

МИНИСТЕРСТВО ВНУТРЕННИХ ДЕЛ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ КАЗЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КАЗАНСКИЙ ЮРИДИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ МИНИСТЕРСТВА
ВНУТРЕННИХ ДЕЛ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ»
(КЮИ МВД РОССИИ)

Волостнов В.Е.

**ПРИМЕНЕНИЕ СТРУЙНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ
ЗВУКОВЫХ ВОЛН В ДЕЯТЕЛЬНОСТИ
ОРГАНОВ ВНУТРЕННИХ ДЕЛ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Методические рекомендации

Казань-2023

Оглавление

Введение.....	3
1. Разработка крупно вихревого моделирования самовозбуждающихся колебаний, внутри осциллятора Гельмгольца.....	5
1.1. Колебания.....	5
1.2. Разработка крупно вихревого моделирования самовозбуждающихся колебаний, внутри осциллятора Гельмгольца.....	7
1.3. Описание низкочастотного гидравлического излучателя упругих волн .	11
1.4. Число Струхала	15
2. Изучение скважинного акустического излучателя с кольцом в длинной цилиндрической камере.....	17
2.1. Модель струйного осциллятора Гельмгольца.....	19
2.2. Формы резонансной камеры.	20
3. Экспериментальные исследования.....	37
3.1. Экспериментальная установка.....	37
3.2. Методика эксперимента	39
Заключение	54
Список литературы	56

Введение

Для генерации упругих колебаний используются различные излучатели, один из которых – струйный осциллятор Гельмгольца. В его состав входит сопло, струя воздуха и острая кромка выходного отверстия. Внутри камеры объемного резонатора встроен струйный генератор, из сопла к выходному отверстию устремлена струя воздуха через всю камеру. Исключительно исходя из геометрических размеров объемного резонатора определяется частота собственных колебаний, зависимости от других параметров струи - нет. Причиной этого исследования стали наблюдения, проведенные во время испытаний осциллятора Гельмгольца. Одним из выводов было наличие низкочастотных регулярных колебаний давления внутри резонатора Гельмгольца, которые возникали при продувке струей воздуха непосредственно через нее. Было обнаружено, что эти колебания давления достаточно велики, чтобы мешать экспериментам в камере и даже вызывать беспокойство по структурным причинам. После некоторых экспериментов по акустическому и вибрационному возбуждению было обнаружено, что форма камеры с ее отверстиями действует как осциллятор Гельмгольца, реагируя на поле давления струи и заставляя давление в камере колебаться вокруг частоты Гельмгольца.

Так же данная работа может и применяться в специальных подразделениях МВД России, где данная система может воздействовать акустически на биологические объекты. Данный метод может быть предназначен для пресечения массовых беспорядков и протестных акций с помощью оглушающего звука. Где может быть рассмотрено разное строение камеры, для более высокой эффективности за счет увеличения дБ.

Значимость этой работы вызвана тем, что различные влияния формы резонансной камеры еще не изучались — исследовались только цилиндрические камеры. В нашем случае мы рассматривали камеры с

квадратной и круглой формой. Использование камер с квадратным сечением может быть полезно при создании матрицы излучателей.

Целью данной работы было экспериментально исследовать принцип работы резонатора Гельмгольца и влияние геометрических характеристик на его собственные колебания.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- обзор научной литературы по данному вопросу;
- изготовить лабораторный образец осциллятора с различными резонансными камерами;
- исследовать собственные колебания осциллятора с различными камерами (определить частоту собственных колебаний и добротность);
- провести экспериментальные исследования процесса генерации колебаний и установить зависимости влияния геометрии камеры на амплитуду и частоты генерируемых колебаний, а также на характеристики мод колебаний;
- провести исследования зависимости числа Струхала от числа Рейнольдса;
- проводить экспериментальные исследования и анализировать полученные результаты.

1. Разработка крупно вихревого моделирования самовозбуждающихся колебаний, внутри осциллятора Гельмгольца

1.1. Колебания

Колебательный процесс характеризуется как процесс изменения твердых, жидких и газообразных тел, в течении которого они совершают перемещения (колебания), полностью или частично воспроизводимые во времени.

Звук передается как колебательное воздействие упругой среды, т.е. в виде звуковых волн. Звуковые колебания называются колебательными перемещениями частиц среды под влиянием этого возмущения. Расстояние, в котором происходят эти волны, принято называть звуковым полем. В случае, когда известен источник воздействия, то пространство, в котором наблюдаются звуковые колебания, вызванные этим источником, принято называть звуковым полем данного источника сигнала. Звуковые вибрации - это частный случай механических колебаний [13].

Звуковые колебания в жидких и газообразных средах относят к продольным колебаниям, при которых в среде совершают движение по ходу перемещения волны. В твердых телах, кроме продольных вибраций, возникают поперечные колебания, например, когда колебания среды движутся в сторону, перпендикулярной линии расположения волны.

Звуковые волны движутся с постоянной скоростью, её называют скоростью звука. В разных средах и объектах скорость звука изменяется по-разному [4].

Например, в газообразных средах скорость звука определяется от интенсивности среды и статического атмосферного давление:

$$c = \sqrt{\gamma * \frac{\rho \alpha t}{\rho}} \quad (1.1)$$

где, $\gamma = C_p / C_v$ – коэффициент адиабаты; C_p и C_v - теплоемкость среды при постоянном давлении и объеме соответственно.

Резонатор - это колебательная система, в которой энергия накапливается из-за резонанса с движущей силой. Существует ещё акустический резонатор. Этот прибор, разработан для генерации резонанса акустических вибраций в среде, которая заполняет устройство. Резонатор Гельмгольца (рис. 1.1) акустическое устройство, которое является емкостью с цилиндрической формой. Для этого устройства свойственно проявление резонанса. Это означает увеличение амплитуды колебаний воздуха в камере, образцом этого является шум от воздушного потока пустой бутылки в горле.

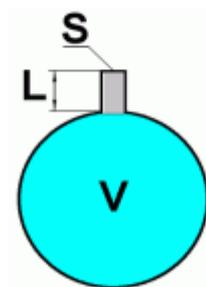


Рисунок 1.1 – Схема резонатора Гельмгольца.

Формула для определения частоты собственных колебаний такого резонатора имеет вид:

$$F = \frac{C_o}{2\pi} \times \sqrt{\frac{S}{V * L}} \quad (1.2)$$

где F - частота, Гц; C_o - скорость звука в воздухе (340 м/с); S – сечение отверстия, m^2 ; V – объем резонатора, m^3 ; L – длина отверстия, м.

Следующим примером резонатора можно рассмотреть органную трубу (рис.1.2), в которой стоячие волны будут возникать, когда на длину волны приходится нечетное число четверть волновых длин [15].

Для резонаторов четверть волнового и полуволнового вычислительные уравнения соответствующих частот будут приведены следующим образом:

$$F_{\frac{1}{4}} = \frac{c_0}{4L} * (2p - 1) \quad (1.3)$$

$$F_{\frac{1}{2}} = \frac{p \times c}{2L} \quad (1.4)$$

Где $p = 1, 2, 3 \dots$ - целое число.



Рис.1.2. Схема четвертьволнового резонатора

Именно при таком случае резонатор будет работать в виде некой системы, которая обладает другими режимами моды на разных частотах. Существует множество резонансных частот, но сильнее всего проявляется первая мода колебаний. [5]

1.2. Разработка крупно вихревого моделирования самовозбуждающихся колебаний, внутри осциллятора Гельмгольца

Рассмотрим исследование в котором было проведено моделирование больших вихрей для моделирования трехмерного потока кавитационной турбулентности, где внутри осциллятора Гельмгольца имеется высокое число Рейнольдса. Численные результаты будут показывать нам разумное согласие с имеющимися экспериментальными наблюдениями и данными. В соответствии с этим стратегия решения кавитационного потока визуализируется простым способом и показывает первичную и вторичную

отдачу, вызванную сдвиговым слоем и стенкой столкновения. Эволюция и взаимодействие между кавитацией и вихрями хорошо задокументированы и подробно обсуждены. Результаты показывают нам, что течение внутри камеры можно разделить на три стадии, границами которых являются места выхода вихря на поверхность стенки и места образования устойчивого вихревого кольца на стенке столкновения. Длина резонатора оказывает большое влияние на частоту, указывая на то, что осевые ограничения оказывают большее влияние на частоту, чем радиальные ограничения. Когерентная структура используется для выявления влияния взаимодействия вихря со стенкой. И поэтому структура показывает, нам что существует тесная связь между вихре-кавитационным взаимодействием и механизмом потока. Такая разработка дает представление о внутреннем потоке осциллятора Гельмгольца и представляет собой дальнейшие усилия по демонстрации механизма осцилляционной струи.

В такой работе было проведено моделирование с помощью трехмерного кода ANSYS FLUENT 15.0. Модель LES была использована для моделирования турбулентности. В её основе лежит идея расчета только крупных вихрей турбулентного потока, а мелкомасштабные вихри отфильтровываются, тем самым создают субсетевую модель (SGS). Поле течения разделяется на масштабную составляющую и мелкомасштабную составляющую, которая приведена следующим образом:

$$U = U^{\sim} + U, \quad (1.5)$$

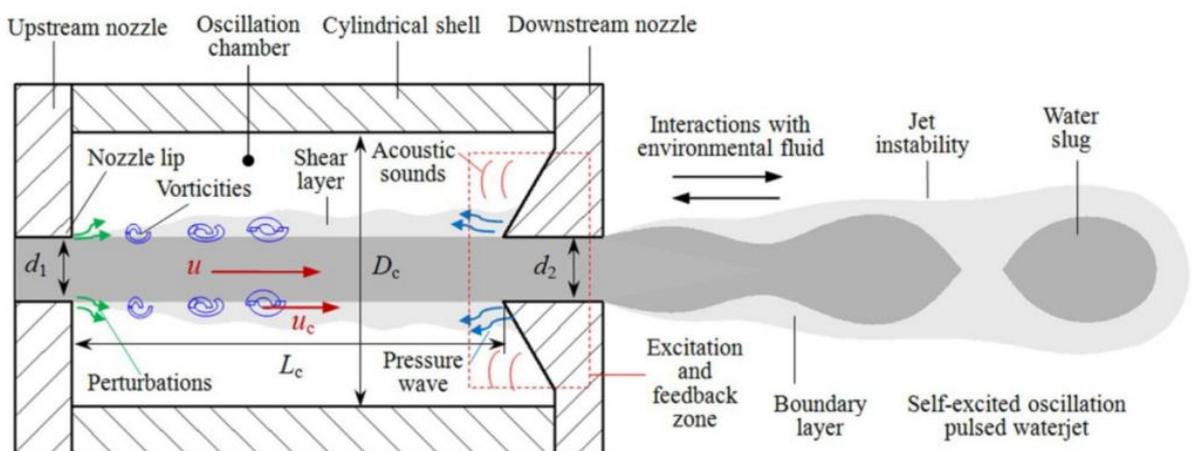
где $U^{\sim} + U$ разрешенные компоненты и субмасштабные компоненты, соответственно. Основная роль модели SGS заключается в обеспечении переноса массы, импульса и энергии от крупных масштабов к малым масштабам, что делает решаемое уравнение масштабного движения замкнутым. Поскольку границы потока мало влияют на мелкомасштабные флуктуации, модель подсети может хорошо применяться к сложному турбулентному движению [1,15]. Мелкомасштабные флуктуации устраняются методом фильтрации, который может быть реализован через

интегральную операцию в физическом пространстве. Отфильтрованное несжимаемое трехмерное уравнение Навье-Стокса будет приведен в следующей форме:

Непрерывность: $\frac{\partial \tilde{u}}{\partial t} = 0$ (1.6)

Мгновение: $\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \tilde{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tilde{\tau}_{ij}}{\partial x_j}$ (1.7)

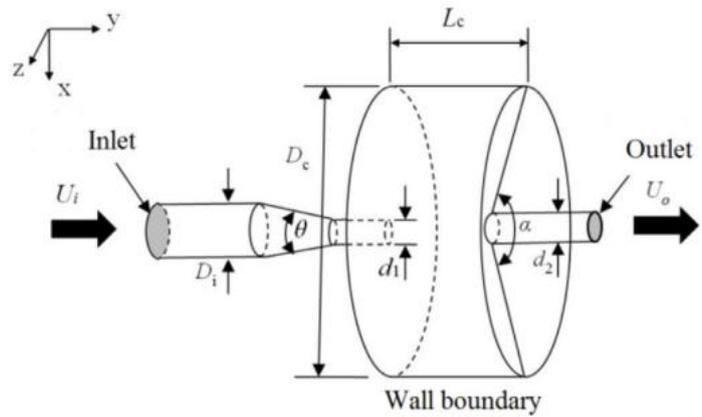
В этих уравнениях ρ , u и p - плотность среды, скорость и давление, соответственно. Знак '~' обозначает отфильтрованные переменные на уровне сетки. Тензор u_i представляет собой мгновенную величину вектора $u e_i$, обозначающий направления трехмерных координат. $\tilde{\tau}_{ij}$ - это модифицированный тензор субсеточного масштаба (SGS).[16]



Схематическая диаграмма осциллятора Гельмгольца (рис. 1.3)



(a)



(b)

Вычислительная область (рис.1.4)

Тензор напряжений SGS $\tilde{\tau}_{ij} = u_{ij} - u_i u_j$, определяется с помощью динамической модели SGS. Построение корпуса тензора SGS является ключом к моделированию турбулентности в крупных вихрях. Скорость пульсации выражается как сумма разрешимой и неразрешимой пульсации масштаба. Субсеточное напряжение рассчитывается и разлагается на следующие три аспекта

$$\tilde{\tau}_{ij} = L_{ij} + C_{ij} + R_{ij} \quad (1.8)$$

где L_{ij} - напряжение Леонарда, обозначающее взаимодействие между разрешимыми масштабами; C_{ij} - поперечное напряжение, которое представляет собой взаимодействие между разрешимым масштабом и флуктуацией неразрешимого масштаба. R_{ij} называется подсеточным напряжением Рейнольдса, которое представляет собой взаимодействие между флуктуациями неразрешимого масштаба. Масштаб фильтрации принимается в качестве оси координат, а подсеточное напряжение Рейнольдса представляет собой обмен импульсом подсеточного напряжения, создаваемый взаимодействием пульсаций при воздействии масштаба фильтрации на подсеточное напряжение, которое представляет собой обмен

энергией между движением разрешимого масштаба и движением подсеточного масштаба.

В этом случае девиаторная часть $\tilde{\tau}_{ij}$ моделируется как:

$$\tilde{\tau}_{ij} - \frac{\delta_{ij}}{3} \tilde{\tau}_{kk} = -2\nu_{\tau} \tilde{S}_{ij} \quad (1.9)$$

где δ_{ij} - дельта Кронекера, ν_{τ} - вихревая вязкость, а S_{ij} это тензор скорости деформации в разрешенном масштабе, определяемый:

$$\tilde{S}_{ij} = \frac{1}{2} (\partial \tilde{u}_i / \partial x_j + \partial \tilde{u}_j / \partial x_i). \quad (1.10)$$

Величина определяется:

$$\tilde{S} = (2\tilde{S}_{ij}\tilde{S}_{ij})^{1/2}. \quad (1.11)$$

Динамика модели SGS:

$$\nu_{\tau} = (C_s \Delta)^2 |\tilde{S}| \quad (1.12)$$

Метод предполагает, что мелкомасштабное производство и рассеяние энергии находятся в равновесии. Значение C_s изменилось от 0,1 до 0,2 для более точного результата, а 0,12 было выбрано как постоянная для последующих вычислений [6].

1.3. Описание низкочастотного гидравлического излучателя упругих волн

Этот источник расположен на глубине ствола обсадной колонны на глубине пласта. Постоянное давление, превышающее забойное на 15-20 МПа, создается из устья скважины с помощью соответствующей насосной установки и передается через колонку на клапан. Пульсация давления создается за счет движения клапана, который управляется в свою очередь автоколебательным гидроприводом.[16]

Из рис. 1.6., следует, что при опускании курсора открывается канал 6 и в объеме окон давление от $p_{\text{СКВ}}$ повышается до $p_{\text{П}}$ увеличивая давление $p_{\text{П}}$ перекрывается и полость окон 10 соединяется через окна 12 с межтрубным пространством с давлением скважины. Зона перфорации обсадной колонны, через которую перепад давления $\Delta p = p_{\text{П}} - p_{\text{СКВ}}$ воздействует на нефтегазовый пласт, создавая в нем упругое волновое поле, изолированное от затрубного пространства пакерами 8. Когда автоколебательный гидропривод 7 производит колебательное движение золотника 6 с частотой, равной доминирующей частоте пласта, и с амплитудой, обеспечивающей перекрытие окон 6 и 12, то на пласт действует пульсирующее давление перфорации 9, за счет чего в них возникают упругие деформации.

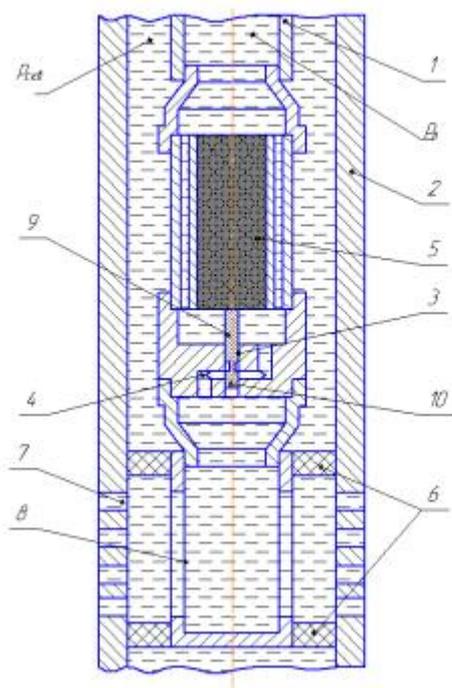


Рис. 1.6. Низкочастотный гидравлический излучатель упругих волн: 1 - НКТ; 2 – обсадная труба; 3 – клапан золотникового типа; 4 – окна для подачи $p_{\text{П}}$ в зону перфорации; 5 – автоколебательный гидропривод клапана; 6 – пакер; 7 – перфорация; 8 – окна для выхода жидкости; 9 – шток; 10 – окна линии подачи и слива; $p_{\text{П}}$ – давление питания; $p_{\text{СКВ}}$ – давление в скважине.

Кроме того, рассматривается возможность использования в качестве привода клапана автоколебательного привода способом реализации обратной связи.[16]

Автоколебательные гидравлические вибраторы с обратной связью находят широкое применение в сельском хозяйстве и машиностроении.

Принципиальная схема автоколебательного силового гидравлического привода с зазором в обратной связи и цилиндром двухстороннего действия представлена на рис. 1.7.

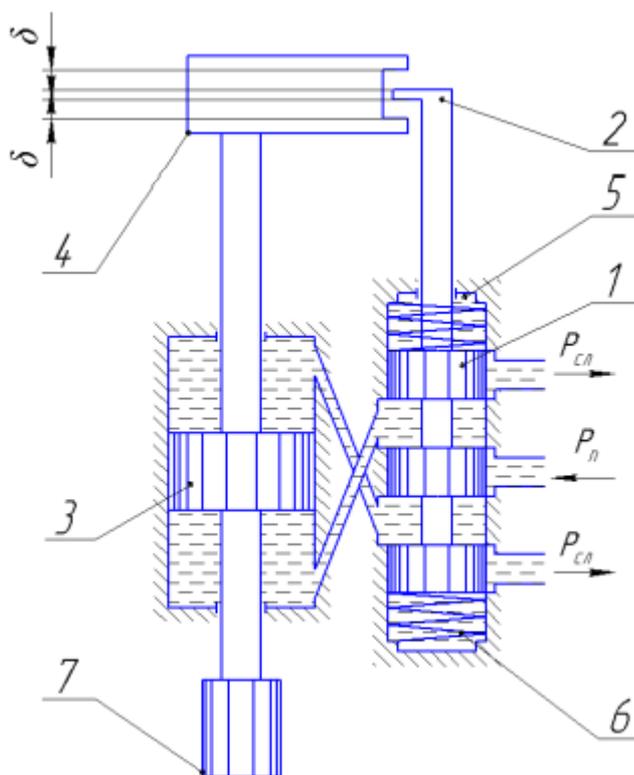


Рис. 1.7. Автоколебательный гидравлический привод с зазором в обратной связи и цилиндром двухстороннего действия: p_p – давление питания; $p_{сл}$ – давление слива; ∇ – зазор; 1 — золотник; 2 – ограничитель хода золотника; 3 - поршень силового цилиндра; 4 – ограничитель хода поршня и дополнительная масса; 5 – упор; 6 – пружина золотника; 7 – клапан

Описание принципа работы автоколебательного гидропривода с зазором обратной связи и поршнем двустороннего действия: при

незначительном смещении витка 1 вниз верхняя полость гидроцилиндра 3 соединяется с выхлопной полостью и его нижняя полость соединена с дренажной полостью. Под действием перепада давления в полостях гидроцилиндр начинает двигаться вверх. Движение поршня происходит до момента контакта с ограничителем хода золотника. Между ограничителями хода золотника и поршнем происходит столкновение, и золотник смещается, нижняя полость гидроцилиндра соединена со сливной полостью, верхняя полость гидроцилиндра соединена с разгрузочной полостью, что меняет направление движения гидроцилиндра. Процесс повторяется в обратном порядке. При определенных конструктивных параметрах процесс по своей природе является автоколебательным.[10]

Если обозначить через «у» перемещение поршня 3, через «х» - перемещение золотника 1, и сделать следующие допущения:

- перетечки между рабочими полостями гидроцилиндра пренебрежительно малы;
- гидравлическое сопротивление соединительных трубопроводов пренебрежительно мало;
- нагрузка на поршень состоит из силы инерции и постоянной по величине (силы сухого трения), направленной против скорости поршня;
- происходит одно соударение ограничителей хода золотника и поршня за рабочий ход вибратора;

Запишем дифференциальное уравнение автоколебательного гидропривода:

$$\begin{cases} M \cdot \ddot{y} + R \cdot \text{sign}(\dot{y}) = S \cdot \Delta p; \\ 2 \cdot S \cdot \dot{y} + K_{\text{сж}} \cdot \Delta p = \lambda \cdot 2 \cdot K_f \cdot x \cdot \sqrt{\frac{(p_n - p_{\text{сл}} - \Delta p \cdot \text{sign}(x))}{\rho}} \end{cases} \quad (1.13)$$

где Δp – давление в полостях гидроцилиндра;

M - приведенная масса нагруженного поршня;

R – постоянная составляющая приведенной силы сухого трения;

S - площадь поршня;

L_0 - начальная длина

E - модуль объемного сжатия

ρ -плотность жидкости

Переключение происходит при следующих условиях:

$$\dot{x} = \dot{y} \text{ при } \begin{cases} y = x + \frac{\delta}{2} \\ y = x - \frac{\delta}{2} \end{cases} \quad (1.14)$$

Недостатками данного конструктивного решения являются невозможность отдельного регулирования частоты и амплитуды колебаний и, как следствие, сложность регулирования. Как показывает практика, вибраторы данной конструкции не устойчивы при увеличении расхода рабочей жидкости.

1.4. Число Струхала

Отметим, что вычисление числа Струхала для струй одинаковой длины и с одинаковой скоростью приводит к разным результатам. Скачок преимущественной частоты генерации с одной характеристики на другую обусловлен только механизмом обратной связи при этом в струе с теорией Крюгера-Шмидке. Одновременно с доминирующей частотой можно услышать множество других частот, амплитуда которых незначительна из-за отставания периодов их генерации от усиления. Эта предпочтительная частота используется при расчете числа Strouhal (ShL).[8]

Преобладающая частота генерации определяется не механизмом усиления в струе, а механизмом усиления в объемном резонаторе. Это явление еще недостаточно изучено и нет четкого представления, например, о том, как частоты в механизме усиления в струе согласуются с резонансной камерой. Есть ли характеристика усиления объемного резонатора при приведении его частоты к полосе усиления резонатора, или мы наблюдаем

только характеристики, предварительно усиленные механизмом обратной связи струи?

Очевидно, что преобладающая частота в системе сопло — струя — генерирующая кромка может изменяться в гораздо большем диапазоне, чем в системе сопло — струя — кромка — резонатор [3]. В системе с резонатором число Струхаля увеличивается с увеличением длины струи и постоянной скорости, несмотря на уменьшение ЧСК резонатора (длина струи определяется расстоянием между передней и задней крышками), так как уменьшение ЧСК не компенсирует увеличение длины струи. В системе без резонатора число Струхаля остается неизменным при увеличении длины струи и постоянной скорости, как отмечает В. Струхаля, за счет пропорционального уменьшения преобладающей частоты с увеличением характерного размера, будь то диаметр профильного стержня или длина струи.

Построить графики в координатах число Рейнольдса - число Струхаля можно только в одном режиме, где эти комплексы изменяются непрерывно, а частота изменяется по характеристике. Характеристикой моды является непрерывное изменение частоты в ее пределах, амплитуда может вести себя по-разному. Обычно при устойчивом увеличении скорости на одном режиме амплитуда сначала постепенно увеличивается от нуля до предельного значения, затем постепенно уменьшается до нуля. Реже один режим резко переключается на другой со скачком частоты

2. Изучение скважинного акустического излучателя с кольцом в длинной цилиндрической камере

2.1. Модель струйного осциллятора Гельмгольца

Конструкция генератора состояла из цилиндрического корпуса с двумя круглыми торцевыми пластинами (рис. 1). Каждая торцевая пластина имела круглое отверстие в центре, предназначенное для установки сменных вставок. Было два набора вставок; один содержал несколько различных геометрий входа, а другой содержал большое количество различных выходов, используемых для оптимизации осциллятора. Торцевые пластины свободно скользили внутри внешней оболочки, которая была обрезана по длине. Во время испытаний пластины всегда зажимались стальными ремнями, а узкий зазор (0,25 мм) заполнялся модельной замазкой (шпаклевкой) и заклеивался липкой лентой.

Все размеры были отмасштабированы относительно диаметра струи $D_i = 2,54$ мм, который был единственным большим размером, который оставался постоянным. Остальные размеры можно изменить следующим образом:

Диаметр внешней оболочки	$D_t/D_i = 4, 8 \text{ и } 16$
Длина струи	$L/D_i = 0 - 8$
Диаметр выходного отверстия	$D_t/D_i = 1 - 1.95$

Помимо изменения основных размеров, изменилась и типология геометрии входов и выходов. Было три разных геометрии впускного отверстия, которые соединялись в восходящий питательный канал (диаметр 63,5 мм) с входом струи в камеру. Одно из них представляло собой гладкое сопло длиной 75 мм. контур которого представлял собой композит из двух совпадающих одинаковых кубиков. Второе представляло собой заостренное отверстие, передняя поверхность которого была наклонена под углом 9,5 градусов, а нижняя поверхность была заподлицована торцевой пластиной.

Диаметр этого отверстия был больше, чем у гладкой насадки, чтобы обеспечить в ней рефлекторную жилку с коэффициентом рельефа 0,6, т.е. $D = D_1/0,61$. Третий был таким же, как и первый, но включал в себя тонкостенное прямое удлинение $3 D_1$, которое выступало в камеру, что делало струю короче камеры. Конфигурация заключалась в изучении влияния формы объема камеры и установлении необходимости обеспечения вертикальной поверхности в плоскости выхода струи. Выбор первых двух геометрий отражает намерение выходного сдвигового слоя быть тонким, чтобы поддерживать механизм неустойчивости потока. Последний вход имел более толстый пограничный слой на выходе из-за удлинения сопла [2].

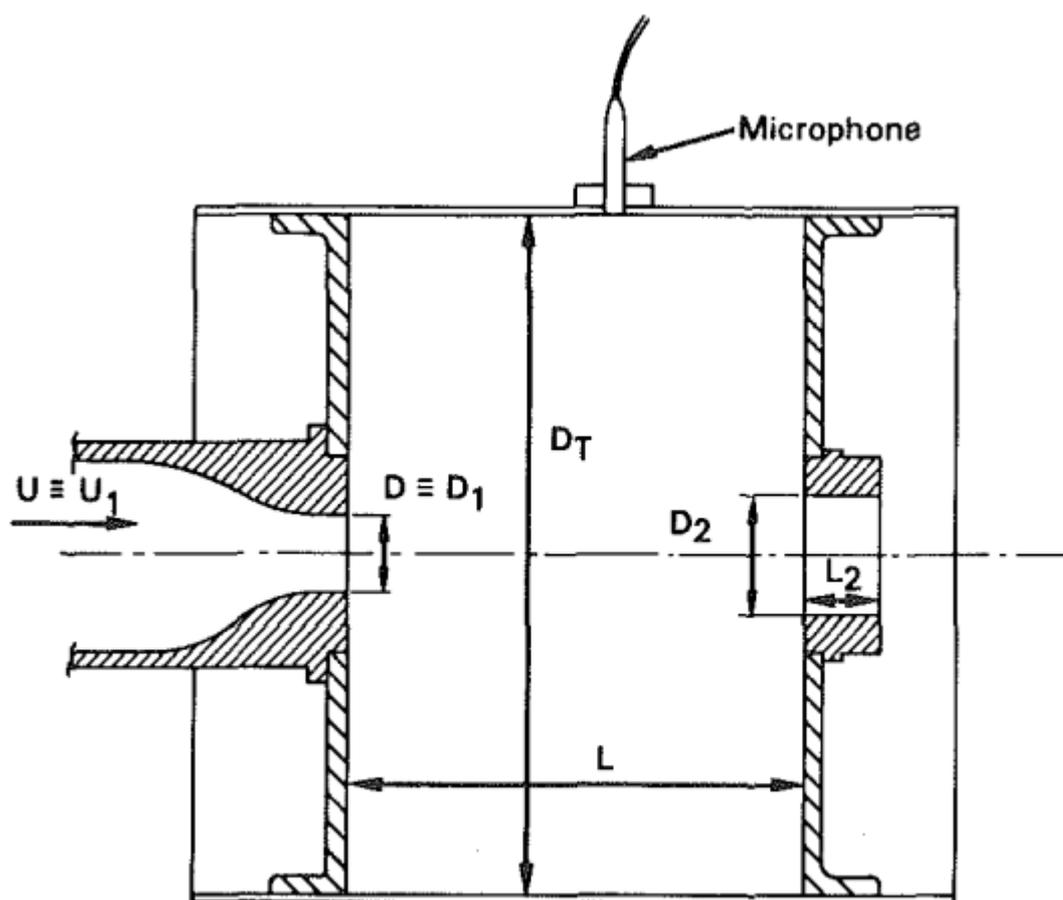


Fig. 1 Experimental set-up of the oscillator

Экспериментальная установка осциллятора (Рис. 1.8)

Выходные отверстия имели три различные геометрии: (1) квадратное отверстие толщиной $Z > i$ (рис. 1), (2) заостренное отверстие с острыми

краями, верхний край которого находится заподлицо с выходной концевой пластиной, а нижняя кромка наклонена под углом 45 градусов, а нижняя поверхность наклонена под углом 45 градусов, и (3) гладкое отверстие с закругленной передней кромкой радиусом $0,5 D$, общая толщина равна D .

Воздухопровод для осциллятора был сконструирован с целью минимизации любой неустойчивости, исходящей из восходящего потока, чтобы изолировать интересующие нас механизмы и убедиться, что колебания были самовозбуждающимися. Поток подавался центробежным вентилятором, отделенным от испытательной установки большим Z-образным, акустически облицованным пленумом. В результате поток был достаточно устойчивым, с u'/U 0,5 процента на выходе струи.

Колебания давления в камере измеряли с использованием 1/8-дюймового (3 мм) микрофона Bruel and Kjaer Model 4135, установленного заподлицо в цилиндрической оболочке посередине между двумя концевыми пластинами. Сигнал микрофона был отфильтрован для подавления частот ниже 50 Гц, чтобы удалить нежелательный низкочастотный шум, и выше 1000 Гц, чтобы удалить любой инструментальный шум; частота генератора Гельмгольца находилась в диапазоне 100-350 Гц для всех протестированных конфигураций. Интенсивность колебаний давления в типичном осцилляторе Гельмгольца достаточно однородна, так как частота колебаний обычно на порядок ниже частоты акустических стоячих волн. Сигнал давления анализировался с помощью узкополосного анализатора спектра в реальном времени, который обычно давал очень узкий спектр основного тона при резонансе на частоте колебаний.

Гельмголец резонирует с его описанием и назначением

Резонанс Гельмгольца — резонансное явление воздуха в полости, примером которого является гул пустой бутылки от потока воздуха, направленного перпендикулярно ее горлышку. Наименования этого

феномена произошло от названия аппарата, узкогорлой вазы, резонатора Гельмгольца, созданного в 1850-х годах известным физиком Германом фон Гельмгольцем, создателем классической акустики, благодаря которой он определял частоты (или тоны) в музыке и в прочих сложных звуках.[4]

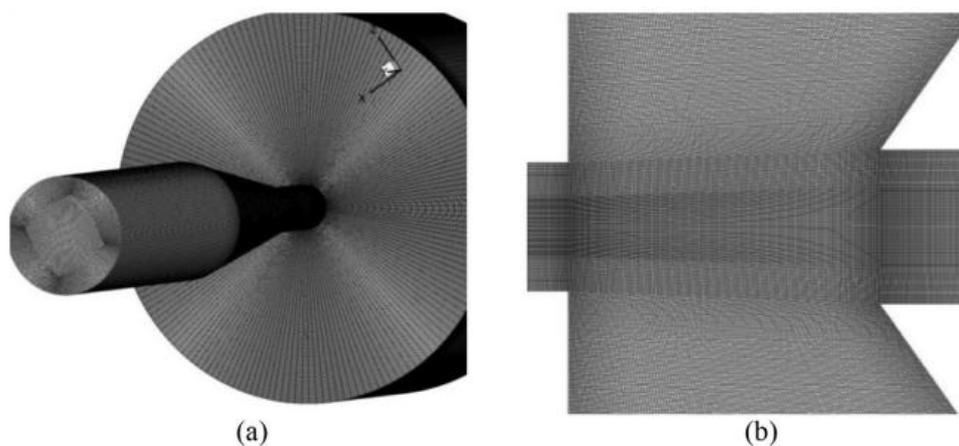
Резонанс Гельмгольца находят применение в двигателях внутреннего сгорания и в акустических системах. Системы впрыска горючего, называемые «методами Гельмгольца», были предприняты в двигателях Chrysler V10 в пикапах Dodge Viper и Ram, а также в мотоциклах Buell. На струйных инструментах с полым корпусом, таких как гитара или скрипка, одним из максимальных значений резонансной кривой, является резонанс Гельмгольца (остальные — резонансные частоты деревянных частей инструмента). Барабан западноафриканского джембе имеет приблизительно суженную горловину, что придает ему насыщенный басовый тембр.

2.2. Формы резонансной камеры.

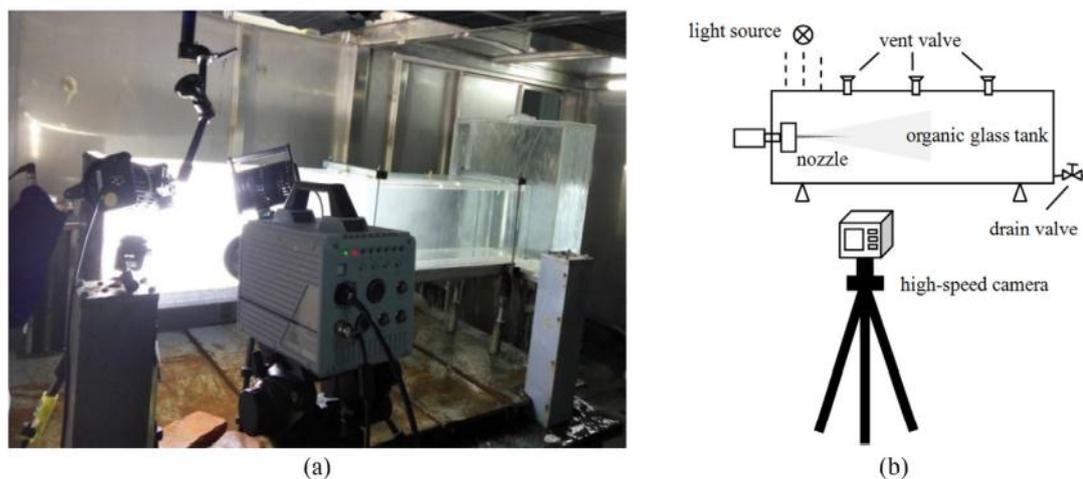
Модуляция модели.

Когда давление в жидкости падает ниже давления насыщения давления пара, жидкость в области низкого давления образует двухфазный пароводяной поток, а течение в полости схлопывается через нижнюю область высокого давления. Была также показана исследовательная динамика кавитационного осыпания вокруг подводного крыла методом LES, чтобы продемонстрировать переход кавитирующей структуры потока из-за взаимодействия кавитационных вихрей. Результаты такого исследования показали, что крупномасштабное вихревое моделирование может точно предсказать кавитационное течение и описать детали процесса развития вихря.[4,14] Для подтверждения точности численного моделирования был проведен эксперимент по высокоскоростной фотосъемке. Сопло было установлено на одной стороне бака, а два светодиодных фонаря

использовались для освещения верхней части бака. Резервуар изготовлен из органического стекла для наблюдения за полем течения внутри сопла.



Модель трехмерная и сетка (Рис.1.9)

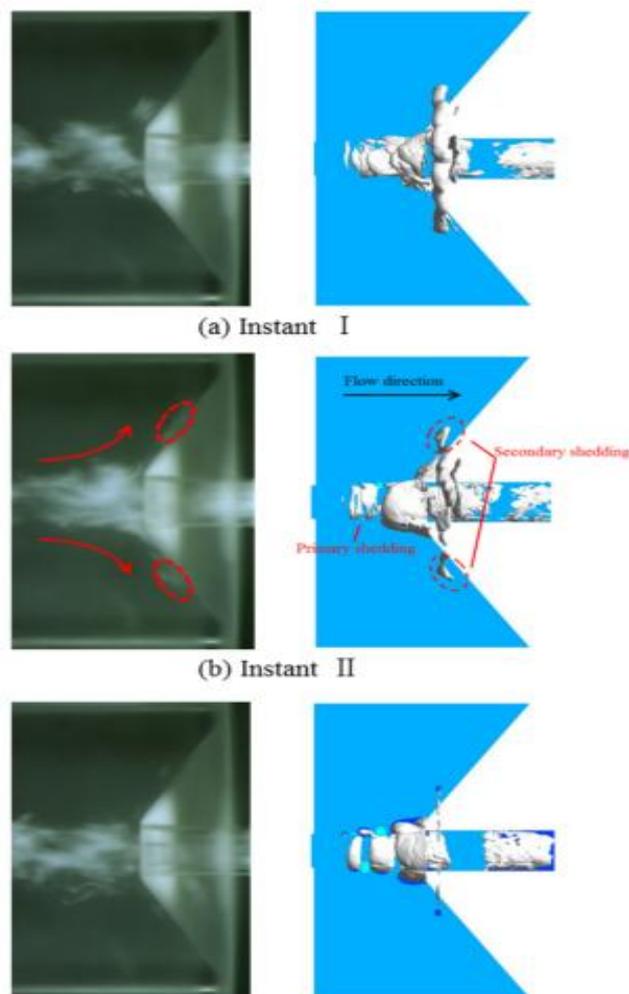


Экспериментальная установка и её схема. (Рис.2.1)

Высокоскоростная камера с объективом 50 мм использовалась для визуализации развития кавитации. Частота кадров составляла 20000 кадров в секунду; таким образом, время срабатывания затвора составляло $1/20000$ с [16,3].

Структуры течения для кавитации облаков наблюдались вдоль боковой проекции. Высокоскоростные изображения показывают, что кольцевая кавитация, показанная LES, хорошо согласуется с экспериментальными

данными. Первоначально кавитация возникала вблизи сопла осциллятора Гельмгольца, расположенного выше по потоку. По мере того как кавитация спускалась вниз по потоку, она сдерживалась стенками столкновения с обеих сторон и вниз по потоку, предотвращая развитие кавитации. Столкновение превратилось в сложное столкновение стенок вихря, и объемная доля газовой фазы в каверне периодически менялась. Повторялся выход вихря Ренкина вблизи кромки входного сопла и формировалась первичная кавитация, где давление падало ниже давления насыщенного пара. По мере приближения пузыря к стенке он постепенно сжимался и замедлялся, соседние пузырьки сливались в полосатый пузырь, а затем формировался более крупный трубчатый пузырь как показано на (рис.2.1). Рисунок 2.1(а), растущее число пузырьков собралось возле стенки столкновения ниже по течению, и пузырьки двинулись вдоль направления стенки расширяясь. Затем возникло вторичное осыпание, и микроструя, вызванная разрывом пузырьков, повлияла на последующую кавитацию, как показано на рис. 2.1. (b). В конечном итоге, из-за вязкого действия жидкости, вихри в конечном итоге рассеялись, что привело к разрушению парофазной структуры, как показано на рис. 2.1(с).



Сравнение результатов численного моделирования и эксперимента (Рис.2.2)

Изучение акустического излучателя с кольцом в длинной цилиндрической камере

Скважинный акустический излучатель (САИ) предназначен для формирования в воздушном потоке, закачиваемом через нагнетательные скважины в продуктивный нефтяной пласт, струйные колебания давления, которые способствуют увеличению подвижности пластового флюида и увеличению дебита добывающей скважины. Это устройство, не имеющее подвижных компонентов, также подходит для создания вибраций в потоке жидкости низкочастотного давления.

САИ состоит из двух независимых устройств: струйного генератора и объемного резонатора. Струйный генератор первичных пульсаций давления

состоит из сопла, воздушной струи и острой кромки выходного отверстия. Генератор струи размещен внутри камеры объемного резонатора, а струя жидкости проходит от сопла к выходному отверстию через всю камеру. Струя задевает своей возмущенной периферией острые кромки выходного отверстия, и вблизи кромок с определенной частотой $f \sim W / L$, где W — скорость струи, L — длина струи, генерируются локальные возмущения давления. Объемный резонатор представляет собой цилиндрическую камеру с двумя отверстиями в передней и задней крышках. При умеренных числах Рейнольдса ($Re; < 5...7 \times 10^4$) эта двухгорловая камера ведет себя как классический одногорловой резонатор Гельмгольца и колеблется на низких частотах f которая возбуждается как динамиком, так и струей и определяется выражением:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{V} \left(\frac{d_1}{\ell_1} + \frac{d_2}{\ell_2} \right)}, \quad (2.1)$$

где c — скорость звука в среде, V — объем камеры, и d_2 — диаметры сопла и выходного отверстия, и $P. 2$ — длины сопла и выходного отверстия соответственно. При достижении больших чисел Рейнольдса ($Re, > 7...8 \times 10^4$) за счет увеличения скорости или удлинения струи эта камера резонирует при возбуждении струей на полуволновой частоте резонатора $f_0 = c / 2L$, где L - зазор между крышками. При возбуждении динамикой цилиндрическая камера с двумя горловинами будет колебаться с частотой Гельмгольца (которая принимается за частоту собственных колебаний камеры), но если отверстие достаточно уменьшенные, то они превращаются в полуволновые резонаторы [7].

При совпадении частоты генерации первичных колебаний давления с частотой естественных колебания (ЧСК) объемного резонатора, наступает резонанс. При этом, с выхода отверстия излучаются акустические волны.

Схематически механизм генерации выглядит следующим образом. В застойной зоне за срезом сопла вращается кольцевой вихрь, от которого со строгой периодичностью отрываются кольцевые вихревые структуры,

похожие на кольца дыма, увлекаемые струей в направлении острой кромки сопла со скоростью $W_k = W/2$. При столкновении этих вихревых структур с острой кольцевой кромкой они деформируются и, при этом, образуются локальные возмущения низкого давления, распространяющиеся во все стороны со скоростью звука. Достигая области кольцевого вихря за выходным отверстием сопла, эти импульсы давления способствуют формированию новых вихревых структур и увеличению их запаса энергии. Если частота движения вихревых структур в сторону выхода и обратного движения импульсов давления в сторону выхода из сопла совпадает с частотой образования и отрыва новых вихревых структур от выхода из сопла, то получим механизм положительной обратной связи и автоколебательный процесс, а амплитуда колебаний давления вокруг струи увеличивается в несколько раз. На частоте обратной связи формируется дырочный тон, промежуточные вихревые структуры не получают дополнительной энергии по механизму обратной связи в струе, и амплитуда пульсаций давления в них невелика.

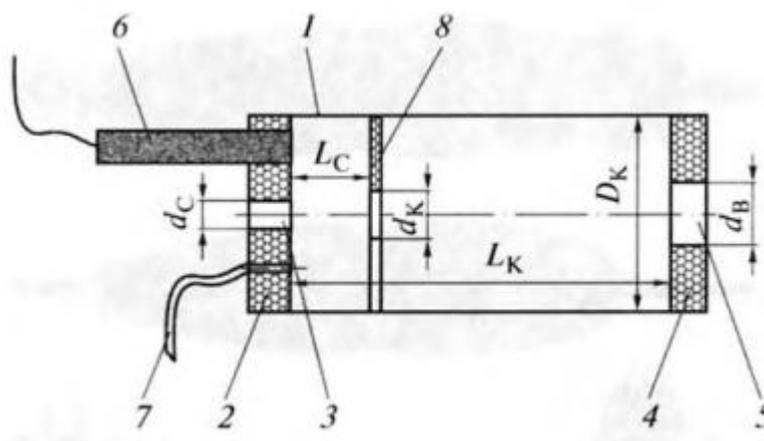
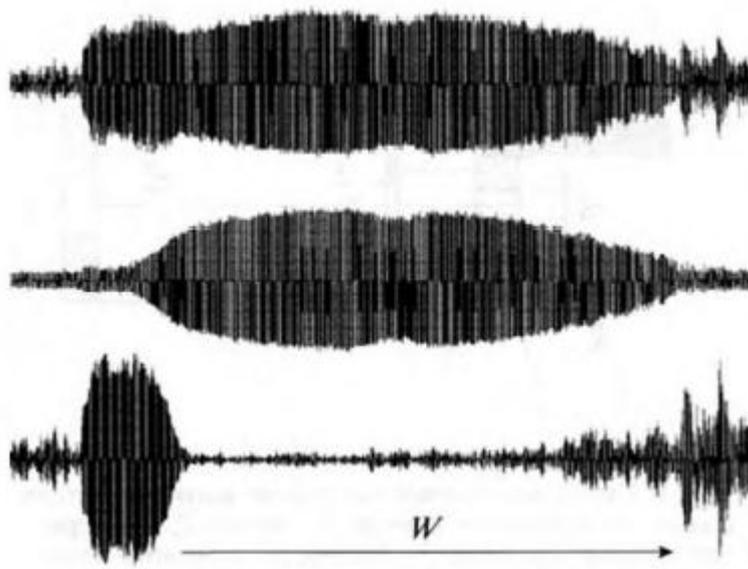


Схема скважинного акустического излучателя с кольцом(рис.2.3).

Схема излучателя с кольцом в длинной камере. 1 — труба; 2, 4 — передняя и задняя крышки; 3 - сопло; 5 - выходное отверстие; 6 -микрофон; 7 - штуцер; 8 — кольцо. D_k , d_c , d_k , и d_b — диаметры: камеры, сопла, кольца и выходного отверстия соответственно, L_c , L_k — длины струи и камеры соответственно [7,10].

При установке кольца на опоры в камере резонатора КПД камеры несколько увеличился за счет уменьшения полезного объема камеры. При этом деления всего объема на части в акустическом смысле не происходило: когда динамик прозванивал патронник кольцом через сопло, а кольцо перемещалось вдоль оси патронника, ЧСК всего объем не изменился. Модель устанавливалась в крышке пластиковой бочки объемом 0,230 м³ таким образом, чтобы входное отверстие (сопло) оставалось снаружи, а выпускная часть модели с выпускным отверстием располагалась внутри бочки. Воздух из ствола отсасывался вакуумным насосом. Объем ствола на три порядка превышал объем резонаторной камеры. При таком расположении резонаторная камера не была акустически связана с другими объемами, например, с входным и выходным шлангами.

Характерным примером чередования двух резонансов (на гельмгольцевой и полуволновой частотах) является изображение, представленное на рис. 2.4 (абсцисса - скорость струи, ордината - амплитуда пульсаций давления в резонаторе), где мода частоты Гельмгольца в окне самописца сменялась полуволновой модой первой гармоники с увеличением скорости струи, а затем снова сбрасывалась.

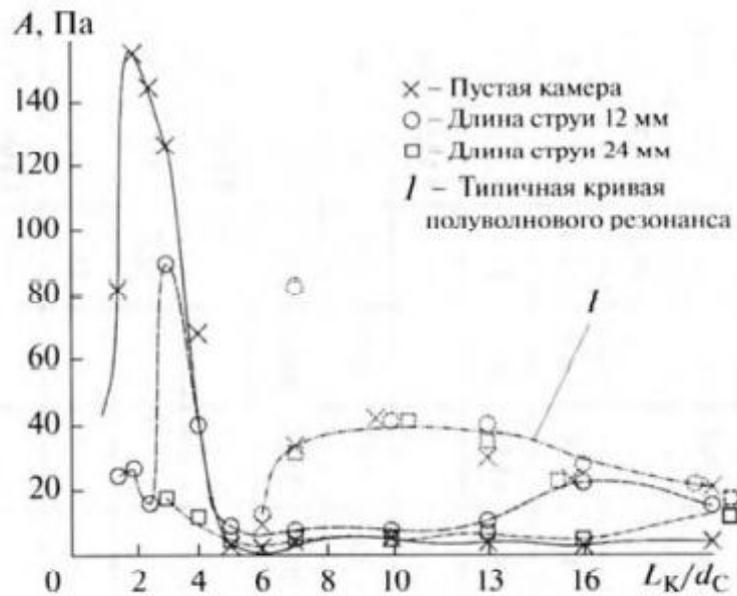


Изображение чередования резонансов на частоте Гельмгольца (нижняя кривая) и на полуволновой частоте (центральная кривая) при плавном увеличении скорости струи(рис.2.4)

Верхняя кривая — изображение записанного сигнала до применения полосового фильтра, средняя кривая — изображение первой полуволновой моды после НЧ-обрезания, нижняя кривая — мода на частоте Гельмгольца после отсечки высокочастотный волновой сигнал. Видно, что механизм полуволнового резонанса подавляет механизм резонанса Гельмгольца, хотя для этого имеется подходящее число Струхала. Также наблюдается, как при затухании полуволнового резонанса восстанавливается резонанс по механизму Гельмгольца.

В механизме усиления на частоте Гельмгольца высших гармоник не наблюдалось, что связано с механизмом объемного резонанса камеры - весь объем камеры не делится на части, все параметры состояния в камере изменяются одновременно. В коротких камерах ($Lk/dk < 0,5$) модальностей на частоте полуволновых гармоник не наблюдалось. Все моды возникали последовательно на частоте Гельмгольца с монотонным увеличением скорости струи.

В камерах большей длины ($Lk/dk > 1$) сначала появлялись моды Гельмгольца, затем при монотонном увеличении скорости струи наблюдались моды, как на частоте основной гармоники полуволнового резонанса, так и на частоте высших гармоник, и их моды могут чередоваться по-разному. При этом следует отметить, что при генерации струи одновременно отсутствуют несколько гармоник в одной моде. В окне анализатора спектра всегда присутствует только один пик - картина колебаний давления в точности повторяет форму синусоиды.

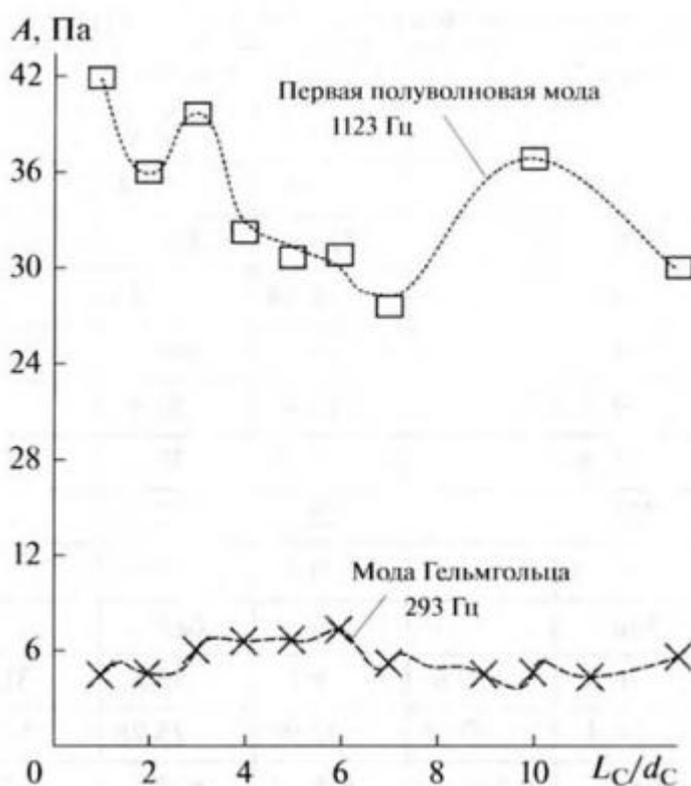


Проявление резонансов (рис.2.5)

Изображение кривых резонанса на частоте Гельмгольца при постоянной длине струи L_c и переменной длине камеры L_k/d_c .

На рис. 2.5 показана максимально достижимая амплитуда пульсаций давления в камере при определенных длинах камеры и струи независимо от скорости струи, что соответствует условию возникновения резонанса и режиму с наибольшей амплитудой. Сплошной линией показана зависимость наибольшей амплитуды колебаний давления в пустой камере от ее длины. Длина камеры в этом случае равна длине струи. Пунктиром показана зависимость наибольшей амплитуды пульсаций давления в камере с кольцевым пространством при постоянной длине струи $L_c/d_c = 1$ и при постепенном увеличении длины камеры. Трехточечная кривая показывает зависимость наибольшей амплитуды колебаний давления в камере с кольцом при длине струи $L_c/d_c = 2$ и при увеличении длины камеры. Такая же зависимость для камеры с кольцом при больших длинах струи не показана, чтобы не путать рисунок. Таких поворотов было бы еще меньше, так как организованная структура струи разрушается еще до того, как она достигнет острого края кольца или выхода.

Проанализировав рис 2.5, отметим возможность получения значительной амплитуды пульсаций давления по длине пустой камеры резонатора $L_k/D_k \sim 1,5...2$, однако незначительное изменение скорости струи существенно нарушает режим максимальной генерации. Очевидно, что рассогласование частот (частоты генерации первичных колебаний и собственной частоты объемного резонатора) становится непреодолимым. Установка кольца в короткой камере приводит к значительному снижению амплитуды генерации.



Амплитуда резонансов (рис.2.6)

Изображение амплитуд резонансов на частоте Гельмгольца и полуволнового при $L_k/D_k = 13$ в зависимости от длины струи L_c/d_c .

Рисунок 2.6 представляет зависимость наибольшей амплитуды пульсаций давления в резонаторной камере постоянной длины $L_k/D_k = 13$ при различной длине струи (кольцо перемешано). Применение такой

конфигурации камеры позволяет устойчиво работать на частоте гармоники основной полуволны и устанавливать перед ней кольцо на выходе приводит к некоторому увеличению амплитуды. Частота основной полуволны значительно выше, но амплитуда колебаний на резонансной частоте полуволны также значительно выше, чем на частоте Гельмгольца [7].

Струйный гидродинамический генератор с резонатором Гельмгольца

В настоящее время перспективным является научно-техническое направление, связанное с разработкой устройств, оказывающих мощное многофакторное воздействие на обрабатываемую среду, вводя в рабочую зону энергию высокой плотности [7,10]. Такие устройства позволяют интенсифицировать различные химико-технологические процессы, что приводит к увеличению производительности, снижению энергоемкости и материалоемкости, повышению качества продукции.

Широкое распространение получили гидродинамические радиантные системы с колеблющимися пластинчатыми, стержневыми и мембранными колебательными приборами, в результате принудительного прерывания струи жидкости (пульсации ротора).

Наиболее популярны гидродинамические пластинчатые радиаторы. Конструктивно они состоят из прямоугольного щелевого сопла и обращенной к потоку пластины, которая закреплена в узловых точках (рис. 2.7, а) или консольно (рис. 2.7, б). При обтекании пластины высокоскоростной струей жидкости в пластине возбуждаются изгибные колебания, наибольшая интенсивность которых достигается при совпадении характеристик частоты вибраций пластины с частотой воздействующей силы. Возбуждение с двух сторон пластины производится появлением импульсов давления, которые передаются со скоростью звука. Такие устройства генерируют колебания с частотами 2 – 35 кГц и эффективно работают при скорости истечения более 25 м/с.

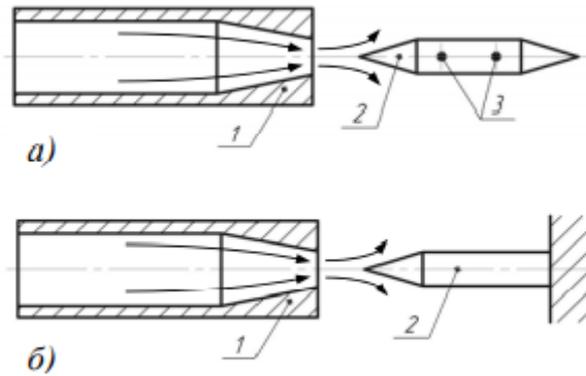


Рис.2.7. Принципиальная схема пластинчатых гидродинамических генераторов с креплением пластинки а – в узловых точках, б – консольно: 1 – сопло; 2 – пластина; 3 – точки крепления.

Основными недостатками пластинчатых гидродинамических излучателей являются быстрый выход из строя вибрирующих пластин и снижение эффективности из-за загрязнения щелевых насадок. В модифицированном пластинчатом излучателе щелевая насадка имеет кольцевую форму, образованную двумя коническими поверхностями, а колеблющаяся преграда представляет собой полый цилиндр, который разрезан по образующим так, что система пластин-дверей - до выступов, расположенных вокруг, образует круг.

Работа стержневых гидродинамических излучателей основана на пульсации кавитационной зоны, образующейся между соплом и преградой (отражателем). Пульсации возникают в резонансной колебательной системе, состоящей из стержней, расположенных вдоль образующих цилиндров с осью сопло-отражатель. Колебательная система выполнена либо в виде набора стержней, жестко закрепленных на ребрах (рис. 2.8), либо в виде цилиндра с фрезерованным по фазам образованием[16].

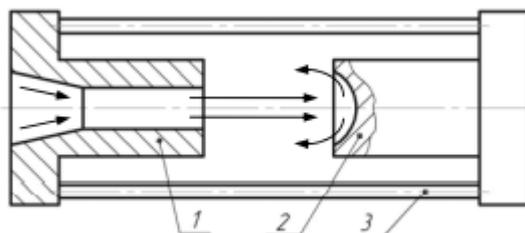


Рис.2.8. Принципиальная схема стержневого гидравлического генератора: 1 – сопло, 2 – отражатель, 3 – резонирующие стержни.

Отражающие поверхности препятствий могут быть выпуклыми, плоскими или вогнутыми. Для усиления генерируемых колебаний параметры. Выход струи и расстояние между соплом и преградой выбирают так, чтобы получить совпадение собственных частот колебаний стержней с одной из частот спектра пульсаций. К недостаткам стержневых гидродинамических излучателей можно отнести необходимость обеспечения высокого давления для обеспечения значительной величины диапазона переменного давления, в котором находится колебательная система.

Конструктивно мембранные радиаторы состоят из круглого сопла и пережатой по контуру мембраны (рис. 2.9). Их функционирование построено на использовании отклонения давления в области сопло-мембраны вследствие движения струи. В этом случае в струе излучаются низкочастотные колебания с основным тоном, который соответствует собственной частоте изгибных вибраций мембраны.

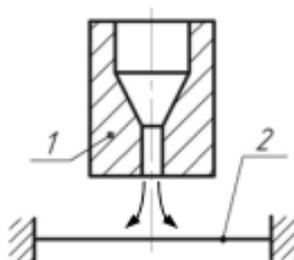


Рис.2.10. Принципиальная схема мембранного гидравлического генератора: 1 – сопло, 2 – мембрана.

Основными рабочими органами гидродинамических вращающихся излучателей пульсаций являются соосно расположенные цилиндры - статор и ротор, боковые поверхности которых снабжены системой канавок или отверстий (рис. 2.11). Принцип действия вращающихся струй сводится к периодическому прерыванию струи жидкости, в результате чего в жидкости возникают импульсы давления и разбавления, возникают кавитация, мелкомасштабные пульсации, гидроудары и развитая турбулентность. Конструктивно и в эксплуатации они намного сложнее пластинчатых и стержневых гидрогенераторов, но производительность их выше.

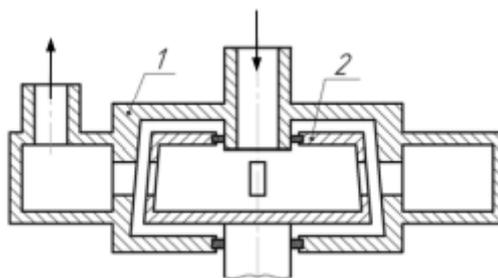


Рис.2.12. Принципиальная схема роторного гидравлического генератора: 1 – статор, 2 – ротор.

Общий конструктивный недостаток роторно-пульсационных устройств обусловлен плотной посадкой ротора на вращающемся валу. Это требует динамической балансировки роторов, поэтому данные устройства имеют ограниченную скорость (из-за высоких значений моментов инерции роторов).

Разновидностью пульсирующих гидродинамических излучателей являются гидровибратор золотникового типа и шибберный вибратор, в которых поток рабочей жидкости перекрывается золотником (или концевой задвижкой). Недостатком этих устройств является невозможность изменения частоты генерируемых импульсов без изменения их ударных характеристик, так как площадь поперечного сечения калибровочного канала остается неизменной.

Этого недостатка лишена конструкция гидроимпульсного генератора упругих волн, частота и амплитуда выдаваемых импульсов давления в котором регулируются изменением проходного сечения выпускных каналов сменой форсунок и изменением расхода закачиваемая жидкость.

Следующую группу гидрогенераторов составляют генераторы пружинно-клапанного (рис. 2.13) и ударно-клапанного типа. К недостаткам этих устройств можно отнести жесткое регулирование узкого диапазона расхода и недостаточную эксплуатационную надежность, что связано с необходимостью точного согласования жесткости пружины и массы клапана. Небольшие изменения напорно-расходных характеристик подачи рабочего тела приводят к прерыванию генерации.

Клапанные демпферы, хотя и генерируют колебания с достаточно большой амплитудой давления, имеют очень малую работоспособность и выходят из строя из-за развития ударных напряжений в узлах клапана.

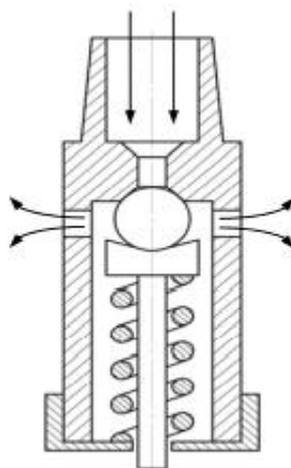


Рис.2.13. Принципиальная схема пружинно-клапанного гидравлического генератора.

К генераторам на основе вихревых элементов относятся гидравлические преобразователи типа «свисток», излучающие колебания малой амплитуды при малом среднеквадратичном давлении. Недостатками

этого типа передатчиков являются низкая надежность, неустойчивость автоколебательного режима и узкий стоимостной диапазон работы.

Конструкция генератора на основе центробежно-вихревого распылителя (рис. 2.14) позволяет излучать колебания любой требуемой амплитудно-частотной характеристики, а энергетическая эффективность устройства ограничивается в основном мощностью напорной магистрали. Эти устройства работают по принципу образования вихря при вращательном движении жидкости в цилиндре, куда она вводится по касательной.

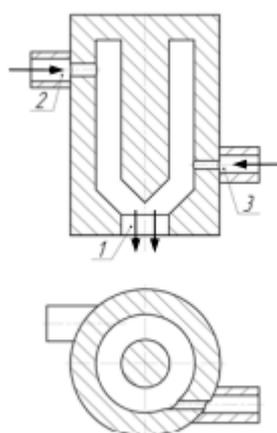


Рис.2.14. Принципиальная схема гидравлического генератора на основе центробежной форсунки: 1 – сопло, 2 – больше расходный канал, 3 – мало-расходный канал.

Как прямоточные, так и противоточные устройства можно отнести к осесимметричным гидродинамическим излучателям с пульсирующей кавитационной областью. Их несомненными преимуществами являются простота использования, отсутствие вибрирующих элементов конструкции (что обуславливает длительный срок службы) и высокая мощность. Источником мощных акустических волн в диапазоне низких звуковых частот является жидкоструйный излучатель со ступенчатым препятствием и круглым щелевым соплом в виде соосных дисков. Его работа основана на

автоколебаниях затопленной упругой осесимметричной струйной кольцевой мембраны.

Несомненно, каждая из перечисленных лучистых систем имеет определенные достоинства и недостатки и может быть использована с разным эффектом при решении определенных конкретных задач. Современный интерес к гидродинамическим преобразователям объясняется дешевизной получаемой акустической энергии, простотой конструкции, надежностью и стабильностью работы, и высокими эксплуатационными характеристиками.

Акустические специальные средства, применяемые в МВД.

Примером воздействия является акустическая система высокой мощности РУПОР 30х2А «Чебурашка» предназначена для пресечения массовых беспорядков и протестных акций с помощью оглушающего звука. Ширина диаграммы направленности звуковых колебаний на частоте 2 кГц – 22 градуса; максимальное звуковое давление на расстоянии 1 м – 145 дБ; эффективная дистанция применения – 50-70 м; вес акустического излучателя – 12 кг; вес поворотного устройства – 20 кг; напряжение питания – 220 или 12 (24) В (через преобразователь напряжения); потребляемая мощность – 600 Вт.

Для воздействия на правонарушителей используются мощные акустические сигналы. Использование всех параметров установки вызывает паралич центральной нервной системы на срок около 3 минут и более. При этом серьезных последствий для организма не наступает.

3. Экспериментальные исследования

3.1. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка, показанная на рисунке 3.1, была использована для исследования струйного излучателя на основе резонатора Гельмгольца, основанного на резонансных частотах его собственных колебаний.

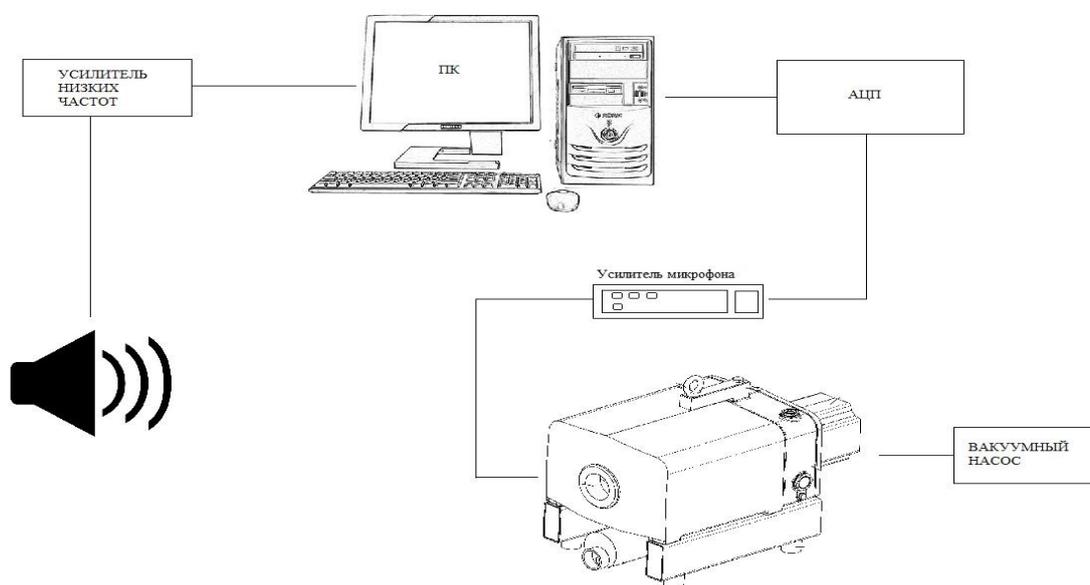


Рис.3.1. Схема экспериментальной установки

Резонатор Гельмгольца представлял собой камеру закрытую с двух сторон крышками, нижняя выходная, верхняя входная. По центру сделаны 2 отверстия в верхнем сопле, где на выходе создается разность давления и тем самым скорость потока струи зависит от перепада давления. Дополнительно, над верхней крышкой был установлен микрофон на расстоянии 15 см, для записи сигнала, поступающего в резонатор (рис. 3.3). Также в передней крышке (рис 3.2) находился ещё пьезометрический датчик, вклеенный внутри, на крышку с отверстием для подачи низких сигналов, которые с него

подавались на микрофонный усилитель, а затем на АЦП и в компьютер. Чтобы измерить перепад давления на штуцер надевался силиконовый шланг, соединенный с датчиком давления. Он служит для того, чтобы выдавать аналоговый сигнал $\approx 4700 \text{ семпл}$, который записывался на ПК через АЦП. Это позволяло нам через увеличение разности давления определить скорость струи в нашей камере. На передней крышке присутствуют два провода. Один провод подключается к пьезометрическому датчику. От него провод шёл к микрофонному усилителю (микшер) и далее на АЦП. Этот сигнал мы и обрабатывали в эксперименте. А второй провод следовал к электронному миниатюрному микрофону. Где звуковой сигнал приходил на звуковую карту ПК и регистрировался в программе PowerGraph.



Рис.3.2. Передняя крышка

Нижняя крышка камеры плотно крепилась на крышку бочки. Также сбоку на бочке присутствовал штуцер соединенный с вакуумным насосом, для создания скоростной струи воздуха. Вакуумным насосом, который подключен лабораторный автотрансформатор регулируемый (ЛАТР), изменяется давление внутри полости камеры резонатора Гельмгольца путем

изменения напряжения на ЛАТРе. Когда мы подавали давление изменялась скорость струи, из обзора литературы [2,4] можем наблюдать как создавались вихри, они вращаются вокруг струи, увеличивая кинетическую энергию. Вихрь сталкиваясь с крышкой камеры создавал цикл самовозбуждения, от того что мы изменяли обороты давления, увеличивалась скорость и росла частота вихрей, тем самым мы получали срыв вихрей, что являлось созданию моды.

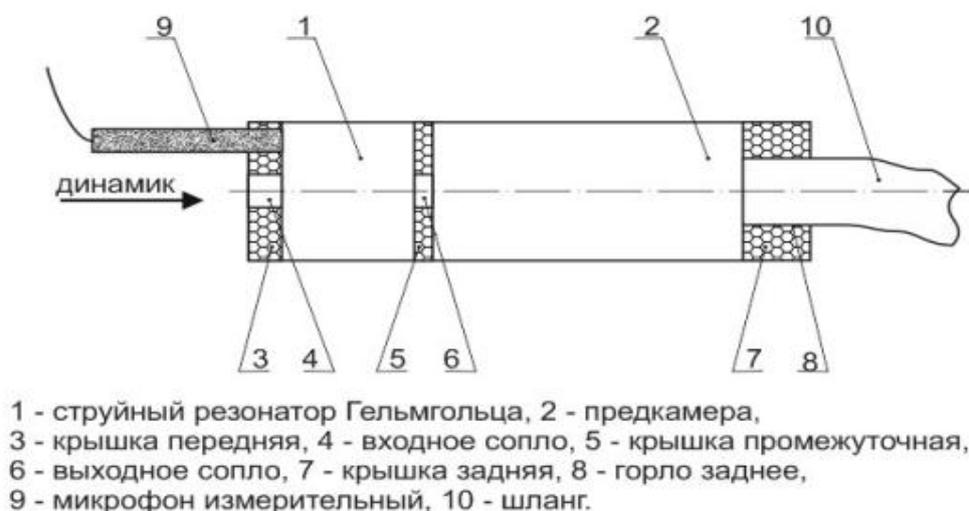


Рис.3.3. Изображение струйного резонатора Гельмгольца

3.2. Методика эксперимента

Эксперимент проводился в программе Cool Edit Pro 2.1, которая работает со звуком представленным в цифровой форме. С помощью Cool Edit Pro 2.1 было сгенерировано спектральное представление сигнала по разным частотам. После произведенных манипуляций были получены результаты амплитуд с внешнего микрофона делились на значения амплитуд с внутреннего микрофона. В последствие мы получали данные, которые рассчитывали в программе Excel и строили графики зависимости амплитуды колебания от скорости, частота от скорости, число Струхала от Рейнольдса.

Табл. 3.2. Исходные параметры.

<i>Параметры</i>	<i>Значение</i>
<i>Толщина передней крышки</i>	<i>10 мм</i>
<i>Диаметр входного сопла, D1</i>	<i>10мм</i>
<i>Диаметр выходного сопла, D2</i>	<i>12мм</i>
<i>Толщина передней крышки</i>	<i>84мм</i>
<i>Толщина задней</i>	<i>11,3мм</i>

Экспериментальные формы камер, которые были использованы для исследования представлены на (рис 3.2.1.)



Рис.3.2.1. Виды камер

Расчет квадратных камер.

В данной части эксперимента были проведены опыты с камерами, которые представляли форму квадрата с разными радиусами $R=0$, $R=3.6$, $R=7.3$, $R=10.9$. Были построены графики зависимости амплитуды колебания, где амплитуда колебания на одном из участков достигала $\max 350$ Па и разброс точек до $\approx 10\%$. Также были построены графики зависимости частоты генерируемых колебаний от скорости струи.

Табл.3.2.1. Исходные данные

№ камеры	R	S	a	a-2R
1	0	1493	38,64	38,64
2	3,6	1493	38,78	31,58
3	7,3	1493	39,23	24,64
4	10,9	1493	39,94	18,14

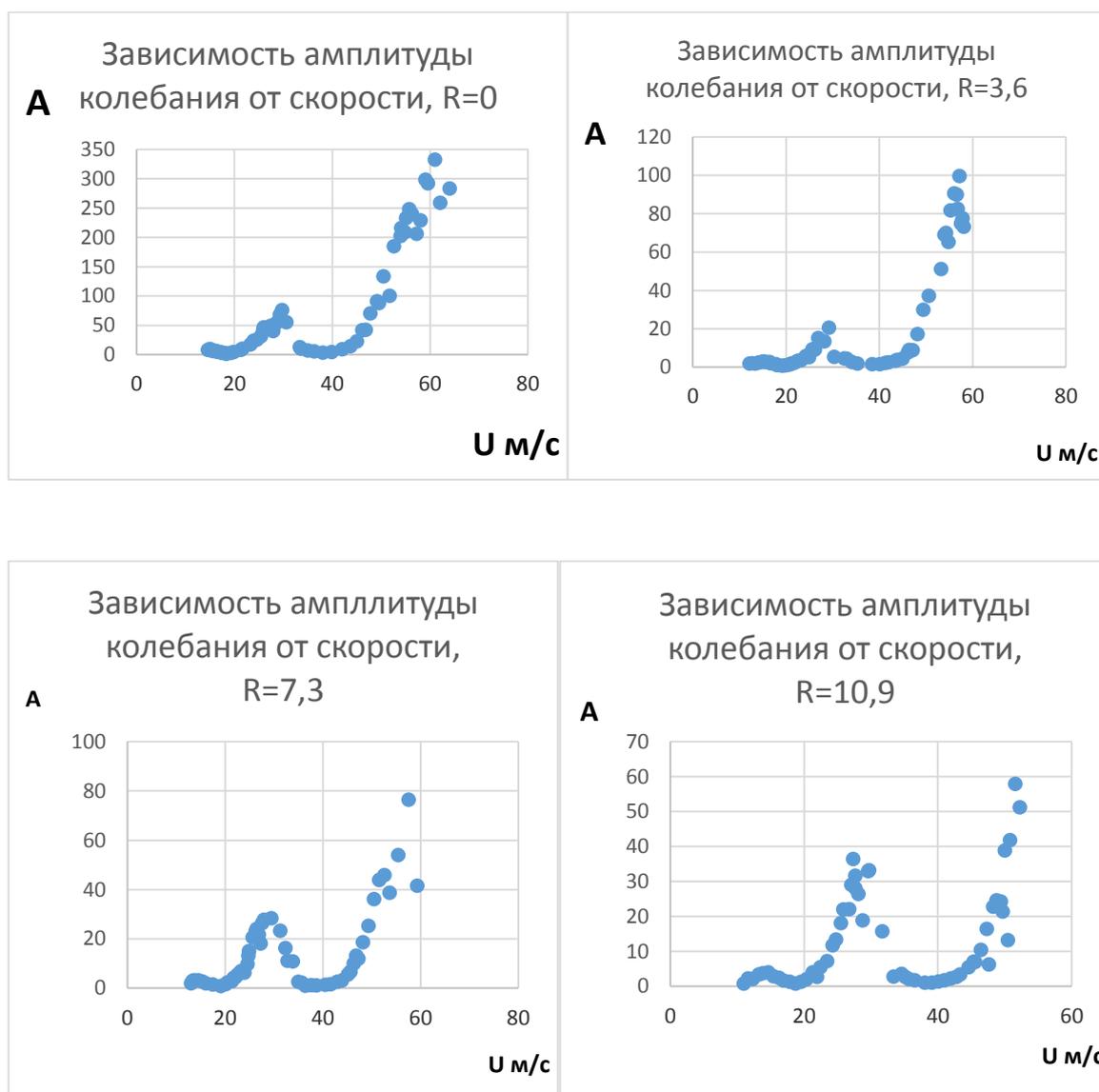


Рис. 3.2.2. Зависимость амплитуды колебания от скорости

Видим на графиках, что на 3 моде происходил срыв вихрей, поэтому было решено взять значения из 2 моды:

1. Для камеры с радиусом $R=0$, вторая мода составляет при скорости 30 м/с амплитуду колебания ≈ 75 Па.
2. Для камеры с радиусом $R=3.6$, вторая мода составляет при скорости 28 м/с амплитуду колебания ≈ 25 Па.
3. Для камеры с радиусом $R=7.3$, вторая мода составляет при скорости 29 м/с амплитуду колебания ≈ 30 Па.
4. Для камеры с радиусом $R=10.9$, вторая мода составляет при скорости 27 м/с амплитуду колебания ≈ 36 Па.

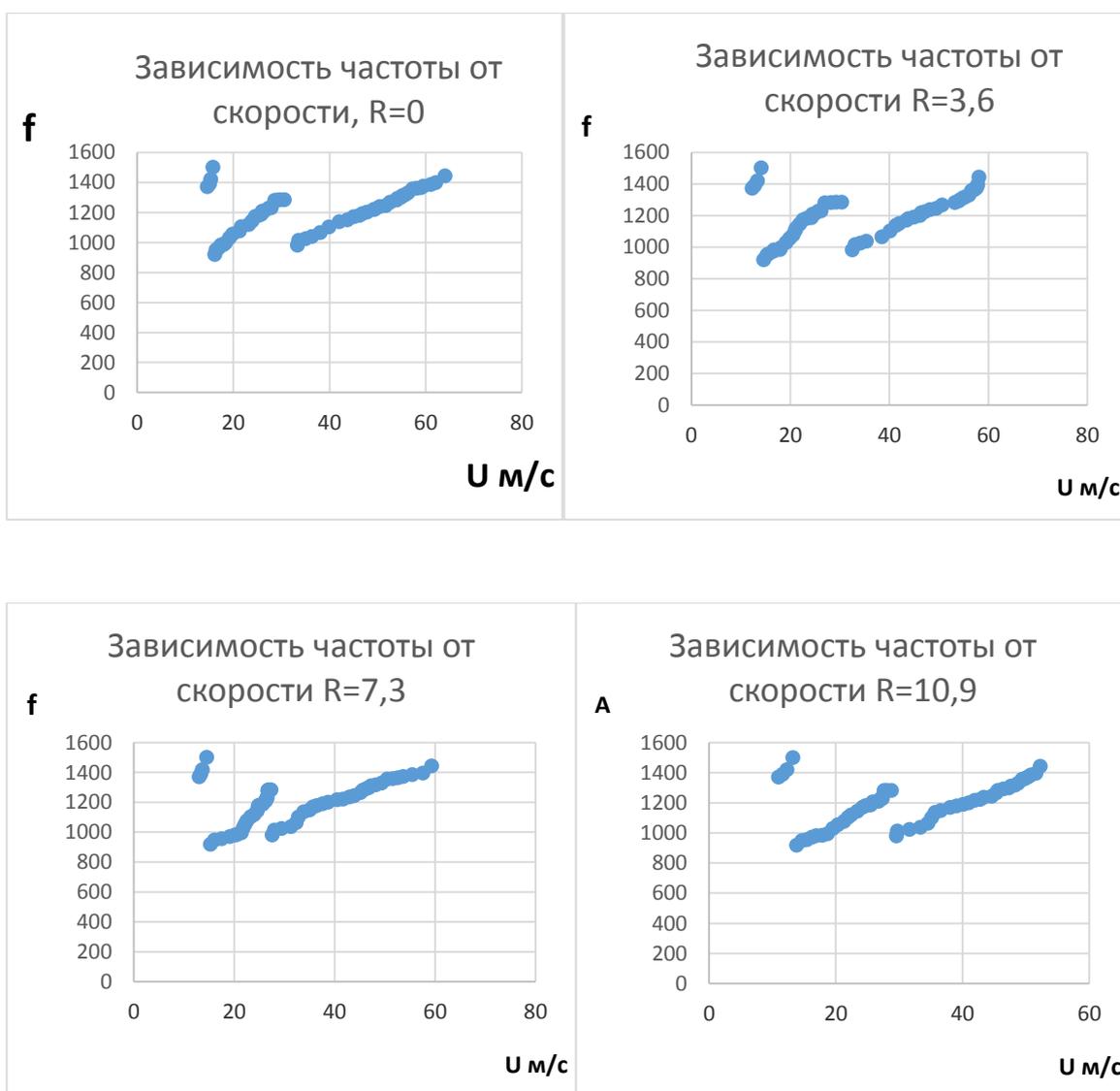


Рис. 3.2.3. Зависимость частоты от скорости.

Расчет камер

Далее мы рассмотрим экспериментальные опыты с камерами у которых $R=14,5$, $R=18,2$, $R=21,8$

Табл. 3.2.2. Исходные данные

№ камеры	R	S	a	a-2R
5	14,5	1493	40,91	11,91
6	18,2	1493	42,16	5,76
7	21,8	1493	43,6	0

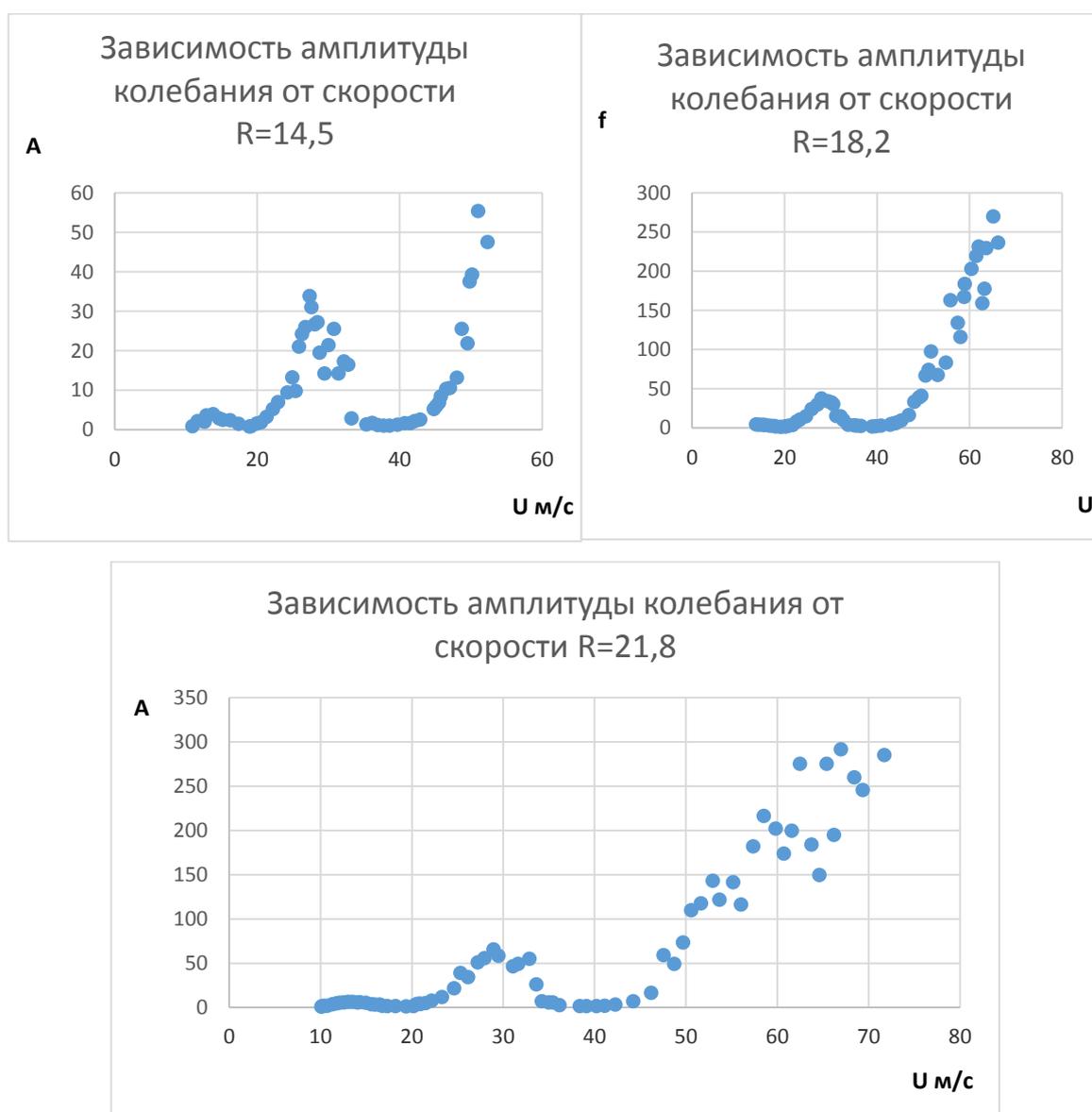


Рис.3.2.4. Зависимость амплитуды колебания от скорости

Также сделаем анализ следующих графиков по 2 моде:

1. Для камеры с радиусом $R=14.5$, вторая мода составляет при скорости 28 м/с амплитуду колебания ≈ 27 Па.
2. Для камеры с радиусом $R=18.2$, вторая мода составляет при скорости 29 м/с амплитуду колебания ≈ 34 Па.
3. Для камеры с радиусом $R=21.8$, вторая мода составляет при скорости 29 м/с амплитуду колебания ≈ 58 Па.

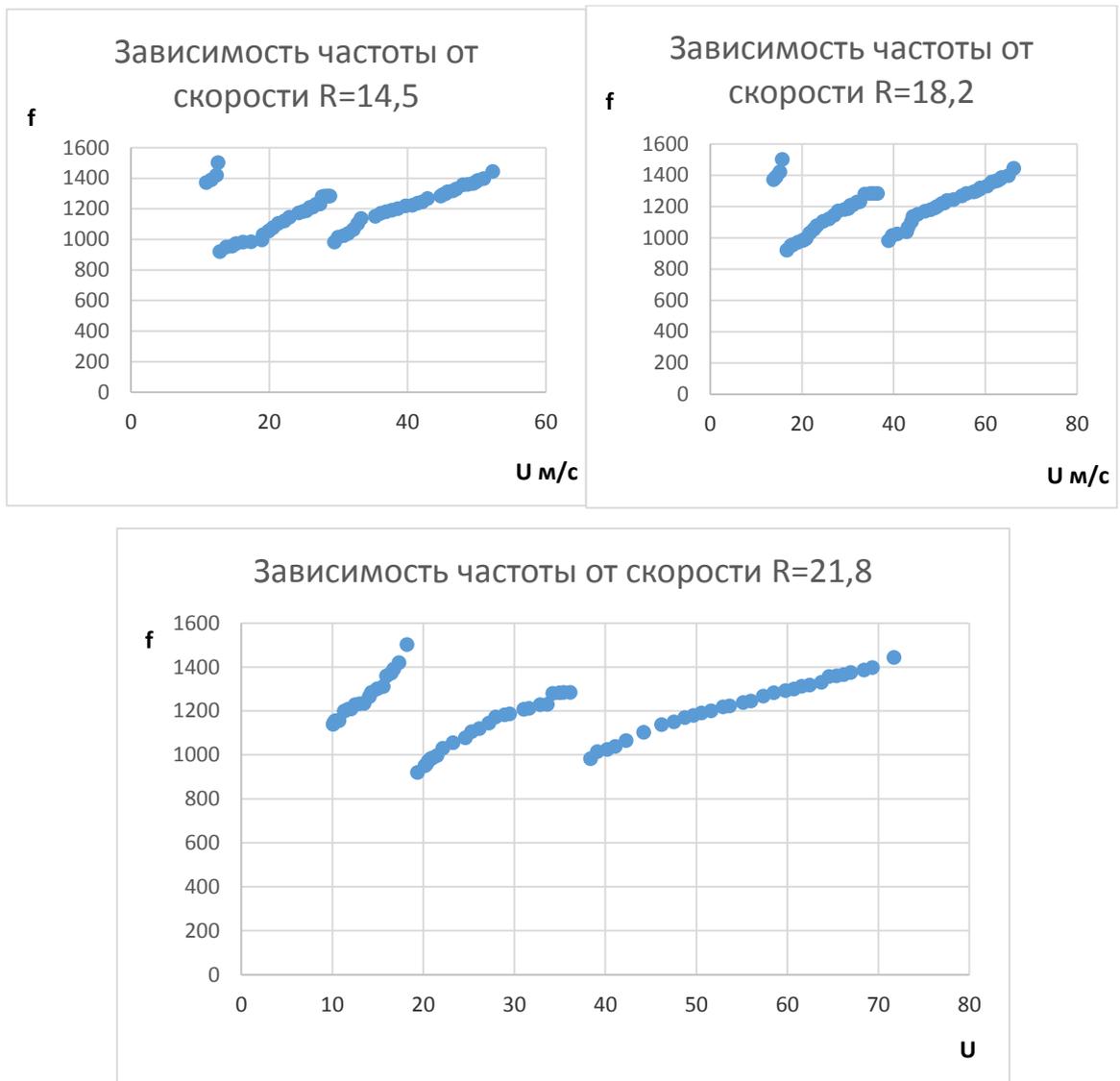


Рис.3.2.5. Зависимость частоты от скорости.

Исследование зависимости числа Струхала от Рейнольдса.

Во второй части эксперимента были исследованы камеры расположенные в зависимости Струхала и Рейнольдса. Где рассматривались

моды в каждой камере и получали линии тренда с помощью программы Excel. Попытались представить их коэффициенты в виде графика.

Формула Струхаля:

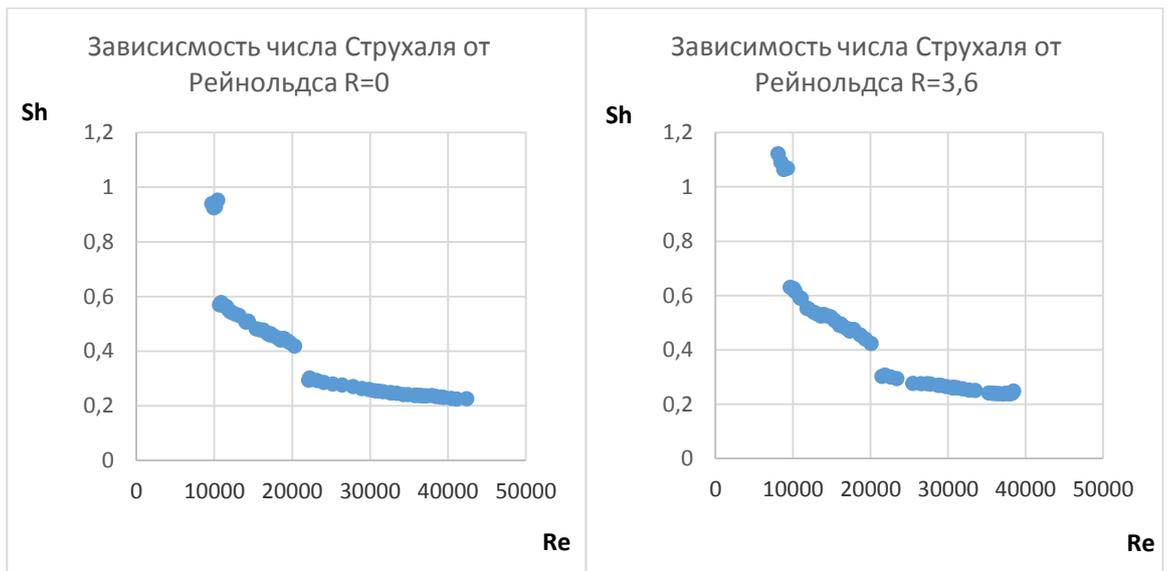
$$Sh = \frac{fL}{V} \quad (3.2)$$

где f — характерная частота процесса (например, частота образования вихрей), L — характерный линейный размер течения (например, гидравлический диаметр), V — характерная скорость потока.

Формула Рейнольдса:

$$Re = \frac{Ud}{\mu} \quad (3.2.1)$$

где U -скорость потока, d - диаметр трубы, μ - коэффициент абсолютной вязкости.



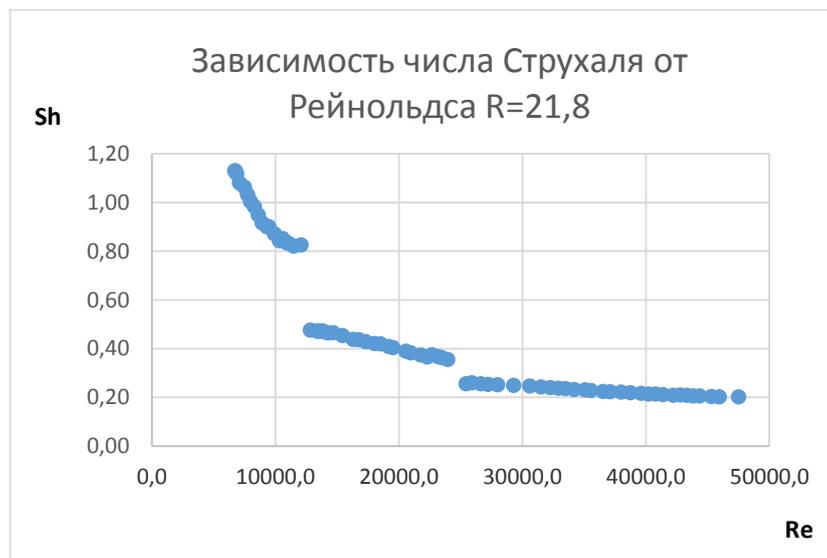
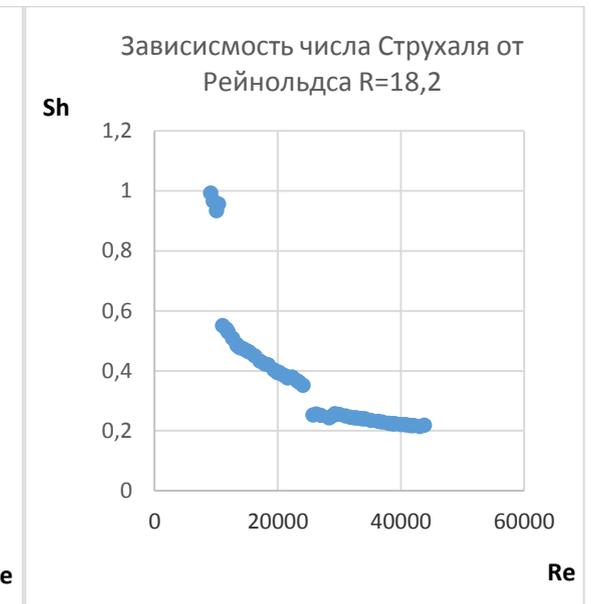
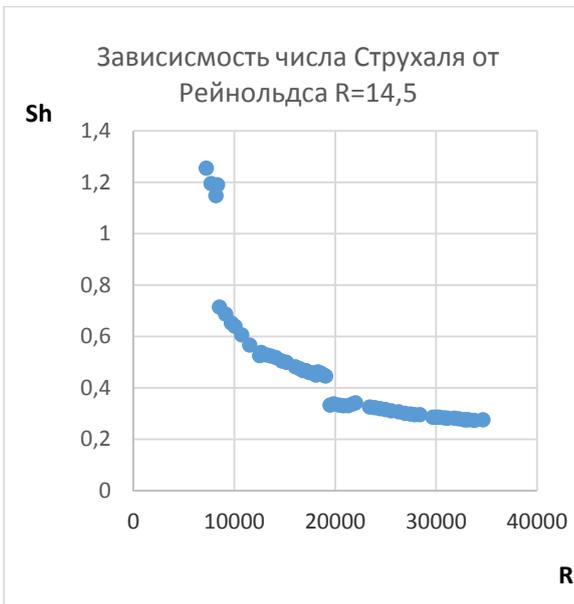
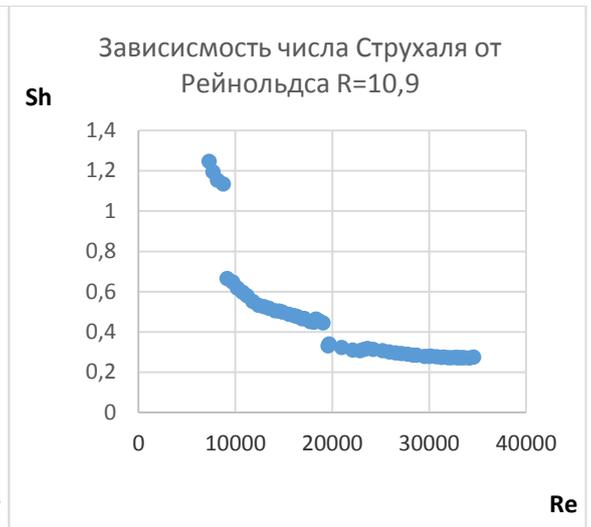
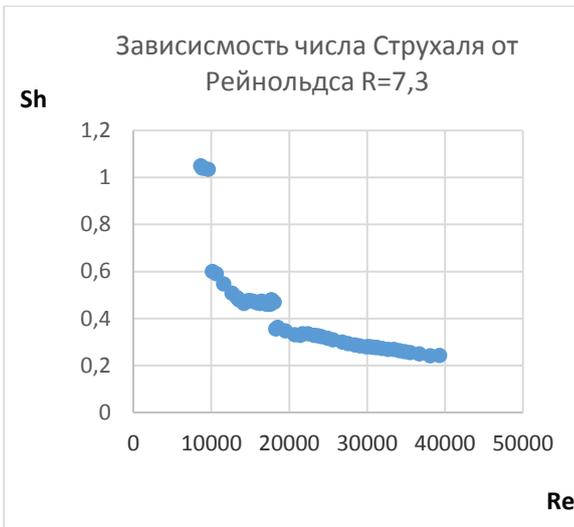
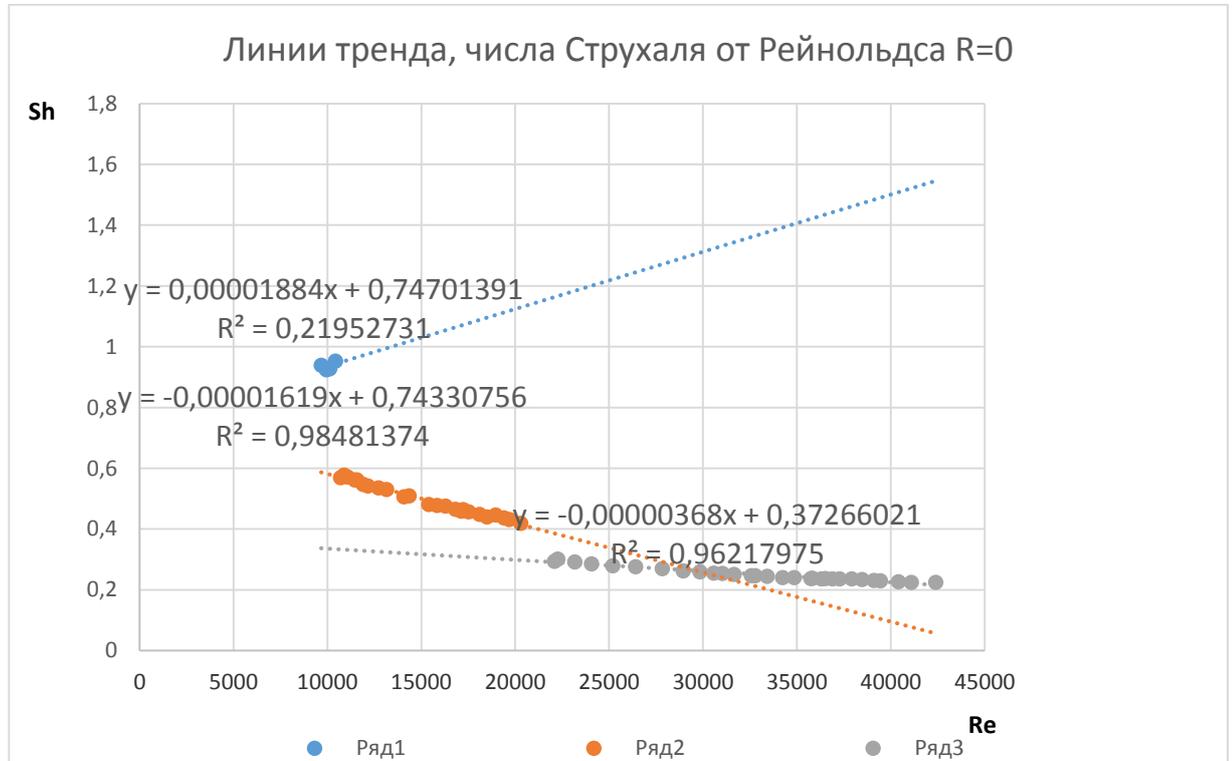


Рис. 3.2.6. Графики зависимости Струхаля от Рейнольдса

Далее рассмотрим, как для каждой моды и каждой камеры получить уравнения линий тренда, представив их коэффициенты в виде графиков.

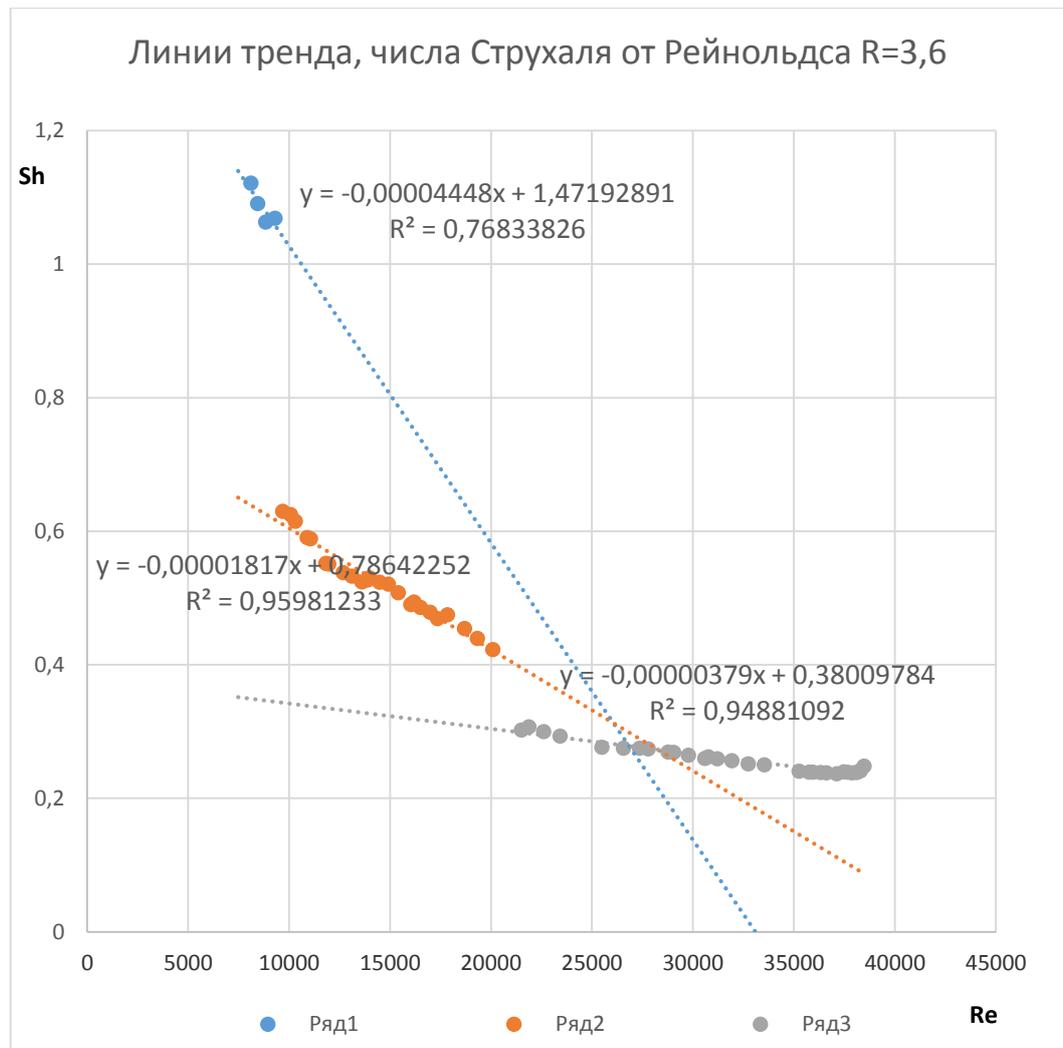


3.2.7. Линии тренда, числа Струхаля от Рейнольдса, R=0

Мода 3: $Sh = 0,7470 - 1,88 * 10^{-5} * Re$

Мода 2: $Sh = 0,7433 - 1,619 * 10^{-5} * Re$

Мода 1: $Sh = 0,3726 - 3,68 * 10^{-6} * Re$

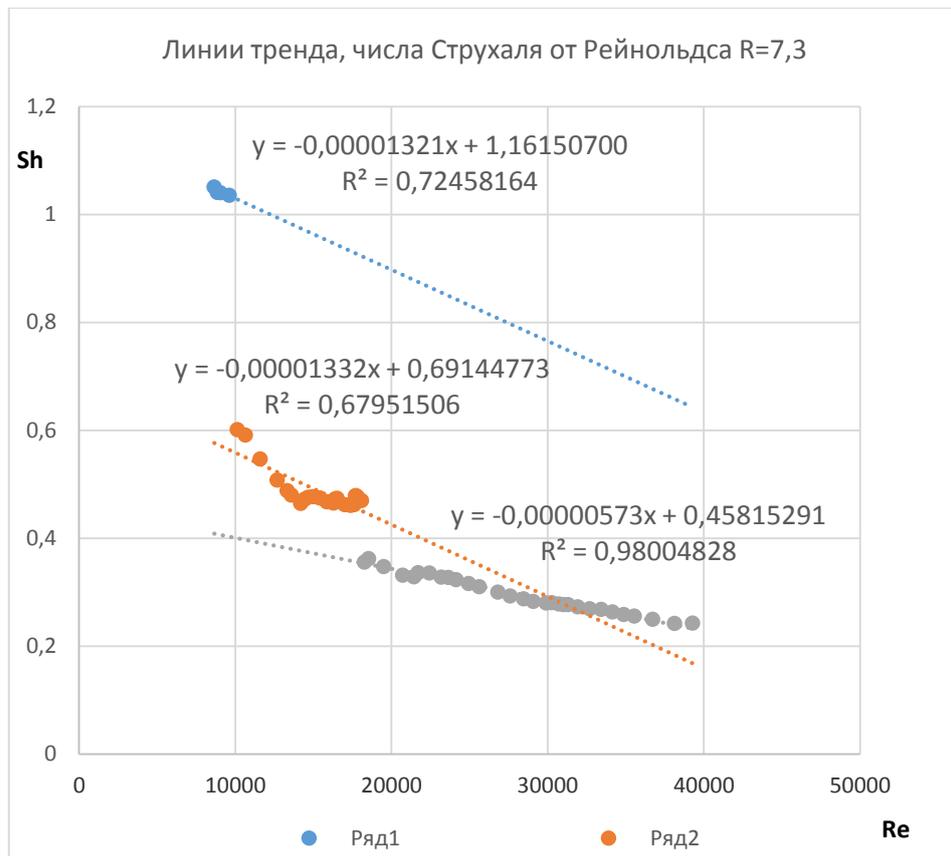


3.2.8. Линии тренда, числа Струхаля от Рейнольдса, R=3,6

Мода 3: $Sh = 1,4791 - 4,44 * 10^{-5} * Re$

Мода 2: $Sh = 0,7864 - 1,815 * 10^{-5} * Re$

Мода 1: $Sh = 0,3800 - 3,79 * 10^{-6} * Re$

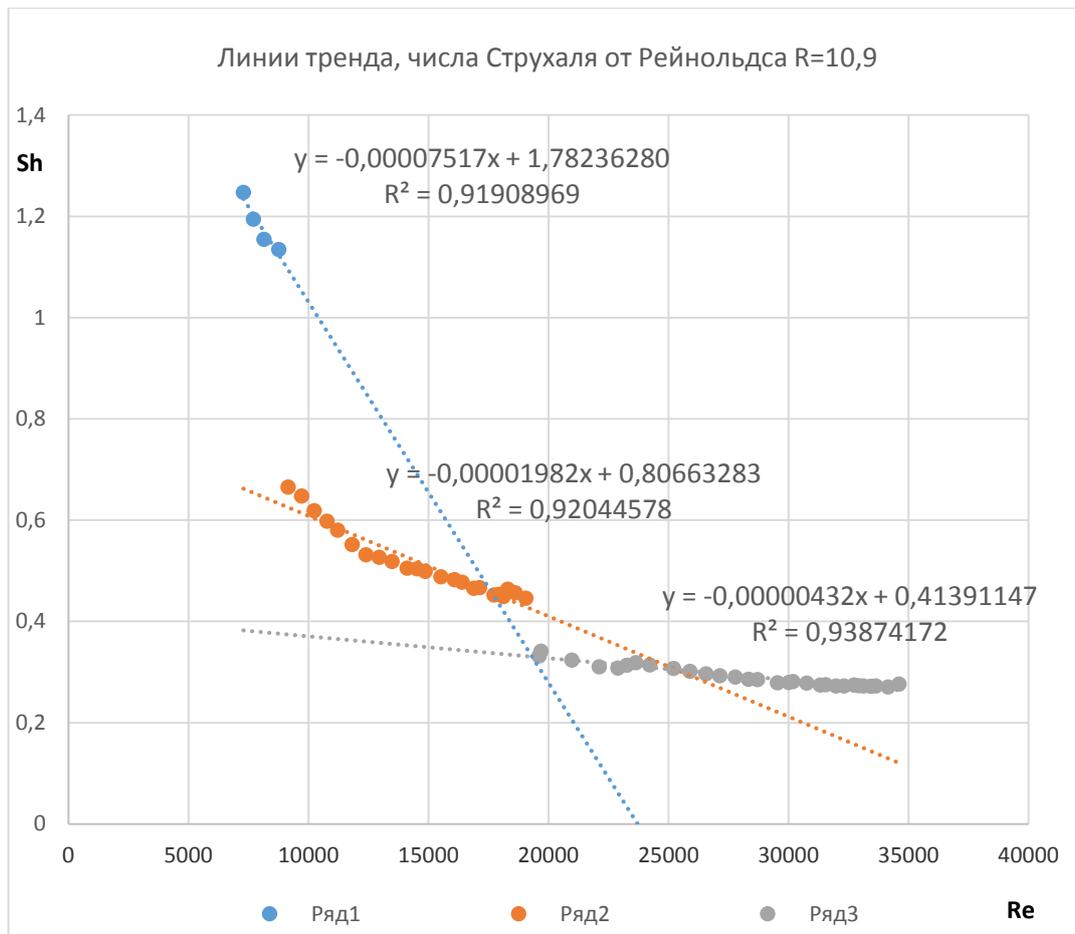


3.2.9. Линии тренда, числа Струхалия от Рейнольдса, R=7,3

Мода 3: $Sh = 1,1615 - 1,32 * 10^{-5} * Re$

Мода 2: $Sh = 0,6914 - 1,332 * 10^{-5} * Re$

Мода 1: $Sh = 0,4581 - 5,73 * 10^{-6} * Re$

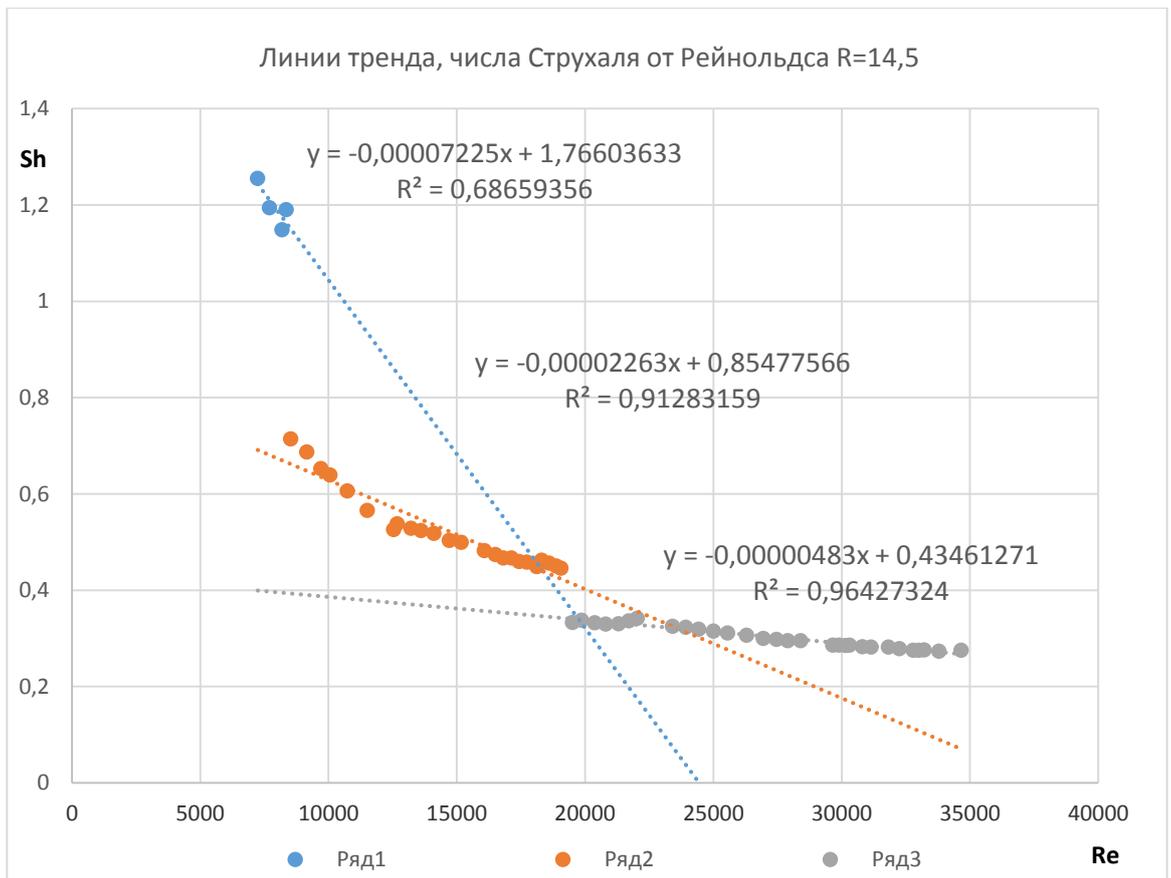


3.2.9. Линии тренда, числа Струхалия от Рейнольдса, R=10,9

Мода 3: $Sh = 1,7823 - 7,51 * 10^{-5} * Re$

Мода 2: $Sh = 0,8066 - 1,98 * 10^{-5} * Re$

Мода 1: $Sh = 0,4139 - 4,32 * 10^{-6} * Re$

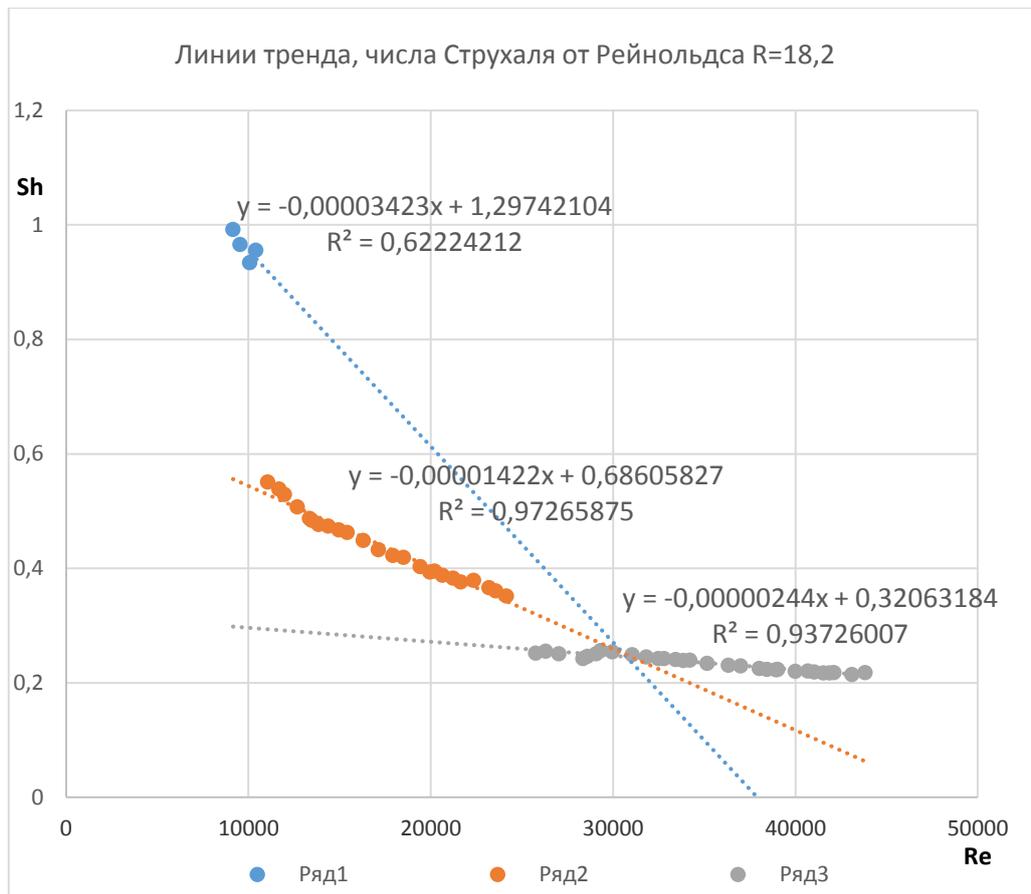


3.2.10. Линии тренда, числа Струхалия от Рейнольдса, R=14,5

Мода 3: $Sh = 1,7660 - 7,22 * 10^{-5} * Re$

Мода 2: $Sh = 0,8547 - 2,26 * 10^{-5} * Re$

Мода 1: $Sh = 0,4346 - 4,83 * 10^{-6} * Re$

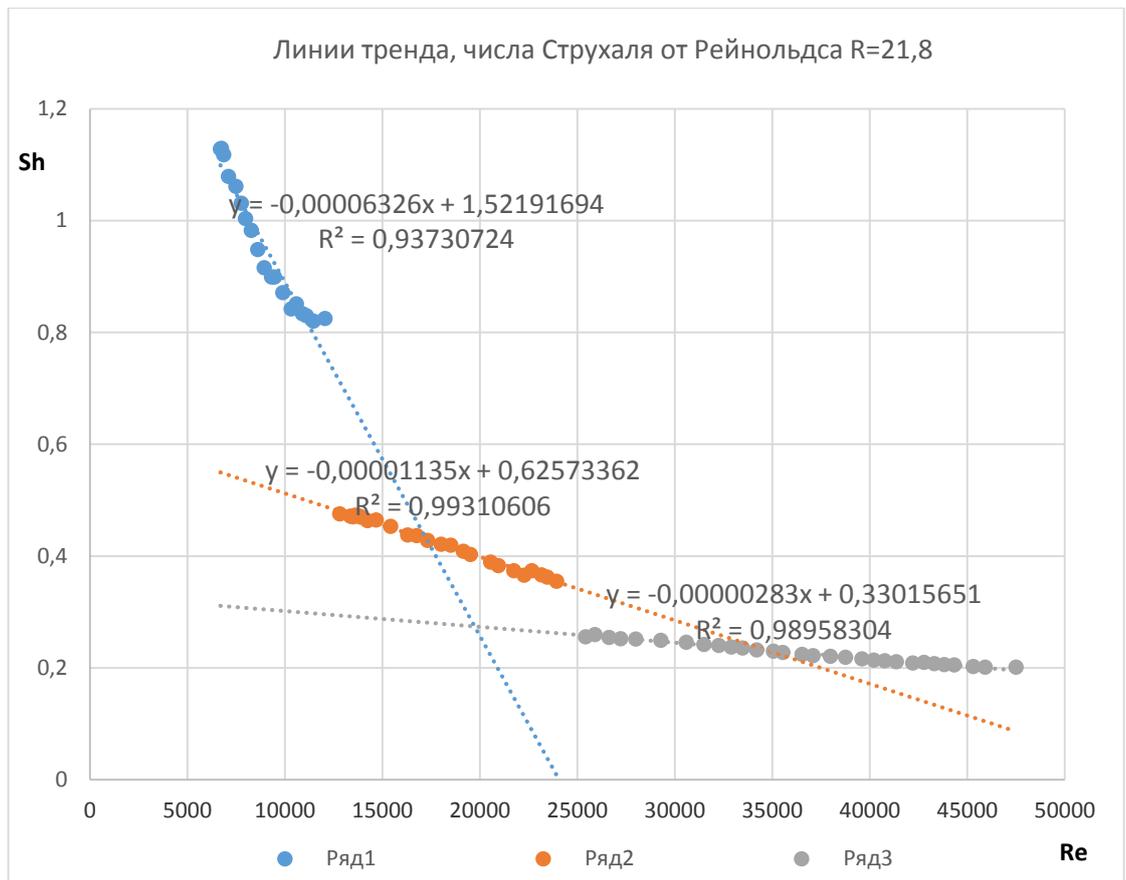


3.2.11. Линии тренда, числа Струхаля от Рейнольдса, R=18,2

Мода 3: $Sh = 1,2974 - 3,42 * 10^{-5} * Re$

Мода 2: $Sh = 0,6860 - 1,42 * 10^{-5} * Re$

Мода 1: $Sh = 0,3206 - 2,44 * 10^{-6} * Re$



Мода 3: $Sh = 1,5219 - 6,32 * 10^{-5} * Re$

Мода 2: $Sh = 0,6257 - 1,13 * 10^{-5} * Re$

Мода 1: $Sh = 0,3301 - 2,83 * 10^{-6} * Re$

Заключение

В результате обзора научной литературы и проведенного расчетно-экспериментального исследования струйного осциллятора Гельмгольца получены следующие результаты:

- струйный осциллятор Гельмгольца представляет собой устройство, способное генерировать высокоинтенсивные низкочастотные колебания и имеющее потенциал для его практического использования;
- спроектирована и собрана лабораторная установка для экспериментальных исследований;
- расчеты проведены в программе Excel для обработки экспериментально полученных звуковых сигналов;
- установлены зависимости амплитуды колебания от скорости струи. Полученные зависимости имеют вид схожий с зависимостями, опубликованными в других работах при чем наблюдается закономерность изменения максимальной амплитуды от формы резонансной камеры;
- полученные зависимости частоты генерируемых колебаний от скорости струи. Наблюдалась генерация колебаний в трех модах, переход от одной моды к соседней моде сопровождался скачком по чистоте. Чистоты на каждой моде увеличиваются с повышением скорости струи;
- Обнаружено влияние формы камеры на момент начала каждой моды и её продолжительности;
- Установлены зависимости числа Струхала характеризуемого наблюдаемый колебательный процесс от числа Рейнольдса для каждого варианта камеры и каждой моды. Данные зависимости аппроксимируются линейной функцией установленной зависимостью коэффициентов этих функций для каждой формы камеры. Полученные результаты могут быть использованы при разработке излучателя

колебаний для интенсификации различных процессов. Например, в нефтедобыче. Также хочется добавить, что для МВД России такая установка может быть полезна в выборе более эффективной формы камеры, которая в свою очередь будет направлена на подавление и разгон несанкционированных протестных акций, митингов и шествий.

Список литературы

1. Powell A. On the Edgetone // J. Acoust. Soc. Am. – 1961 – V. 33. – P. 395–409. DOI: 10.1121/1.1908677/
2. Morel Th. Experimental Study of a Jet-Driven Helmholtz Oscillator // J. Fluids Eng. – 1979. – V. 101 (3). – P. 383-390. DOI: 10.1115/1.3448983.
3. Li D., Kang Y., Ding X., Wang, X., Fang Z. Effects of area discontinuity at nozzle inlet on the characteristics of high speed self-excited oscillation pulsed waterjets // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2016. – V. 79. – P. 254-265. DOI:10.1016/j.expthermflusci.2016.07.013
4. Powell A. Vortex Action in Edgetones // J. Acoust. Soc. Am. – 1962. – V. 34. № 2. – P. 163–165. DOI: 10.1121/1.1909164.
5. Zhenlong Fang, Fandong Zeng, Ting Xiong, Wei Wei, Pan Jiang, Qiang Wu, Yuanshun Wang, Yuxuan Fei. Large eddy simulation of self-excited oscillation inside Helmholtz oscillator // Int. J. Multiph. Flow. – 2020. – V. 126. – 103253. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103253
6. Абдрашитов А.А., Марфин Е.А., Чачков Д.В. Экспериментальное изучение скважинного акустического излучателя с кольцом в длинной цилиндрической камере // Акустический журнал. – 2018. – Т 64. – № 2. С. 241-249. DOI: 10.7868/S0320791918020016
7. Абдрашитов А.А., Марфин Е.А., Чачков Д.В., Чефанов В.М. Влияния формы сопла на амплитуду генерации в скважинном акустическом излучателе // Акустический журнал. – 2018. – Т. 64 – № 4. – С. 488–498. DOI: 10.1134/S0320791918030012.
8. Абдрашитов А.А., Марфин Е.А. Влияние длины сопла на работу струйного осциллятора Гельмгольца // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2021. – № 1. – С. 142–150. DOI: 10.31857/S0568528121010011
9. Абдрашитов А.А., Марфин Е.А., Плахова Е.А. Особенности генерации звука струйным осциллятором Гельмгольца // VIII Всероссийская

научно-практическая конференция с международным участием «Защита от повышенного шума и вибрации», Санкт-Петербург, 23-25 марта 2021 года. – С.111-117.

10. Абрамович Г.Н. Влияние крупных вихрей на структуру турбулентных течений со сдвигом // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. – 1979. – № 5. – С. 64-73.
11. Блохинцев Д.И. Возбуждение резонаторов потоком воздуха // ЖТФ. – 1945. – Т. XV. – № 1-2. – С. 63-70.
12. Дубень А.П., Козубская Т.К., Королёв С.И., Маслов В.П., Миронов А.К., Миронова Д.А., Шапаронов В.М. Исследование акустического течения в горле резонатора // Акустический журнал. – 2012. – Т. 58. – №1. – С. 80-92.
13. Марфин Е.А. Повышение энергетической эффективности теплотехнологических систем предприятий нефтяной промышленности: дис. канд. техн. наук: 05.14.04: защищена 28.04.06: утв: 13.10.06. – Казань, 2006. – 147 с.
14. Морз Ф. Колебания и звук. – М.: ГИТТЛ, 1949. – 456 с.
15. Бурьян Ю. А, Сорокин В. Н., Корнеев В. С., Русских Г. С., Капелюховский А. А. Интенсификация нефтедобычи методом вибросейсмического воздействия заглубленными источниками упругих волн. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2014. – 212 с.
16. Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика. –М.: Наука, 1975. – 336 с.