1)Здравствуйте, уважаемые зрители, члены жюри, команды-соперницы. Меня зовут Лобач Игорь, я представляю команду 29-ой гимназии «Красные» и буду докладывать задачу «Всплывающий пузырь».
2)Для начала вспомним условие задачи: Вертикальная трубка наполнена вязкой жидкостью. На дне трубки находится большой воздушный пузырь. Изучите и опишите подъем пузыря от дна к поверхности вязкой жидкости.
3)Необходимо уяснить, что значит большой пузырь, так как оба, представленные на экране, можно считать соизмеримыми с размерами трубки, необходимо исследовать и тот и другой.
4)Таким образом, разобьём работу на две части: исследование небольших и больших пузырей.
5)На данном слайде представлена одна из наших установок. Пузыри мы пускали с помощью шприца, их скорость мерили с помощью обработки видео по кадрам.
6)Перейдём к исследованию небольших пузырей.
7)Попробуем найти их скорость теоретически. Силу сопротивления для твердого шарообразного объекта в вязкой среде можно найти по формуле Стокса. Также можно записать второй закон Ньютона. И так мы получаем скорость твердого объекта. Но, как говорит теория, для жидкого или газообразного объекта коэффициент 2/9 необходимо заменить на 1/3.
8)Теперь необходимо проверить, насколько велико изменение объема в процессе поднятия пузырька. Для этого предположим, что процесс адиабатный и также учтем капиллярные эффекты. Подставив значения из нашего эксперимента, получаем, что объем изменяется всего на 2,7%, а значит, скорость можно считать постоянной. Основной нашей задачей сейчас будет являться определение зависимости скорости пузырьков от их объема, мы решили определять объем из видео
9) и поэтому сейчас необходимо исследовать искажение изображения пузыря.
10)Можно выделить два эффекта: во-первых, видимый размер объекта в трубке с жидкостью больше действительного, есть определённый размер объекта, при котором изображение занимает всю трубку; во-вторых, когда объект находится в трубке с жидкостью, видны те его точки, которые при рассмотрении в воздухе были бы не видны.
11)На самом деле это довольно просто можно описать в теории. И затем можно представить различие между видимым размером пузыря и действительным, это вы видите на слайде. Различие существенно и мы его будем учитывать при определении объема.
12)Таким образом мы построили график зависимости скорости пузырьков от объема. Как видно, при малых объемах пузырьков выполняется закон Стокса. Остальная часть графика нас пока не интересует.
13)Проведем линеаризацию зависимости для малых объемов. Как мы видим, теория действительно довольно точно подтверждается экспериментом.

14)Перейдём к исследованию больших пузырей, подобных представленному на экране.
15)Мы заметили, что скорость поднятия таких пузырей можно считать постоянной. Об этом свидетельствует график зависимости координаты пузыря от времени, который представляет собой прямую линию
16)Также мы обнаружили, что скорость таких пузырей не зависит от их длины. На экране представлен график, который это подтверждает.
17)На данном слайде представлена зависимость скорости пузыря от диаметра трубки. Важно отметить, что при определенном диаметре пузыри в принципе не двигались. Это связано с влиянием капиллярных эффектов…
18)Следующей задачей для нас является получение зависимости скорости пузырей от вязкости жидкости. Для этого нам необходим способ определения вязкости жидкости. Мы использовали метод Стокса. Мы сделали набор пластилиновых шариков различного диаметра. Затем пускали их в образец вязкой жидкости, строили график зависимости

скорости от их диаметра в квадрате. Как и следовало из теории, получали линию. И из коэффициента наклона данной прямой определяли вязкость.
19) Параллельно с этим для каждого образца жидкости мы измеряли скорость пузырей. Таким образом, мы построили график зависимости скорости пузырей от вязкости. Как мы видим, при увеличении вязкости скорость уменьшается, это происходит из-за увеличения сил вязкого трения.
20)Перейдем к теории для больших пузырей.
21)Основными положениями нашей теории является то, что:1) длинные пузыри можно считать цилиндрами, 2)на границе с пузырем скорость жидкости и воздуха не равна скорости пузыря,3) при расчете течения жидкости и воздуха можно пренебречь краевыми эффектами.
22)На данном слайде представлен основной подход для расчета течений как жидкости в зазоре, так и воздуха в пузыре. Здесь мы рассматриваем отдельный концентрический слой вещества, который движется вниз, на него действуют силы вязкого трения со стороны соседних слоёв, эти силы можно задать с помощью уравнения Ньютона для вязких жидкостей, также на слой действует сила тяжести и разность сил давления. Для этого слоя можно записать второй закон Ньютона, с учётом того, что течение стационарное. Таким образом, мы получаем дифференциальное уравнение, проинтегрировав которое два раза можно получить уравнение для скорости в любой точке с точностью до двух констант.
23)Так мы и получили уравнение для скорости в жидкости v1, и для скорости в пузыре v2. Для скорости в жидкости у нас есть два граничных условия. Это то, что скорость у стенки трубки равна нулю, и то, что скорость на границе с пузырем равна v0. Для воздуха у нас есть одно граничное условие, это то, что скорость на границе с жидкостью равна v0. От слагаемого C11*ln(r) мы избавляемся так же как и при выводе формулы Пуазейля, из-за того что скорость в центре пузыря не может быть равна бесконечности.
24)Теперь мы можем схематически отобразить распределение скоростей. На границе скорость равна v0, и отношение производных равно обратному отношению вязкостей, у стенок трубки скорость равна нулю.
25) Таким образом, у нас есть 4 неизвестные: u – скорость пузыря, R1 – радиус пузыря, Δp – разность давлений снизу и сверху пузыря, v0 – скорость жидкости и воздуха на границе. А значит нам нужно четыре уравнения. Они представлены на этом слайде. 1 – это уравнение непрерывности для жидкости, 2 – это второй закон Ньютона для всего пузыря, 3 говорит о том, что количество воздуха в пузыре не изменяется, то есть о том что поток внутри пузыря равен нулю, 4 – это условие того, что силы, действующие на граничный слой будь то жидкости, будь то воздуха, равны. На самом деле эти уравнения невероятно громоздкие и аналитически не решаются. Поэтому мы решали их численно.
26)Перейдем к сравнению данной теории с экспериментом.
27)Теперь мы можем дополнить график зависимости скорости пузырьков от объема скоростью для больших пузырей, полученной из нашей теории. На графике это отображено горизонтальной линией, так как скорость больших пузырей не зависит от объема, что было показано ранее. Как мы видим, схождение довольно высокое. Также теперь стоит объяснить наличие экстремума. С одной стороны с увеличением объема увеличивается выталкивающая сила, что увеличивает скорость, с другой стороны, с увеличением объема увеличивается воздействие стенок, что уменьшает скорость, а значит есть такой объем, при котором скорость максимальна.
28)Также давайте отобразим теорию на уже знакомом вам графике скорости больших пузырей от диаметра трубки. Как видно, есть определённая область, где теория точно подтверждается экспериментом. При больших диаметрах трубки теоретическое значение скорости выше. Для точки, в которой начинается расхождение число Рейнольдса для течения воздуха в пузыре равно 2440, при том, что турбулентное течение в таких условиях наблюдается при значениях больших 2300. Таким образом, при больших диаметрах трубки течение воздуха в пузыре будет турбулентным, а наша теория рассчитана на

ламинарное течение, поэтому теоретические значения скорости пузыря получаются завышенными. При маленьких диаметрах трубки наблюдается расхождение теории и эксперимента из-за того, что наша теория не учитывает капиллярные эффекты. Важно отметить , что данный эксперимент проводился при вязкости жидкости 0,33Па*с, а жидкости могут быть много более вязкими, и тогда, область в которой теория будет выполняться, будет намного больше.
29)В невязких жидкостях, наподобие воды, мы наблюдали такие интересные явления, как поверхностные волны и колебания пузырьков.
30)На данном видео показаны поверхностные волны. Видео снято на скорости 600 кадров в секунду и замедлено в 20 раз. Условия, при которых наблюдались поверхностные волны, соответствовали турбулентному течению, как воздуха, так и жидкости.
Поэтому можно сделать вывод о том, что они появляются вследствие возникновения вихрей.
31)На данном слайде представлено, как, например, в жидкости появляется вихрь и запускает такую волну. Этот вихорь движется вниз с основным потоком жидкости и запускает колебания на значительной части поверхности пузыря.
32)На данном видео представлены колебания пузырька в трубке с водой.
33)Однако, важно то, что такие колебания возникают и в очень большом сосуде. Это видно на видео. На наш взгляд они происходят из-за последовательно отрыва вихрей с различных сторон пузыря.
34)Это вы можете видеть на слайде. Действительно из-за данного явления последовательно изменяется направление тормозящей силы, что и вызывает колебания.
35)Перейдем к выводам.
Для больших пузырей:
1)Скорость не зависит от длины
2)Скорость можно считать постоянной
3)При малых диаметрах трубки имеют значительное влияние капиллярные эффекты
4)Характер течения жидкости или воздуха в пузыре существенно влияет на движение пузыря
5) При условии ламинарного течения, как в жидкости, так и в воздухе, возможно теоретическое
описание данного явления
6)При малых вязкостях жидкости на поверхности пузыря появляются капиллярные волны вследствие вихрей
Для маленьких пузырьков:
1)Скорость можно считать постоянной
2)В вязких жидкостях выполняется закон Стокса
3)При малых вязкостях жидкости происходят колебания вследствие турбулентного течения.
36)Спасибо за внимание.