

Автор:

Тюшнякова Наталья Сергеевна, ученица 9 класса

Руководитель: Лаврентьева С.В., учитель физики

Муниципальное казённое общеобразовательное учреждение Новосибирского района Новосибирской области – Плотниковская средняя общеобразовательная школа № 111

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ ПРИ ВЫТЕКАНИИ ЖИДКОСТИ ИЗ СОСУДА (ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЙСТВИЯ МОДЕЛИ ПОМПАЖНЫХ ЯВЛЕНИЙ)**

В настоящее время во многих областях техники требуется прогонять жидкости или газы с помощью компрессоров. Компрессоры – это агрегаты, нагнетающие сжатый воздух или создающие повышенное давление для передвижения жидкости по трубопроводу. Один из самых опасных сбоев в работе любого компрессора – это явление помпажа.

Внешне помпаж проявляется в виде хлопков, сильной вибрации нагнетателя в компрессоре, отдельных периодических толчков, в результате чего возможны разрушение нагнетателя.

Среды, в которых наблюдается явление помпажа: газ, вытекающий из газотурбинного двигателя самолётов, идущая по нефтепроводу сырая нефть или продукты её перегонки, загрязненный песком природный газ в газопроводе, газ и топливо, перегоняемые в автомобильных двигателях. Помпаж влияет на целостность конструкции двигателей самолётов и автомобилей, на их КПД и на стабильность работы.

**Помпаж – непредсказуемое явление, которое невозможно предугадать, но можно предотвратить. Это объясняет важность и необходимость его подробного изучения.**

Явление помпажа можно наблюдать и в домашних условиях.

Например, при переливании в стакан сока или молока из тетрапака, поток жидкости начинает прерывисто и толчками выливаться из упаковки. Или при выливании воды из бутылки струя жидкости начинает прерываться, а в бутылку

проникают воздушные пузыри, при этом жидкость в бутылке начинает совершать колебания.

Эти колебания являются **автоколебаниями** – это незатухающие колебания, которые возникают за счёт имеющейся способности колебательной системы самой регулировать поступление энергии от постоянного источника. Частоту воздействия внешнего источника колебательная система задаёт сама.

**Проблемный вопрос:** почему, когда жидкость выливается из бутылки, то возникают воздушные пузыри и жидкость вытекает прерывисто, а из медицинской грелки жидкость выливается ровным непрерывным потоком без «бульканья»?



**Цель:** исследовать процесс возникновения помпажа, происходящий при вытекании жидкости из сосуда, и выявить закономерности этого процесса.

**Задачи:**

- изучить теорию явления помпажа;
- экспериментально выяснить зависит ли период колебаний жидкости в сосуде от факторов, влияющих на вытекание жидкости:
  - ✓ диаметра сливного отверстия сосуда;
  - ✓ температуры жидкости;
  - ✓ рода жидкости;
  - ✓ жесткости стенок сосуда.

**Объект исследования** – вытекающая из сосуда жидкость.

**Предмет исследования** – факторы, влияющие на период автоколебаний вытекающей из бутылки жидкости.

**Практическое значение** исследования состоит в том, что полученные результаты, могут быть использованы как дополнительный материал на уроках физики.

Наша работа может быть использована в качестве учебной демонстрации при изучении автоколебательных процессов, на основе проведенных исследований может быть поставлена лабораторная работа физического практикума.

## Методика экспериментов

В работе использованы **методы**:

**теоретические** – сравнительный анализ, причинно-следственный анализ;

**практические** – эксперимент, обработка экспериментальных данных и построение графиков, фото- и видеосъёмка процессов и обработка видео.

В данной работе для изучения явления помпажа была использована несложная модель в виде вертикально закреплённой бутылки. Для проведения экспериментов мы приготовили пластиковые бутылки ёмкостью 1,5л, 1л, 0,7л, 0,5л и 0,33л с одинаковыми горлышками.

Изготовили несколько насадок разных диаметров на горлышки бутылок. При этом воспользовались частью корпуса фломастера, прикрепив его к срезу на пробке от бутылки. Чтобы получить сливное отверстие большего диаметра, пришлось подпиливать пробку от бутылки. В результате мы получили несколько сливных отверстий диаметрами от 7 до 22 мм.

В качестве испытуемых жидкостей использовали водопроводную воду, спирт, молоко, томатный сок и подсолнечное масло. Сравнивали также процесс вытекания горячей, тёплой и холодной воды.

Заполнив полностью бутылку жидкостью и закрыв нужной пробкой, переворачивали её вверх дном, засекали время истечения жидкости. Весь процесс снимали на видео с помощью мобильного телефона. Поскольку процесс образования пузырьков в бутылке происходил очень быстро, что затрудняло подсчёт их количества, то получившиеся видеофайлы пришлось обработать (замедлить) с помощью программы Movavi Video Suite.

При замедленном видео мы подсчитали количество образующихся пузырей при вытекании жидкостей. Затем рассчитывали период возникающих в жидкости автоколебаний по формуле  $T = t / N$ , где  $t$  – время вытекания жидкости из бутылки,  $N$  - количество пузырьков, образующихся в жидкости.

Для исследования зависимости проявления помпажа от жёсткости стенок сосуда использовали плотный бумажный пакет из-под молока и резиновую медицинскую грелку.

## Глава 1. Обзор литературы.

### 1.1. История вопроса. Понятие помпажа.

Одним из первых в нашей стране в начале 1930-х годов обратил внимание на наиболее сложную проблему развития авиации – теорию устойчивости полёта - Всеволод Симонович Ведров. В.С.Ведров - советский учёный в области теории движения летательных аппаратов, автоматического регулирования и динамики летательных аппаратов. Он первым исследовал явление помпажа в реактивных двигателях.



В.С.Ведров (1902-1983)

В 1938 году он опубликовал свою знаменитую книгу "Динамическая устойчивость самолёта", которая послужила фундаментом для развития науки о динамике и автоматизации управления полётом в нашей стране. За исследования явления помпажа в двигателях в 1948 году он был удостоен Премии имени Н.Е. Жуковского.

Помпаж (фр. Pompage – колебания, пульсация) – неустойчивая работа компрессора, вентилятора или насоса, характеризуемая периодически повторяющимися резкими колебаниями напора и расхода перекачиваемой среды. Явление сходно с явлением резонанса при колебаниях механических систем и сопровождается вибрацией машины, усилением шума и нагрева при ее работе.

Помпаж двигателя реактивных самолётов сопровождается резкой потерей тяги, хлопками с выбросом дыма и пламени из турбин, возникновением существенных вибраций на борту воздушного судна. Нередко все это приводит к разрушению двигателя.



Помпаж может быть вызван:

- выводом воздушного судна на запредельные для него углы атаки;

- отрыванием либо частичным разрушением лопастей турбины, например, по причине их устаревания, окончания срока годности;
- попаданием в турбину двигателя постороннего объекта (мусор, пролетающая птица);
- инженерными ошибками при проектировании двигателя либо систем его управления;
- сильными порывами бокового ветра; критическим понижением атмосферного давления (может возникнуть при передвижении самолета в горной местности в жаркую погоду).

## **1.2. Теория явления помпажа.**

Помпажные явления сложны и к настоящему времени изучены недостаточно, однако их необходимо учитывать при эксплуатации и проектировании, тем более что режимы наиболее эффективной работы компрессора часто располагаются вблизи помпажной зоны. Расчет границы помпажной области пока невозможен. Она может быть лишь приблизительно определена только с помощью уже известных характеристик аналогичных машин.

Изучение помпажных явлений сводится к построению математической модели. Первый опыт такого моделирования был получен в 1995 - 1997 годах Сафроновым И.И. и Селезневым В.Е. при участии Горбенко Г.В. и Чучко В.В. [2]

Для решения задачи моделирования помпажных явлений математики используют систему дифференциальных уравнений, основанную на соотношениях газодинамики. Такой подход позволяет оценить характер помпажа, даёт прогноз развития аварийной ситуации. Но, к сожалению, по причине слабоизученности явления, модели помпажа носят качественный характер и на практике используются для проведения оценочных расчётов.

При помпаже резко ухудшается аэродинамика проточной части, компрессор не может создавать требуемый напор, при этом, давление за ним на

некоторое время остаётся высоким. В результате происходит обратный проброс газа. Давление за компрессором уменьшается, он снова развивает напор, но при отсутствии расхода напор резко падает, ситуация повторяется. При помпаже вся конструкция испытывает большие динамические нагрузки, которые могут привести к её разрушению.

Явление помпажа выражается тем резче, чем больше емкость трубопровода.

### 1.3. Противопомпажные устройства.

Конечно, современная наука и техника умеет бороться с помпажем. Это и противопомпажная автоматика, и всевозможные сигнализаторы для экипажа самолета и автоматический перезапуск двигателя с временным отключением.

Чтобы избежать помпажа, турбокомпрессоры снабжаются антипомпажными (обычно автоматическими) устройствами.

Главным способом борьбы с возникновением помпажа в авиации является установка на воздушные суда двигателей с соосными валами. Последние способны вращаться независимо по отношению друг к другу на различных скоростях. Каждый соосный вал отвечает за часть турбины и компрессора.



Помимо прочего, инженеры предусматривают следующее: устанавливают на турбины двигателя регулируемые поворотные лопатки. Это способствует улучшению обдувки лопастей, на которых собственно и образуются срывы при помпаже. Используют клапаны перепуска воздуха, что сбрасывают избыточное давление в компрессоре двигателя. Таким образом, облегчается циркуляция воздуха через компрессор.

На современные авиационные моторы устанавливают противопожарную автоматику. Ее функционирование способствует устранению факторов, которые вызывают помпаж двигателя, без необходимости целенаправленных действий со

стороны экипажа воздушного судна. Благодаря автоматике на доли секунды снижается давление в области турбин, а также прерывается подача топлива. Все это дает возможность избежать дальнейшего возгорания мотора в полете [3].

## **Глава 2. Экспериментальное исследование явления помпажа**

### **2.1 Простейшая модель, в которой может возникать явление помпажа**

Простейшей моделью устройства, на котором можно пронаблюдать явление помпажа, является заполненная жидкостью бутылка. Явление помпажа возникает при вытекании жидкости из бутылки.

Бутылка, из которой вытекает жидкость, является автоколебательной системой. Наша система, подобно другим автоколебательным системам состоит из источника энергии, клапана и самой колебательной системы и обратной связи. Колебательной системой являются стенки бутылок, а обратную связь осуществляют потоки воды и воздуха, с помощью них колебательная система управляет устройством, регулирующим подачу энергии от источника (запас потенциальной энергии тяготения).

Бутылка полностью заполнялась жидкостью, закрывалась пробкой с отверстием известного диаметра и закреплялась вверх дном в лабораторном штативе.

При вытекании жидкости из бутылки, в ней периодически возникали воздушные пузыри. Засекалось время, за которое определенное количество пузырьков воздуха попадет в бутылку. Затем вычислялся период появления пузырьков.

Изменяя условия эксперимента, выявлялась зависимость периода от внешних факторов.



#### **Объяснение образования пузырей**

При вытекании под действием силы тяжести некоторого количества жидкости из бутылки гидростатическое давление начнет уменьшаться, кроме того над поверхностью жидкости образуется пустота с пониженным относительно наружного воздуха давлением. Давление атмосферного воздуха

становится кратковременно больше, чем давление столба жидкости в бутылке. Когда разность давлений внутри и снаружи становится слишком большой, внутрь бутылки проникает пузырь воздуха. При этом поток вытекающей жидкости становится неровным, прерывистым. Когда пузырь воздуха, поднимаясь под действием выталкивающей силы, оказывается над поверхностью жидкости в бутылке, его давление вместе с гидростатическим вновь оказывается больше атмосферного, и жидкость снова начала вытекать из бутылки. Процесс повторяется снова.

## 2.2. Зависимость периода автоколебаний от диаметра отверстий, из которых истекает жидкость

Прочие условия одинаковые: жидкость – вода, объём 1,5 л, температура воды 20<sup>0</sup>С.

Диаметр отверстия	N (количество пузырьков)	Время среднее, t, с	Период, T, с
$d_1 = 7$ мм	Вода не вытекает		
$d_2 = 9$ мм	880	220	0,250
$d_3 = 10$ мм	675	175	0,259
$d_4 = 12$ мм	310	85	0,274
$d_5 = 15$ мм	206	55	0,267
$d_8 = 22$ мм	90	20	0,222



График показывает, что между диаметром сливного отверстия и периодом автоколебаний существует зависимость: сначала при увеличении диаметра увеличивался и период колебаний, но до определённого момента (до диаметра 12 мм). При дальнейшем увеличении диаметра период начал уменьшаться. Это можно объяснить тем, что широкое отверстие оказывает меньше сопротивления вытеканию жидкости, то есть вода вытекает быстрее.

Во время наблюдения было замечено:

- при уменьшении объема жидкости (от  $\frac{1}{2}$  до  $\frac{2}{3}$  объема) процесс появления пузырей сначала замедляется, а когда жидкости становится мало (меньше  $\frac{1}{4}$  объема) – то снова увеличивается;
- чем меньше становится жидкости в бутылке, тем больше объем воздушных пузырей, проникающих в бутылку.

### 2.3. Зависимость периода появления пузырьков от температуры жидкости

Прочие условия одинаковые:  $V = 1,5$  л,  $d_1 = 9$  мм.

Температура воды	N(количество пузырьков)	Время, t, с	Период, T, с
$t_1 = 20^{\circ}\text{C}$	870	224	0,2572
$t_2 = 49^{\circ}\text{C}$	723	190	0,2628
$t_3 = 75^{\circ}\text{C}$	620	166	0,2677



С ростом температуры вытекающей жидкости почти линейно увеличивается и период автоколебаний в системе, то есть воздушные пузырьки реже прорываются в сосуд с водой и их количество уменьшается. Жидкость при этом вытекает свободнее и быстрее, так как с ростом температуры у неё уменьшается вязкость (см. Приложение) и поверхностное натяжение, которые являются «тормозящими» факторами для процесса вытекания жидкости.

### 2.4. Зависимость периода появления пузырьков (периода автоколебаний) от объема сосуда

Прочие условия одинаковые:  $t = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $d = 12$  мм, форма сосудов почти одинаковая - цилиндрическая

Объем жидкости	N (количество пузырьков)	Время, t, с	Период, T, с
$V_1 = 1,5$ л	310	85	0,274
$V_2 = 1,0$ л	214	51	0,238

$V_3 = 0,7$ л	160	38	0,238
$V_4 = 0,5$ л	61	13	0,213

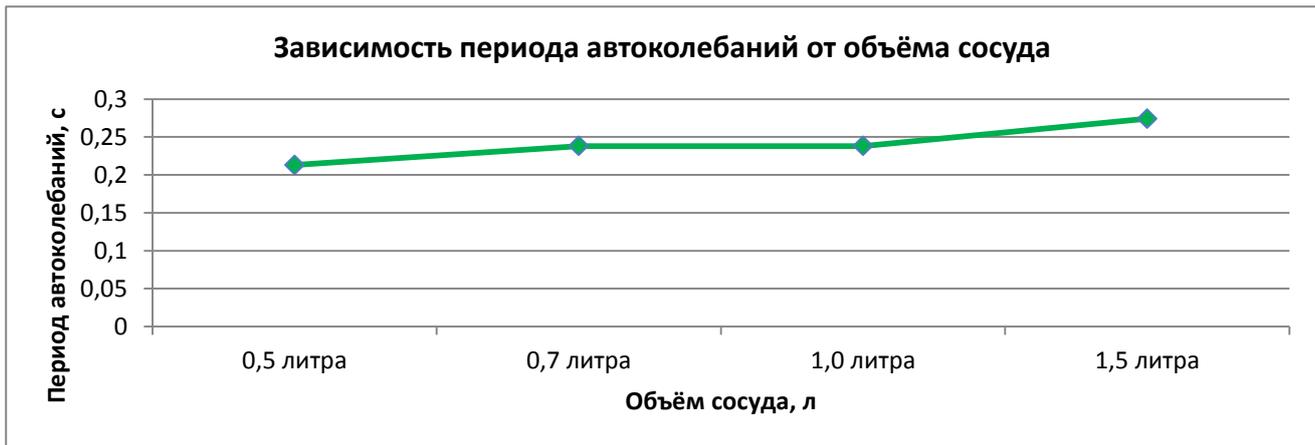


График показывает, что зависимость периода автоколебаний от объёма сосуда существует, но не особо ярко выражена: чем больше объём сосуда, тем больше период колебаний.

### 2.5. Зависимость периода появления пузырьков от рода жидкости

Для эксперимента использовали пластиковую бутылку ёмкостью 0,33л со сливным отверстием диаметром 12 мм и пять жидкостей при комнатной температуре: воду, спирт, молоко коровье 2,5% жирности, томатный сок и подсолнечное масло.

В данном случае период появления воздушных пузырей, по всей видимости, связан с вязкостью жидкостей.



Вытекание из бутылки воды и подсолнечного масла

Жидкость	абсолютная (динамическая) вязкость, мПа*с	N (количество пузырьков)	Время, t, с	Период, T, с
Вода	1,0	86	17	0,198 $\approx$ 0,2
Спирт этиловый (40%),	2,9	77	13	0,169 $\approx$ 0,17
Молоко	3,0	90	21	0,233 $\approx$ 0,2
Сок томатный	5,0	170	35	0,206 $\approx$ 0,2
Подсолнечное масло,	34,0	150	35	0,233 $\approx$ 0,2

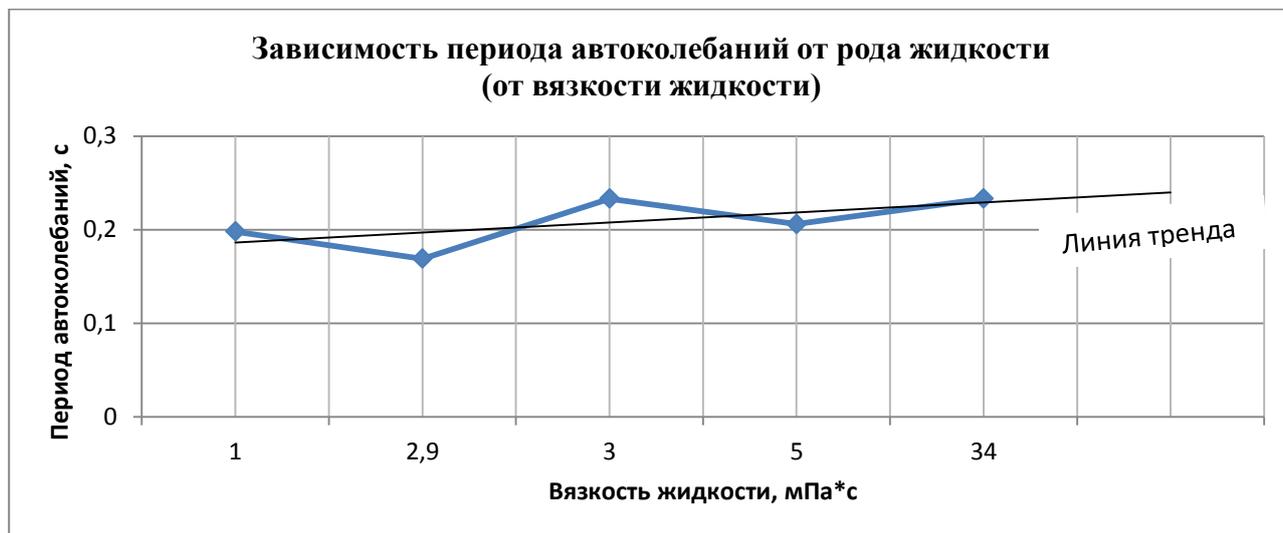
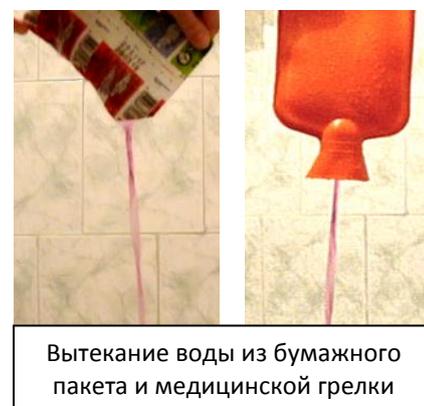


График показывает, что период автоколебаний у разных жидкостей разный. Но различается он у испытуемых жидкостей только на сотые, а то и тысячные доли секунды, и составляет примерно 0,2с для выбранных нами жидкостей. Однако заметна тенденция (линия тренда) к повышению периода автоколебаний с увеличением вязкости жидкости.

## 2.6. Зависимость проявления помпажа от жёсткости стенок сосуда

В качестве сосудов использовали пластиковую бутылку ёмкостью 1 л, бумажный, относительно жёсткий, пакет из-под молока ёмкостью 1 л и медицинскую резиновую грелку также ёмкостью 1 л. Диаметр сливных отверстий в сосудах – одинаковый. В качестве испытуемой жидкости взяли подкрашенную марганцовкой воду.



Воду подкрашивали только для того, чтобы при видеосъёмке струя воды была чётко видна.

Вид сосуда	Объём, л	Результат эксперимента
Пластиковая бутылка	1л	Струя периодически прерывается. Возникают воздушные пузыри.
Плотный, относительно жёсткий, бумажный пакет	1л	Струя вначале ровная, без помпажа. И только в конце эксперимента возникает прерывистость. Стенки пакета немного сжимаются по мере вытекания воды.
Резиновая медицинская грелка	1л	Струя ровная, без прерываний. Стенки грелки сильно и заметно сжимаются по мере вытекания воды.

## Объяснение полученного результата – **ответ на проблемный вопрос** исследования.

Если жидкость вытекает из сосуда с жёсткими стенками (стеклянная или пластиковая бутылка, например), то по мере её вытекания объём находящегося над жидкостью воздуха увеличивается, а давление при этом в сосуде уменьшается. Когда разность давлений снаружи и внутри сосуда становится слишком большой, то наружный воздух прорывается внутрь и возникает помпаж.

Резиновые стенки медицинской грелки имеют особенность менять форму и объём самой грелки, они прогибаются внутрь и тем самым не давая возрасти разнице давлений снаружи и внутри грелки, поэтому струя жидкости вытекает из неё равномерно, без помпажа.

### **Заключение**

В результате работы мы, используя простую модель, изучили явление помпажа.

Проведены эксперименты, в которых мы наблюдали нарушение динамической устойчивости вытекающей из сосуда жидкости. Измеряемой в работе величиной стал период автоколебаний в системе – период появления воздушных пузырей, проникающих в сосуд с жидкостью. Найдены и объяснены зависимости периода возникающих автоколебаний от диаметра сливного отверстия, температуры вытекающей жидкости, объёма и рода жидкости, а также от жёсткости стенок сосуда.

Зная эти зависимости, можно подобрать такие условия работы компрессора в двигателях, при которых момент наступления помпажа будет маловероятным. Для нашей простой модели это должны быть такие условия, при которых период автоколебаний самый большой, чтобы помпаж наступал как можно реже:

- диаметр сливного отверстия примерно 12 мм,
- температура жидкости 20<sup>0</sup>С и ниже,
- объём сосуда почти неважен,

- в более вязкой жидкости нежелательные автоколебания происходили реже (с большим периодом),
- стенки сосуда желательны гибкие, с небольшой жёсткостью.

Помпаж – непредсказуемое явление, которое невозможно предугадать, но можно предотвратить.

Существует целая масса решений для борьбы с такими аварийноопасными явлениями. Это, прежде всего, ручное отключение двигателя и поврежденной турбины экипажем самолета или водителем автомобиля, автоматический перезапуск двигателя специальными системами, предварительное срабатывание всевозможных сигнализаторов, которые сообщают пилотам и водителям об опасности возгорания двигателя. Учитывая сказанное, не стоит опасаться полетов на авиационном транспорте, ведь подобные аварии в настоящее время возникают крайне редко.

### **Источники информации**

1. Перышкин А.В. , Гутник Е.М. «Физика» учебник для 9 класса. М.: Дрофа, 2014.
2. <http://www.ngpedia.ru/id626160p2.html> Большая энциклопедия нефти и газа. Явление помпажа.
3. <http://fb.ru/article/288074/> Что такое помпаж и способы устранения проблемы
4. [https://studopedia.ru/15\\_128469\\_istechenie-zhidkostey.html](https://studopedia.ru/15_128469_istechenie-zhidkostey.html) Истечение жидкостей
5. <http://www.turbinist.ru/31-pompazh-nagnetatelja.html> Помпаж нагнетателя
6. <http://www.turbocom.com.ua/ru/turbo-wiki/pompazh-turbiny> Помпаж турбины
7. <http://www.novedu.ru/sprav/vis-h2o.htm> Кинематическая и динамическая вязкость воды