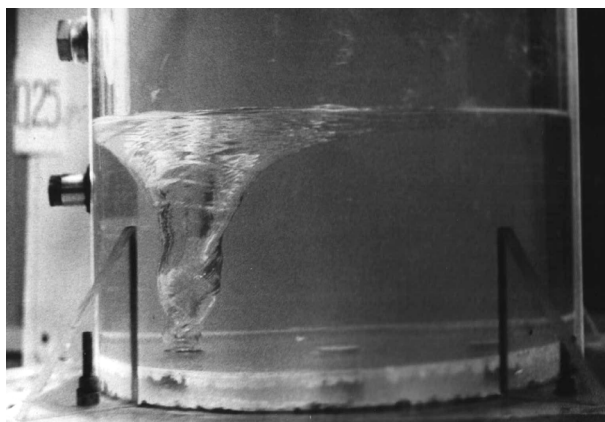
Зависимость гидравлических остатков жидкости при ее стоке через донное нецентральное отверстие имеет более сложный характер (см. рис. 5). При  $n = 0,25$  об/с в начальный момент времени появлялась узкая длинная воронка, которая почти достигала сливного отверстия, а затем исчезала. Поверхность жидкости оставалась почти плоской с локальными провалами, переходящими в воронки.

Периодичность появления таких воронок составляла 5–6 с (см. рис. 6). Отмечались случаи, когда воронка касалась отверстия. Прорыва отдельных воздушных пузырей в магистраль не происходило, а спустя 45–50 с после начала истечения появлялась мощная воронка (см. рис. 7), которая сразу достигала донного отверстия, и в трубопровод начинали поступать воздушные пузыри, а истечение из-за сифонного эффекта прекращалось.

При скоростях вращения  $n = 0,5 \dots 1$  об/с в начальный момент физическая картина процесса схожа с процессом, рассмотренным ранее. Отличие заключается в том, что отдельные малые пузыри диаметром 4–5 мм, видимо образующиеся при исчезновении воронок, попадали



**Рис. 6. Иллюстрация эффекта чередования воронок**



**Рис. 7. Воронка, возникшая после чередования воронок и мгновенно достигшая дна**

в трубопровод, но истечение не прекращалось. Поверхность жидкости над заборным отверстием деформировалась, т.е. появлялись малые локальные провалы, переходящие в небольшие воронки. Когда поверхность жидкости подходила к донной части бака (30...40 мм), возникала более мощная воронка, что приводило к прорыву больших воздушных пузырей в сливной тракт, и истечение прекращалось.

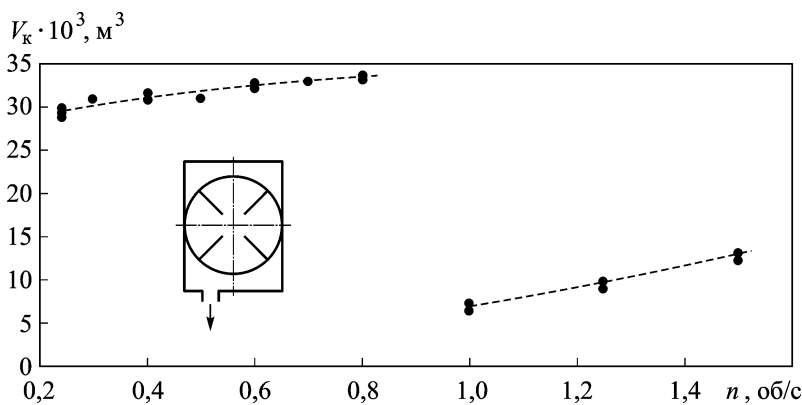
Для физической картины этого динамического режима характерно следующее: при некоторой угловой скорости вращения массы жидкости, отличной от угловой скорости сосуда, жидкость отставала от бака, что приводило к смещению образовавшейся воронки относительно заборного отверстия и к ее разрушению.

С увеличением числа оборотов до  $n = 1 \dots 1,5$  об/с качественная картина процесса не изменялась и наблюдались локальные провалы с чередующимися воронками. Особенность состоит в том, что в некоторый момент времени появлялась воронка размером около половины всей глубины с большим углом раствора, затем она убывала, смещалась к центру и переходила в локальный прорыв. Поверхность деформировалась по мере истечения жидкости и превращалась из параболоида вращения с локальными провалами в более сложную фигуру.

Исходя из рассмотренной физической картины, можно заключить, что большие значения гидравлических остатков жидкости при малых угловых скоростях вращения сосуда связаны с образованием воронок. Взаимодействие воронок с окружающей жидкостью в переменном поле массовых сил носит сложный характер, и при прохождении угловой скорости вращения сосуда через некоторое пороговое (критическое) значение воронка становится неустойчивой и исчезает. В рассматриваемом случае критическое значение числа оборотов  $n^* = 0,4$  об/с. При  $n \geq 0,5$  об/с воронки не достигали сливного отверстия, а дальнейшее увеличение гидравлических остатков с ростом угловой скорости вращения сосуда также можно объяснить искажением геометрии поверхности параболоида вращения в момент его приближения к сливному отверстию. При изменении числа оборотов сосуда  $n$  от 0,5 до 1,5 об/с гидравлические остатки возросли в 3 раза.

В режиме установившегося вращения сосуда проводились исследования влияния радиальных перегородок на гидравлические остатки (см. рис 8). Радиальные перегородки размером  $100 \times 670 \times 4$  мм были закреплены в баке с зазором 2 мм относительно боковой стенки.

По мере стока жидкость равномерно опускалась во всех секторах. Это можно объяснить тем, что между стенкой бака и перегородками имелись зазоры, через которые перетекала жидкость. Наличие перегородок в сосуде не изменяло качественного характера зависимости гид-



**Рис. 8.** Зависимость  $V_k(n)$  при сливе через донное нецентральное отверстие из емкости с перегородками



равлических остатков жидкости от числа оборотов. Но вместе с тем следует отметить, что наличие перегородок в случае забора жидкости через нецентральное донное отверстие приводило к смещению критического числа оборотов в сторону большего значения. Так, из рис. 8 следует, что  $n^* = 0,9$  об/с. Это объясняется, видимо, тем, что перегородки затрудняют снос образующихся воронок.

**Исследование переходных процессов в жидкости** проводилось на двух режимах — мгновенной остановки вращения сосуда и раскрутки. В первом случае двигатель раскручивал бак с жидкостью до заданного значения числа оборотов  $n_0$ . Вращение бака продолжалось до тех пор, пока угловая скорость жидкости не становилась равной скорости вращения бака. Равенство скоростей определялось визуально с помощью мелкой ( $\sim 1$  мм) крошки пенопласта. Затем электродвигатель выключался, бак резко тормозился и останавливался, а жидкость по инерции продолжала вращаться. Одновременно с остановкой бака открывался кран трубопровода, через который происходил сток жидкости. При стоке через нецентральное донное отверстие и при отсутствии биений оси вращения в начальный момент времени поверхность жидкости имела форму параболоида вращения при числе оборотов  $n_0$ . По мере стока жидкости и ее торможения поверхность принимала форму искаженного усеченного конуса. Воздух попадал в отверстие в тот момент, когда поверхность жидкости достигала донной части бака при относительно малой скорости жидкости.

В процессе забора жидкости через боковое отверстие воронки не образовывались. Угловая скорость жидкости убывала до значения, при котором ее поверхность становилась практически плоской. Как только уровень жидкости приближался к верхней кромке бокового отверстия, происходил прорыв воздуха. Результаты экспериментальных исследований при стоке через нецентральное донное отверстие приведены на рис. 9. Видно, что при заданном уровне заполнения сосуда гидравлические остатки жидкости практически не зависят от начального значения числа оборотов сосуда.

В режиме раскрутки (при определенном положении бегунка реостата) одновременно включали электродвигатель и открывали кран сливной магистрали; эксперимент повторяли при нескольких положениях бегунка реостата. В процессе эксперимента фиксировалось текущее время и период вращения.

При стоке жидкости через нецентральное донное отверстие (см. рис. 10) по мере закрутки сосуда первоначальная плоская поверхность жидкости переходила в параболоид вращения, а затем приобретала форму, близкую к усеченному конусу. Воронка, через которую прорывался воздух, появлялась лишь когда поверхность жидкости почти достигала днища бака.

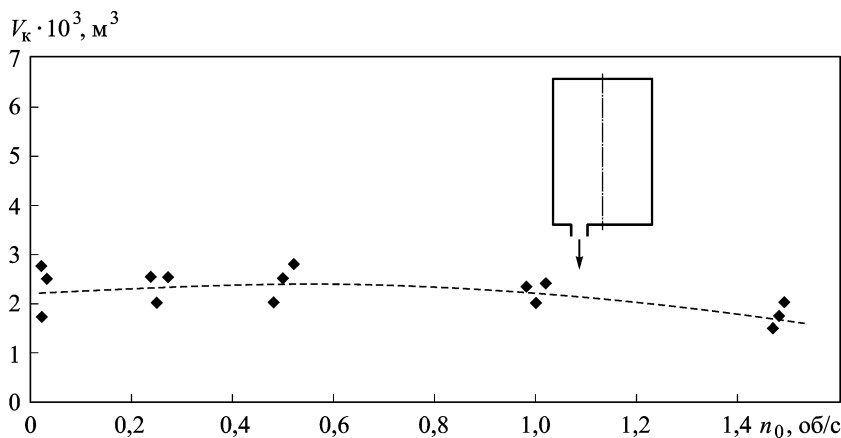


Рис. 9. Зависимость  $V_k(n_0)$  при сливе через донное нецентральное отверстие и внезапном останове вращения

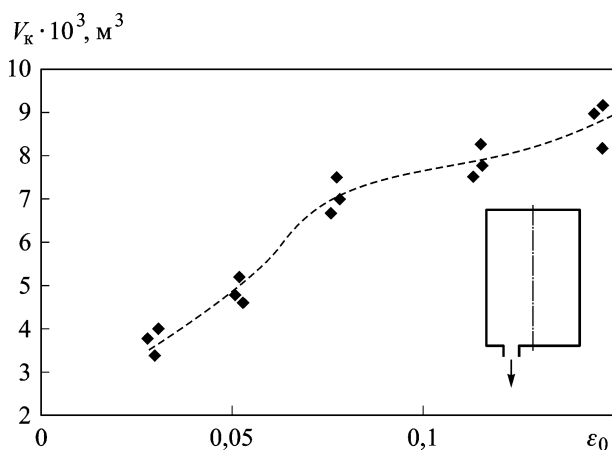


Рис. 10. Зависимость  $V_k(\epsilon)$  при сливе через донное нецентральное отверстие

При больших значениях углового ускорения на поверхности жидкости вблизи заборного отверстия появлялись локальные небольшие провалы. В момент, когда поверхность жидкости приближалась к днищу, воздушные пузыри прорывались через провалы.

**Выводы.** 1. Экспериментальные исследования, проведенные при вертикальном положении цилиндрического вращающегося сосуда с жидкостью, показали, что меньшие значения гидравлических остатков жидкости имеют место для торовой конструкции заборного устройства. Во всем исследованном диапазоне изменения угловой скорости вращения сосуда при использовании торового заборного устройства образование воронок не отмечено.

2. Для установившегося режима вращения жидкости выявлена зависимость гидравлических остатков от угловой скорости вращения. При стоке жидкости из вращающегося сосуда в установившемся режиме через нецентральное донное отверстие обнаружено критическое

значение угловой скорости  $n^*$ , характеризующееся тем, что при  $n < n^*$  в жидкости возникают воронки, а при  $n > n^*$  воронки сносятся к периферии сосуда и разрушаются, не достигая сливного отверстия. Наличие перегородок в сосуде приводит к увеличению критического значения  $n^*$ .

3. При переменных значениях угловой скорости вращения емкости (раскрутка и мгновенное торможение) в исследованном диапазоне изменения начального уровня жидкости и углового ускорения сосуда воронкообразование практически отсутствовало. Гидравлические остатки жидкости в этих случаях могут быть приближенно определены из геометрии свободной поверхности в момент ее пересечения со сливным отверстием.

Анализ полученных результатов позволяет дать практические рекомендации по конструкции и местоположению заборного устройства во вращающейся емкости.

1. Тороидальные заборные устройства с распределенным забором жидкости позволяют уменьшить гидравлические остатки жидкости по сравнению с сосредоточенным забором вследствие уменьшения провала жидкости при приближении поверхности параболоида вращения к сливным отверстиям.

2. Для обеспечения равномерного забора жидкости приемные отверстия тороидального заборного устройства должны быть распределены специальным образом и расположены вблизи днища бака.

Авторы благодарят инженеров Г.Д. Кошкина и Н.Г. Заречина за большую помощь в создании экспериментальной установки и проведении экспериментов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. П а в е л ь е в А. А., Ш т а р е в А. А. Влияние симметрии положения сливного отверстия на формирование нестационарных вихревых воронок // Изв. РАН. МЖГ. – 2005. – № 5. – С. 182–183.
2. К а р л и к о в В. П., Р о з и н А. В., Т о л о к о н н и к о в С. Л. Численный анализ процесса воронкообразования при нестационарном истечении жидкости из вращающегося цилиндрического сосуда // Изв. РАН. МЖГ. – 2007. – № 5. – С. 98–105.
3. П о л и к о в с к и й В. И., П е р е л ь м а н Р. Г. Воронкообразование в жидкости с открытой поверхностью. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 190 с.
4. Т е ч е н и я со свободными поверхностями / Г.В. Логвинович, В.Н. Буйвол и др. – Киев.: Наук. думка, 1985. – 295 с.
5. Г р и н с п е н Х. Теория вращающихся жидкостей. – Л.: Гидрометеоздат, 1975. – 303 с.

Статья поступила в редакцию 6.04.2011

В.В. Орлов родился в 1967 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1990 г. Ведущий специалист по программному обеспечению. Автор пяти научных работ в области гидродинамики.

V.V. Orlov (b. 1967) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1990. Leading expert in software. Author of 5 publications in the field of hydrodynamics.

Александр Николаевич Темнов родился в 1945 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1971 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Космические аппараты и ракеты-носители” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 20 научных работ в области механики жидкости и газа и ракетно-космической техники.

A.N. Temnov (b. 1945) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1971. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Spacecrafts and Launch Vehicles” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 20 publications in the field of mechanics of liquid and gas and rocket and space technology.

Геннадий Николаевич Товарных родился в 1946 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1970 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Космические аппараты и ракеты-носители” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 20 научных работ в области механики жидкости и газа и ракетно-космической техники.

G.N. Tovarnykh (b. 1946) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1970. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Spacecrafts and Launch Vehicles” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 20 publications in the field of mechanics of liquid and gas and rocket and space technology.

---

### **Вниманию авторов и читателей журнала “Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана”**

Начиная с 2009 г. полнотекстовые электронные версии журнала “Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана” размещаются в сети Интернет на сайте Российской электронной библиотеки <http://elibrary.ru>.

С содержанием и рефератами статей текущих выпусков журнала можно ознакомиться на сайте издательства МГТУ им. Н.Э. Баумана <http://www.press.bmstu.ru>