

Готовимся к...

теоретическому
туру олимпиад

экспериментальному
туру олимпиад

научной
конференции

турниру
юных физиков



Готовимся к...



теоретическому
туру олимпиад

экспериментальному
туру олимпиад

научной
конференции

турниру
юных физиков

МИНСК
2007

УДК 53
ББК 22.3
Г74

Надается в рамках реализации Государственной программы
«Молодые таланты Беларуси» на 2006–2010 годы,
утвержденной Указом Президента Республики Беларусь
от 10.05.2006 г. № 310

Авторы:

А.В. Глебов,
Л.Р. Маркович
А.А. Мишук,
Т.С. Пролиско,
А.И. Слободянюк.

Г74 Готовимся к...: научно-популярное издание для молодежи. – Минск: НИО, 2007. – 76 с.
ISBN 978-895-465-318-1.

В данный сборник включены статьи, посвященные интеллектуальным соревнованиям школьников по физике – олимпиадам, турнирам юных физиков, конференциям. В статьях подробно рассмотрены задания, предлагавшиеся на этих международных соревнованиях, результаты их выполнения.

Данное издание предназначено для учащихся старших классов, желающих стать победителями престижных международных соревнований, а также их учителям.

УДК 53
ББК 22.3

ISBN 978-895-465-318-1

© Оформление. НМУ «Национальный
институт образования», 2007

Готовимся к ...

Высшим проявлением способностей школьника, мечтающего стать физиком, является выступление на престижных интеллектуальных соревнованиях: физических олимпиадах, турнирах юных физиков, научно-практических конференциях. Эти соревнования давно стали международными.

Так в международной физической олимпиаде ежегодно принимает участие около 90 стран всех континентов. В 2008 году будет проведена уже 39-я международная олимпиада.

Турниры юных физиков моложе – им всего 20 лет. Но за это время география турнира значительно расширилась. Международный турнир, проводимый под эгидой Европейского Физического Общества, ежегодно созывает команды более 30 стран.

Научно-практические конференции учащихся средних школ проводятся во многих странах, в том числе и в Беларуси. Их тематика и направленность различны, но ни одна из них не обходится без секции физики.

Приятно отметить, что белорусские школьники достаточно успешно выступают на этих интеллектуальных соревнованиях. Не секрет, что победы требуют не только прекрасного знания курса физики, уверенного владения математическим аппаратом, устойчивых навыков их применения при решении сложных проблем, но и некоторой специальной подготовки.

Данный сборник призван помочь именно в этой специальной подготовке. В нем приведены красочные примеры работ, взятые непосредственно из недавних соревнований.

Описание приливов послужило темой одной из интереснейших задач теоретического тура международной физической олимпиады. В статье А.А. Мищука «Доступно о приливах» эта проблема рассматривается шире, чем это было необходимо при решении задачи. Однако, физика никогда не ограничивается поиском ответа на один вопрос, так как найденный ответ вызывает множество новых вопросов. Поиск ответов на возникающие вопросы приводит к цепной реакции идей.

Изучение оптических свойств полупроводниковой пленки – необычная для наших школьников проблема, но именно такую практическую работу следовало провести участникам международной физической олимпиады 2007 года.

В статье А.И. Слободянюка «Определение энергии запрещенной зоны тонкой полупроводниковой пленки» практически дословно приведено полное условие этой задачи, результаты измерения и их обработки.

В статье А.В. Глебова и Л.Г. Марковича «Готовимся к турниру юных физиков» рассматривается доклад по задаче «Гидравлический прыжок», который был представлен в финале 18-го Международного турнира юных физиков и получил высшие оценки жюри.

Наконец последняя статья данного сборника «Остановись мгновение...», подготовленная Т.С. Пролиско и А.И. Слободянюком, посвящена подробному анализу доклада, представленного на международной научно-практической конференции. Отметим, что этот доклад был признан лучшим, а его авторы завоевали диплом первой степени.

Готовимся к турниру юных физиков

Среди популярных в нашей стране интеллектуальных состязаний школьников, безусловно, наиболее известны предметные олимпиады, в которых ежегодно принимает участие рекордное количество ребят.

На предметной олимпиаде необходимо быстро и точно решить непростые задачи (как теоретического, так и экспериментального характера), подготовленные профессиональным жюри.

Существенным организационным условием олимпиады является то, что во время выполнения письменной работы школьникам запрещено общаться друг с другом и уж тем более дискутировать о методах решения задачи, поскольку зачет на олимпиаде – индивидуальный.

В этой связи хочется обратить внимание всех, кто любит физику, но не так успешно решает нестандартные задачки за короткое время, на сравнительно новый и перспективный вид состязаний по физике – турниры юных физиков, состоящие из отдельных физбоев.

В текущем учебном году будет проводиться XVI Республиканский турнир юных физиков, который, как ожидается, соберет юных ученых практически со всех областей нашей страны.

Ежегодно в этом турнире принимают участие 15–20 команд из различных учреждений образования Беларуси, среди которых практически постоянно представлены команды из Минска, Барановичей, Гродно, Гомеля, Дзержинска, Витебска, Логойска, Слуцка.

Основным отличием турнира юных физиков от олимпиады является устная форма защиты выполненных за-

даний, напоминающая защиту диссертации. После доклада по задаче (до 10 мин) команда-оппонент задает вопросы и в форме публичной полемики (до 10 мин) критически оценивает представленное решение, отмечая его сильные и слабые стороны. За происходящей научной дискуссией между докладчиком и оппонентом внимательно следит команда-рецензент, которая, вступая в игру позже, также задает вопросы докладчику и оппоненту, подводит итог возникшей полемики по решению задачи (до 10 мин).

Только после выступлений всех трех команд вопросы задают члены жюри, которые обязаны оценить работу каждой команды. В следующем действии команды-участницы меняются ролями, пока каждая из них не побывает в каждой роли. Победитель физбоя определяется по сумме баллов, набранной по итогам всех действий.

Следует заметить, что задачи, предлагаемые на республиканский турнир, известны заранее и рассылаются всем желающим за несколько месяцев до начала состязания. Это позволяет заранее спокойно и сосредоточенно вести работу под руководством взрослых, спланировав основные этапы решения задачи.

Во время доклада на физбое приветствуется использование современных мультимедийных возможностей для презентации (видео, фото и иных материалов), помогающих докладчику раскрыть суть решения. Как правило, многие задачи турнира исследуют явления, которые можно продемонстрировать непосредственно в аудитории, что позволяет значительно увеличить зре-

личность этих состязаний.

Интересно также, что эти задания являются одновременно и заданиями для проведения Международного турнира юных физиков, ежегодно собирающего школьников более чем из 30 стран мира для выявления лучшей команды юных физиков на планете. Это значит, что все юные физики решают одинако-

вые задачи, и крайне интересно: будет ли белорусское решение отличаться, скажем, от китайского?

Наши ребята отлично зарекомендовали себя за время выступления в Международных турнирах юных физиков (International Young Physicists Tournament), где показали следующие результаты:

Турнир, команда	Дата проведения	Результат
V Международный Турнир Юных Физиков (г. Протвино, Россия) (Лицей БГУ)	Июнь 1992 г.	Диплом I степени
VI Международный Турнир Юных Физиков (г. Протвино, Россия) (Лицей БГУ)	Май 1993 г.	Похвальный отзыв
VII Международный Турнир Юных Физиков (г. Гронинген, Голландия) (Лицей БГУ)	Май 1994 г.	Диплом III степени
VIII Международный Турнир Юных Физиков (г. Спала, Польша) (Лицей БГУ)	Май 1995 г.	Диплом III степени
IX Международный Турнир Юных Физиков (г. Кутаиси, Грузия) (Лицей БГУ, Гомельский лицей)	Май 1996 г.	Похвальный отзыв
X Международный Турнир Юных Физиков (г. Хеб, Чехия) (Лицей БГУ)	Май 1997 г.	Диплом II степени
XI Международный Турнир Юных Физиков (г. Дунаештинген, Германия) (Лицей БГУ)	Май 1998 г.	Диплом III степени
XII Международный Турнир Юных Физиков (г. Вена, Австрия) (Лицей БГУ)	24 — 29 мая 1999 г.	Диплом III степени
XIII Международный Турнир Юных Физиков (г. Будапешт, Венгрия) (Лицей БГУ, СШ № 51)	8 — 15 июля 2000 г.	Диплом III степени
XIV Международный Турнир Юных Физиков (г. Эспоо, Финляндия,) (СШ № 51)	22 — 29 мая 2001 г.	Похвальный отзыв
XV Международный Турнир Юных Физиков (г. Одесса, Украина) (СШ № 51, Лицей БГУ)	Май 2002 г.	Диплом II степени
XVI Международный Турнир Юных Физиков (Швеция, г. Уппсала) (Лицей БГУ)	1 — 8 июля 2003 г.	Диплом III степени
XVIII Международный Турнир Юных Физиков (г. Винтертур, Швейцария) (Лицей БГУ, СШ № 51)	14 — 21 июля 2005 г.	Диплом II степени
XIX Международный Турнир Юных Физиков (г. Братислава, Словакия) (СШ № 51)	8 — 15 июля 2006 г.	Диплом III степени

**Статистика выступлений Беларуси в IYPT
за все годы (1992 – 2006 гг.)**

Год	Страна	Золото	Серебро	Бронза	П.О.
1992	Россия	X			
1993	Россия				X
1994	Голландия			X	
1995	Польша			X	
1996	Грузия				X
1997	Чехия		X		
1998	Германия			X	
1999	Австрия			X	
2000	Венгрия			X	
2001	Финляндия				X
2002	Украина		X		
2003	Швеция				X
2005	Швейцария		X		
2006	Словакия			X	
Итого		1	3	6	4

Как видно из таблиц, на счету нашей страны одна золотая, три серебряные и шесть бронзовых медалей, что безусловно говорит о том, что юные физики Беларуси – одни из сильнейших в мире.

Как же ребята добиваются таких грандиозных успехов? Кто они? Как

самому научиться готовить доклад по той или иной теме турнира юных физиков? Что для этого нужно делать?

Давайте для ответа на эти вопросы рассмотрим доклад, подготовленный членом сборной Республики Беларусь Артемом Глебовым (Лицей БГУ, рис. 1) для финала XVIII Международного турнира юных физиков, прошедшего в Швейцарии в июле 2005 г.

Следует заметить, что победив в отборочном туре, сборная Беларуси, представленная учащимися Лицея БГУ (Соколов Евгений, Глебов Артем, Анисченко Александр, Ермольчук Виталий) и СНП № 51 г. Минска (Петров Алексей), вышла в финал вместе с командами Германии и США.

Наши ребята разработали тему «Гидравлический прыжок», принесший команде серебряные медали.

Условие задачи формулируется следующим образом:



Рис. 1.
Глебов Артем

«Гидравлический прыжок» Ровная вертикальная струя воды при попадании на горизонтальную поверхность растекается по ней радиально. При некотором значении радиуса R растекающейся струи наблюдается резкое увеличение высоты H уровня воды на поверхности (рис. 2). Исследуйте природу этого явления. Что произойдет при использовании жидкости с большей чем у воды вязкостью?

Комментарий: при отборе материала в финальную часть доклада приходится решать непростую задачу, поскольку время доклада ограничено 10 минутами, а выполненная работа огромна. В таком случае выбор делается в пользу самого важного, идеи решения и подробного обсуждения результатов, в надежде на то, что в процессе дискуссии с оппонентом, рецензентом и членами жюри удастся раскрыть все опущенные тонкости. Рассматриваемое в данном докладе явление знакомо каждому, кто хоть раз пользовался ванной или умывальником. Возникающие при падении струи водяные скачки красивы и разнообразны.

Начало доклада традиционно посвящается формулированию основных целей исследования.

Добрый день, уважаемые члены жюри, команд-соперниц и зрители. Я, Глебов Артем, имею честь представить вашему вниманию доклад сборной 11-х классов лицея БГУ по задаче «Гидравлический прыжок» (рис. 3).

По условию задачи требуется изучить природу явления. С нашей точки зрения, это значит:

- определить причину и условия образования прыжка;

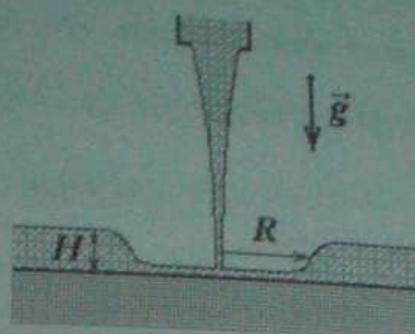


Рис. 2



Рис. 3.
Гидравлический прыжок

- качественно описать его структуру,
- создать математическую модель явления
- предсказать с ее помощью параметры прыжка.

В нашем исследовании мы придерживались экспериментального подхода, поэтому в докладе нашли отражения только те явления, которые нам удалось непосредственно наблюдать на опыте.

Для исследований мы собрали экспериментальную установку (рис. 4), ключевыми элементами которой являлись насадка с круглым выходным отверстием, создающая цилиндрическую струю, и горизонтальная стеклянная пластина, размерами 40×50 см, на которую эта струя падает.

Насадка с помощью планта подключалась напрямую к водопроводному крану, который позволял регулировать расход жидкости в довольно широких пределах.

В первую очередь мы выяснили, при каких условиях возможно образование гидравлического прыжка.

Как оказалось, решающим фактором в этом случае является высота внешнего по отношению к прыжку слоя воды h_{ext} . При этом интервал, в пределах которого может существовать

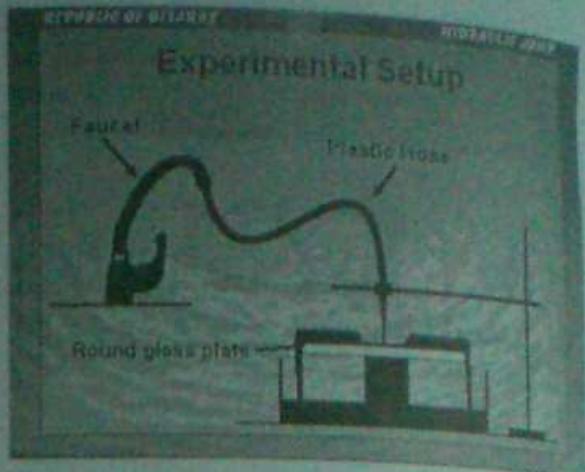


Рис. 4.

Экспериментальная установка прыжок, ограничен как сверху, так и снизу (рис. 5).

При уменьшении высоты слоя воды до нуля, радиус увеличивается и стремится к бесконечности, т. е. фактически прыжок не образуется.

Наоборот, при увеличении высоты слоя воды прыжок уменьшается в размерах, что можно видеть на представленном видеоролике.

Комментарий: к сожалению, формат печатного издания не позволяет привести указанный видеоролик, однако этот несложный опыт вполне можно провести у себя дома на кухне: по мере повышения уровня воды на горизонтальной плоскости гидравлический прыжок исчезнет.

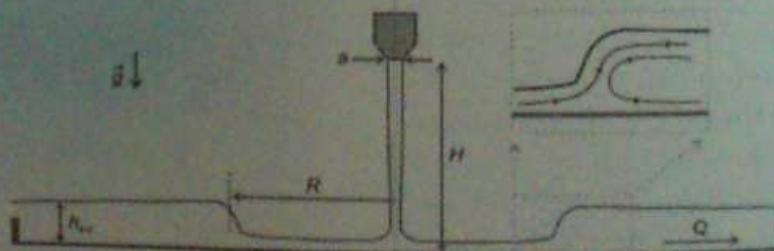


Рис. 5.

Параметры гидравлического прыжка:

a — диаметр струи на выходе из насадки, H — расстояние между насадкой и плоскостью, R — приближенный радиус прыжка, Q — расход воды через цилиндрическую коаксиальную поверхность, h_{ext} — высота слоя жидкости на значительном удалении от области прыжка. На рисунке выделена структура потока жидкости непосредственно в области прыжка

Заметим, что при достижении некоторого предельного значения высоты прыжок смыкается. Используя кадровый просмотр данного видеоролика, мы смогли построить график зависимости радиуса прыжка от высоты внешнего слоя воды.

Кроме того, мы исследовали зависимость предельного значения высоты слоя воды от объемного расхода жидкости в струе, что позволило построить диаграмму существования прыжка (рис. 6), где по оси абсцисс откладывался объемный расход, а по оси ординат – соответствующее предельное значение высоты слоя воды.

Определенная комбинация расхода и высоты слоя воды приводит к образованию прыжка в том случае, если соответствующая ей точка лежит внутри заштрихованной области.

Какими же причинами обусловлено возникновение гидравлического прыжка?

Для ответа на этот вопрос необходимо понять, как движется жидкость вблизи прыжковой области. С этой целью мы добавляли в воду «марганцовку» и по поведению окрашенной жидкости судили о направлении и величине скорости в различных точках течения.

С удивлением, мы обнаружили, что, кроме очевидного радиального растекания жидкости от струи, существует и обратное ее движение. Опытное подтверждение этого факта вы можете видеть на представленном видеоролике.

Комментарий: к сожалению, формат печатного издания не позволяет привести ролик, подтверждающий факт, изображенный на вставке рисунка 5: подкрашенная «марганцовкой» вода втягивается из внешних областей к зоне прыжка в пределах некоторого тонкого придонного слоя.

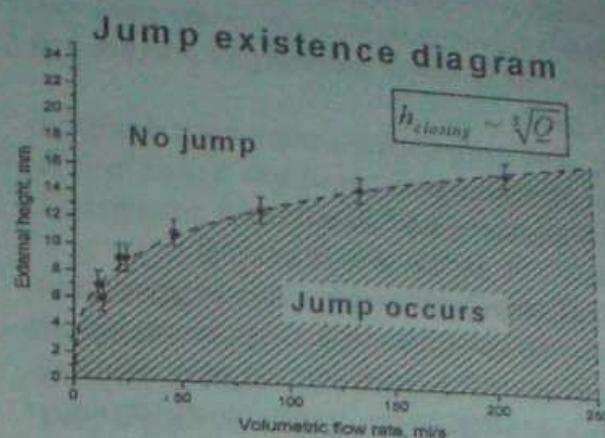


Рис. 6.
Диаграмма существования гидравлического прыжка

Настоятельно рекомендуем проделать опыт с помощью шприца самостоятельно.

В гидродинамике возникновение обратного тока связывается с разделением пограничного слоя и его отрывом. Поэтому мы предположили, что именно пограничные явления будут определяющими в образовании прыжка.

На наш взгляд, механизм его образования следующий. При радиальном растекании по поверхности толщина слоя жидкости убывает по мере удаления от струи. В какой-то момент она достигает критического значения, по порядку величины равного толщине пограничного слоя.

При этом резко увеличившееся влияние вязкости приводит к значительному уменьшению скорости потока. Из условия неразрывности потока высота слоя жидкости при этом резко возрастает, и, как следствие, пограничный слой разделяется, образуя обратное течение.

Объяснив причину образования прыжка, мы изучили зависимость основного его параметра – радиуса – от

свойств жидкости и параметров струи. Было проведено исследование явления при различных диаметрах падающей водной струи.

Диаметр струи изменялся благодаря применению насадок с различными диаметрами выходных отверстий: от 2 мм до 10 мм (рис. 7).

Прямой зависимости между радиусом прыжка и диаметром струи не наблюдалось, зато четко прослеживалась зависимость радиуса прыжка от расхода жидкости (рис. 8).



Рис. 7.
Набор насадок для изменения диаметра струи

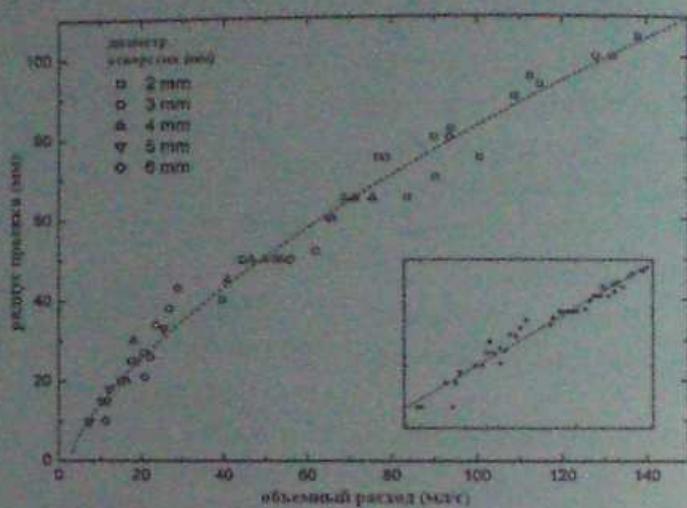


Рис. 8.
Экспериментальные зависимости $R(Q)$ радиусов прыжка для различных насадок в линейном и двойном логарифмическом масштабах

На графике видно, что зависимость эта одинакова для всех насадок. Для построения данного графика было проведено порядка 600 измерений – по 10 для каждой точки.

Ввиду сложности математического описания взаимодействий, рассматриваемых в данном явлении, для создания его математической модели нам пришлось выйти за рамки школьного курса математики и перейти на язык дифференциальных уравнений.

Запишем общее уравнение гидродинамики – уравнение Навье–Стокса,

выражающее второй закон Ньютона применительно к элементарному объему жидкости.

Будем считать жидкость несжимаемой и рассматривать только стационарный режим течения.

Исходя из очевидной осевой симметрии, изберем для нашего описания цилиндрическую систему координат (рис. 9), а начало отсчета совместим с точкой падения струи на плоскость.

В проекциях на оси данной системы координат упрощенное уравнение Навье–Стокса запишется в следующем виде:

$$u \frac{\partial u}{\partial r} + w \frac{\partial u}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial r} + w \frac{\partial w}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + v \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right). \quad (2)$$

Полученные уравнения дополним условием постоянства потока в любом сечении (это следствие уравнения неразрывности):

$$r \int_0^{h(z)} u(r, z) dz = \frac{Q}{2\pi} = q. \quad (3)$$

Поскольку полученная система не имеет аналитического решения, нам пришлось пойти на некоторые упрощения.

Для начала мы применили метод гидродинамического подобия, условно говоря, новую систему единиц, где в качестве масштабов выбрали размерные величины r_* , z_* , u_* и w_* .

Исходя из правила размерностей, записываем систему уравнений, однозначно определяющую значения введенных нами характерных масштабов. Уравнение данной системы получены из соответствующих уравнений исходной.

В результате подобного выбора получили новые безразмерные переменные \tilde{r} , \tilde{z} , \tilde{u} , \tilde{w} , которые могут быть выражены следующим образом $r = r_* \tilde{r}$, $z = z_* \tilde{z}$, $u = u_* \tilde{u}$, $w = w_* \tilde{w}$.

Подставив новые переменные в уравнения (1)-(3), получили следующую систему:

$$\frac{u_*^2}{r_*} = \frac{u_* w_*}{z_*} = \frac{p_*}{\rho r_*} = \frac{v u_*}{z_*^2},$$

$$\frac{p_*}{\rho z_*} = g, \quad u_* r_* z_* = q$$

из решения которой следует:

$$r_* = q^{\frac{2}{5}} v^{\frac{2}{5}} g^{\frac{1}{5}}, \quad z_* = q^{\frac{1}{4}} v^{\frac{1}{4}} g^{\frac{1}{4}},$$

$$u_* = q^{\frac{1}{5}} v^{\frac{1}{5}} g^{\frac{1}{5}}, \quad w_* = q^{\frac{1}{5}} v^{\frac{1}{5}} g^{\frac{1}{5}}.$$

Соответственно, радиус прыжка можно выразить через характерный масштаб r_* и некоторую константу k , значение которой можно определить экспериментально.

Таким образом, наша теория предсказывает степенной вид зависимости радиуса от объемного расхода с показателем степени 5/8:

$$r = kr_* = kq^{\frac{2}{5}} v^{\frac{2}{5}} g^{\frac{1}{5}}.$$

Прервемся на время и проанализируем полученные ранее экспериментальные зависимости. По методу наименьших квадратов определим коэффициент степени в зависимости: он оказывается равным 0.73. Это значение достаточно близко к полученному теоретически и качественно с ним

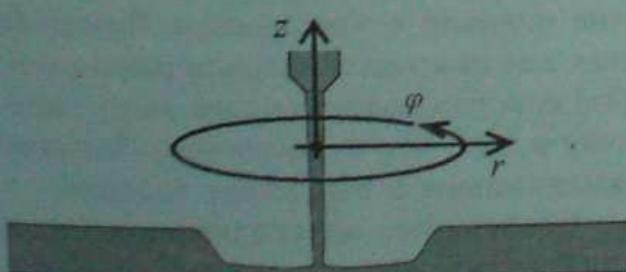


Рис. 9
Цилиндрическая система координат

согласуется. Основными же причинами их численного несовпадения, на наш взгляд, являются:

- 1) неучтенные явления поверхностного натяжения,
- 2) поверхностные волны в системе,
- 3) нестабильность прыжка, который лишь с долей допущения может быть назван стационарным, например, из-за изменения расхода жидкости.

Погрешности наших измерений изменялись от точки к точке, но в среднем составили 4% для расхода и 7% для радиуса прыжка.

С учетом полученных зависимостей радиуса прыжка от расхода жидкости в струе и высоты внешнего слоя жидкости мы построили качественный график (рис. 10), который назвали «поверхностью существования прыжка», так как для любого прыжка с фиксированными параметрами q и h точка, соответствующая комбинации этих параметров и радиуса, должна лежать на данной поверхности. Общий вид эмпирической формулы вы можете также видеть на рисунке 6.

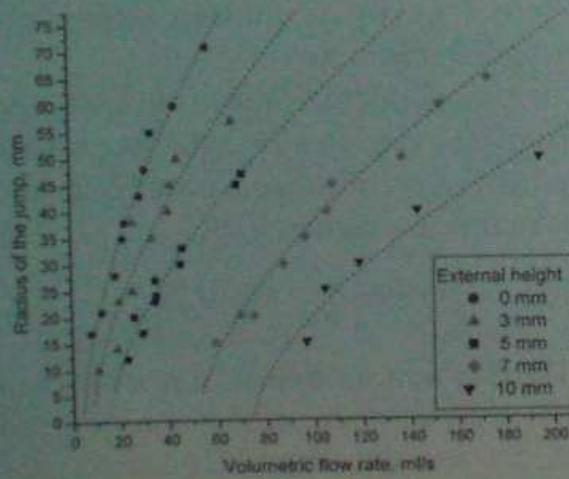


Рис. 10.
Зависимость радиуса прыжка от расхода жидкости в струе

Получив экспериментальное подтверждение теории, мы решили описать с помощью нашей модели течение внутри слоя жидкости и получить уравнение для профиля потока.

Для этого вернемся к рассматриваемой системе уравнений и перепишем ее в безразмерном виде с учетом введенных характерных масштабов:

$$u \frac{\partial u}{\partial r} + w \frac{\partial w}{\partial z} = - \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2},$$

$$0 = - \frac{\partial p}{\partial z} - 1,$$

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0.$$

Границные условия в данном случае следующие: отсутствие скольжения на дне пластины ($u = w = 0$), нормировка давления на поверхности

($p = 0$ и $\frac{\partial u}{\partial z} = 0$), кинематическая связь между радиальными и вертикальными компонентами скорости на поверх-

ности ($u \frac{\partial h}{\partial r} = w$) и неразрывность

$$(r \int_0^{h(r)} u(r, z) dz = 1).$$

Обратите внимание: первое уравнение совпало с уравнением Прандтля для ламинарного пограничного слоя. Это еще раз подтверждает нашу гипотезу о том, что пограничные явления доминируют в структуре течения.

Необходимо определиться также с профилем скорости жидкости в вертикальном сечении.

Из граничных условий следует, что скорость потока на дне обращается в нуль, а на поверхности равна нулю ее производная по z . В добавок, нами экс-

экспериментально доказано существование обратного тока жидкости вблизи дна.

Описанными свойствами обладают полиномы третьей степени и выше. Поэтому распределение скорости в сечении будем аппроксимировать в виде кубического полинома $f(\eta) = a\eta + b\eta^2 + c\eta^3$, где $\eta = z/h(r)$ – безразмерная высота.

Из указанных граничных условий мы не можем определить связь между всеми тремя коэффициентами. Поэтому введем параметр λ , зависящий от координаты r , произвольным образом связав его с одним из коэффициентов, например, положив $a = \lambda + 3$.

В совокупности с граничными условиями для слоя жидкости мы получаем систему уравнений с двумя неизвестными h и λ :

$$\begin{cases} \frac{dG}{d\lambda} \cdot \frac{d\lambda}{dr} = \frac{4r\lambda}{h} + G \frac{h^4 - (5\lambda + 3)}{rh^4} \\ \frac{dh}{dr} = -\frac{5\lambda + 3}{rh^3} \end{cases} \quad (4)$$

Так как имеются две зависящие от r величины – h и λ , то для их определения необходимо иметь систему из

двух независимых уравнений. Одно из них получим, проинтегрировав первое уравнение нашей безразмерной системы по z от 0 до h , а второе записав это же уравнение для $z = 0$.

Образованная система может быть решена численными методами, что и было реализовано в пакете Mathematica 5.0. Полученный в результате решения профиль потока вы можете видеть на рисунке 12.

Очередной проверкой построенной теории стало построение трехмерной численной модели гидравлического прыжка, которая, как вы можете убедиться, посмотрев на рисунок 13, соответствует действительности.

Теперь можно подставить в исходный кубический полином полученное решение для λ , и построить профиль скорости воды в области прыжка. Как видно из рисунка 12, он отвечает требованиям, которые мы выдвинули при записи системы уравнений (4).

Обратите внимание на область обратного тока: после прыжка профиль скорости выгибается в отрицательном направлении.

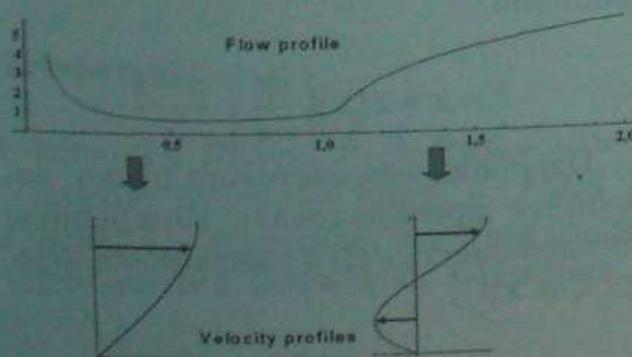


Рис. 12



Рис. 13.
Профиль потока жидкости



Рис. 14

Образование светлых и темных полос на поверхности воды

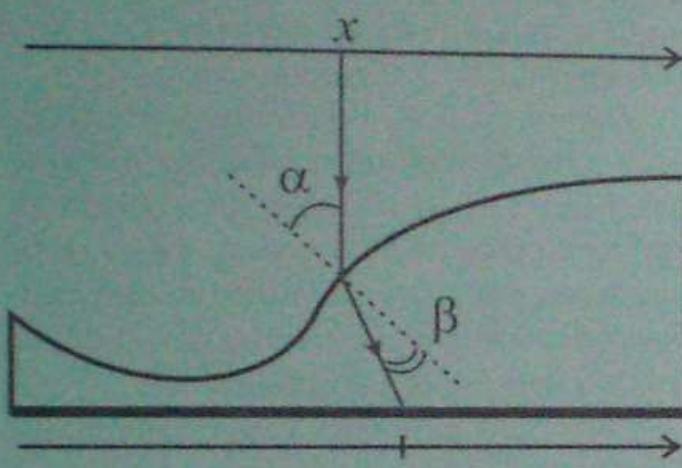


Рис. 15

Преломление на границе раздела воздух–вода

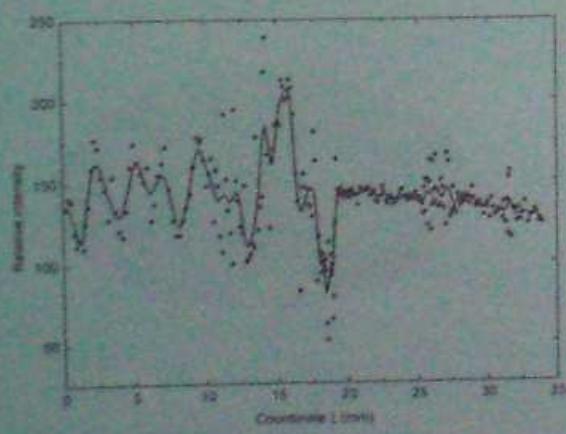


Рис. 16

Экспериментальные данные

Полученный результат качественно согласуется с экспериментом. Более детальное количественное подтверждение полученной теории было затруднено в связи с необходимостью точного измерения скоростей воды в потоке.

Прямое измерение профиля жидкости сопряжено с большой погрешностью измерений. В связи с этим, был предложен оптический метод определения профиля текущей жидкости.

Во время экспериментов мы заметили, что на дне образуются светлые и темные полосы (тени) (рис. 14) из-за преломления света на поверхности воды.

Преломленный пучок вносит определенный вклад в освещенность на дне сосуда, которая, в свою очередь, зависит от профиля жидкости в данной области гидравлического прыжка.

Воспользуемся законом преломления света и свяжем координату ξ с толщиной слоя жидкости $z(x)$ в точке рассмотрения (рис. 15):

$$\xi = x + z(x) \operatorname{tg}(\alpha - \beta). \quad (13)$$

Предположим, что параметры x и ξ рассматриваются для малых углов α и β , тогда в соответствии с законом преломления Снеллиуса получим выражение

$$\xi = x + z(x) \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)_x \frac{n-1}{n}.$$

Однородность светового пучка позволяет преобразовать измеренную интенсивность $J(\xi)$ в зависимость между ξ и x :

$$x(\xi) = \int_0^\xi \frac{J(\xi)}{J_0} d\xi. \quad (15)$$

Мы измерили освещенности на фотографиях гидравлического прыжка,

предположив, что интенсивность света пропорциональна яркости фотографии.

Используя полученные данные (рис. 16), мы смогли восстановить профиль жидкости в области гидравлического прыжка (рис. 17).

Как видно на рисунке 17, данные неплохо согласуются между собой – в пределах погрешности они совпадают друг с другом.

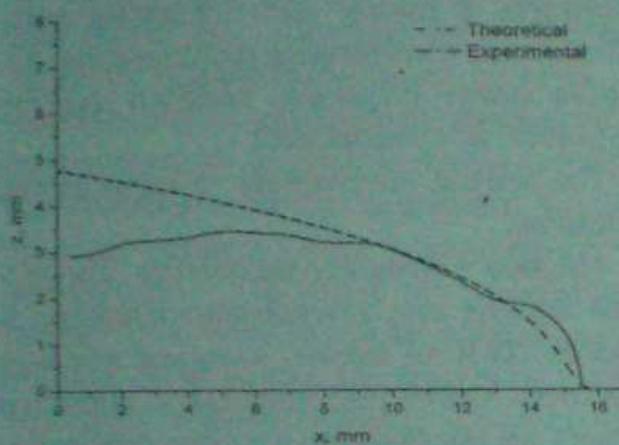


Рис. 17.

Сравнение теоретического и экспериментального профилей прыжка

Таким образом, в процессе решения задачи нами было установлено, что гидравлический прыжок – физическое явление, связанное с разделением пограничного слоя и образованием обратного тока жидкости.

Было исследовано влияние вязкости, разработана математическая модель, описывающая поведение жидкости и адекватно прогнозирующая качественные зависимости, наблюдаемые в опыте.

Также были проанализированы условия возникновения прыжка и установлена взаимосвязь между его основными параметрами. Однако мы не собираемся останавливаться на достигнутом и надеемся на продуктивное обсуждение нашей работы, которое может стать стимулом к новым исследованиям.

Спасибо за внимание.



Какие будут вопросы?

Литература:

1. Bohr, T., Dimon, P. & Putkaradze, V. 1993 Shallow-water approach to the circular hydraulic jump. *J. Fluid Mech.* **254**, 635–648.
2. Bohr, T., Watanabe, S., Putkaradze, V. 2003 Integral methods for shallow free-surface flows with separation. *J. Fluid Mech.* **480**, 233–265.

СОДЕРЖАНИЕ

Готовимся к ...	3
Доступно о приливах	4
Напряженность и потенциал гравитационного поля	5
Простейшая модель	8
Модель, учитывающая вращение Земли	11
Элементы динамической теории приливов	17
Замедление осевого вращения Земли и предел Роша	18
Определение энергии запрещенной зоны тонкой полупроводниковой пленки	22
I. Введение	22
II. Экспериментальное оборудование	23
III. Теоретическое описание методов измерения	24
IV. Задания	25
Первый этап	25
Второй этап	25
Четвертый этап	27
Описание оборудования	28
Решение заданий экспериментального тура	31
Выполнение работы и результаты	34
Заключительные замечания по заданию экспериментального тура	40
Приложение – общие критерии оценивания	45
Готовимся к турниру юных физиков	46
Остановись мгновенье	58
Часть 1. Стробоскопическое освещение	60
Часть 2. Телевизор-стробоскоп	62
2.1. Общие подходы к описанию наблюдаемых эффектов	62
2.2. Равномерное вращение стержня, ось вращения – над экраном	66
2.2. Колебания вертикально расположенной струны	69
2.3. Колебания горизонтально расположенной струны	72

*Научно-популярное издание
для молодежи*

ГОТОВИМСЯ К...

Ответственный за выпуск А.И. Слабодянюк
Редактор Н.В. Козловский
Технический редактор Л.А. Залужная

Подписано в печать 27.12.2007. Формат 60x84/8. Бумага офсетная. Гарнитура Школьная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 8,84. Уч.-изд. л. 8,39. Тираж 4500 экз. Заказ 11195.

Научно-методическое учреждение «Национальный институт образования» Министерства образования
Республики Беларусь.
ЛИ № 02330/0133300 от 30.04.2004. 220004, Минск, Короля, 16.

Отпечатано в типографии МОУП «Борисовская укрупненная типография им. 1 Мая».
ЛП № 02330/0056737 от 30.04.2004.
222120, Борисов, Строителей, 33.